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

Coefficient 2– Durée 2,5 heures

Aucun document autorisé – Calculatrice autorisée

Constitution du sujet :

- **Dossier Sujet** *(mise en situation et questions à traiter par le candidat)*
  - **Mise en situation**……..Pages 2 à 4
  - **PARTIE A** ..... Pages 5 à 7
  - **PARTIE B** ..... Pages 8 à 9
  - **PARTIE C** ..... Page 10
  - **PARTIE D** ..... Page 10
- **Annexes sur le support d'étude** ..... Pages 11
- **Ressources scientifiques**……..Pages 12 à 14
- **Documents Réponse** ..... Pages 15 à 16

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

Les documents réponse DR1 et DR2 (pages 15 et 16) seront à rendre agrafés avec vos copies.

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

STATION DE MARQUAGE LASER

- **Présentation :**

Le marquage laser est de plus en plus utilisé dans l'industrie pour inscrire des numéros de série, des logos ou des codes « data matrix » sur des produits tels que des capots de diode laser Telecom par exemple (Figure 1).







Figure 1 : diode laser Telecom

Les avantages de cette technologie laser sont nombreux : marquage sur une grande variété de matériaux (métal, plastique, bois…), marquage permanent et inaltérable (contrefaçon difficile), marquage rapide et précis (gain de productivité, inscription de petites dimensions), marquage complexe (pièces non planes).



Figure 2 : station de marquage Laseo

Le sujet propose une pré-étude et une modélisation optique d'une station de marquage Laseo.

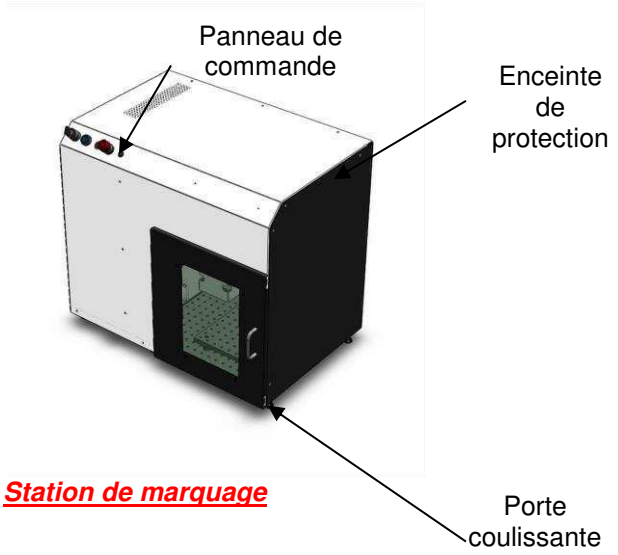
La station est constituée d'un laser fibré YAG dont la sortie est couplée à une tête optique« collimateur-isolateur-expanseur ».

Une tête galvanométrique XY permet de défléchir le faisceau vers la surface du produit à marquer.

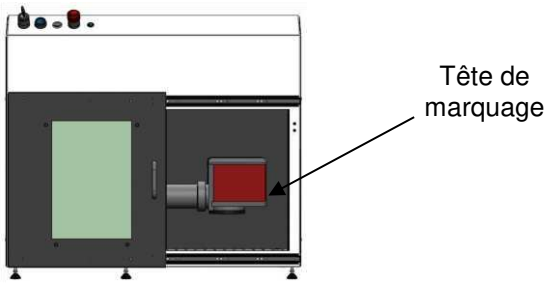
Une lentille F-Thêta située après la tête galvanométrique focalise le faisceau augmentant ainsi la densité de puissance afin d'atteindre le seuil d'ablation de la matière à graver.

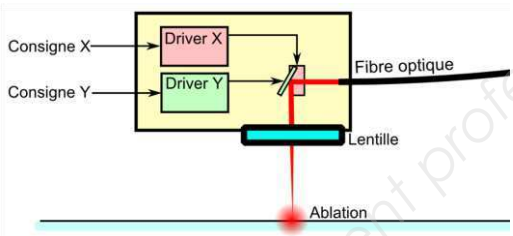
Un logiciel informatique CS-Mark apporte une aide au pilotage automatique de la station : paramétrage du laser et des miroirs de la tête galvanométrique, motorisation de la focalisation, importation du logo (ou du texte) et adaptation de ses dimensions.

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

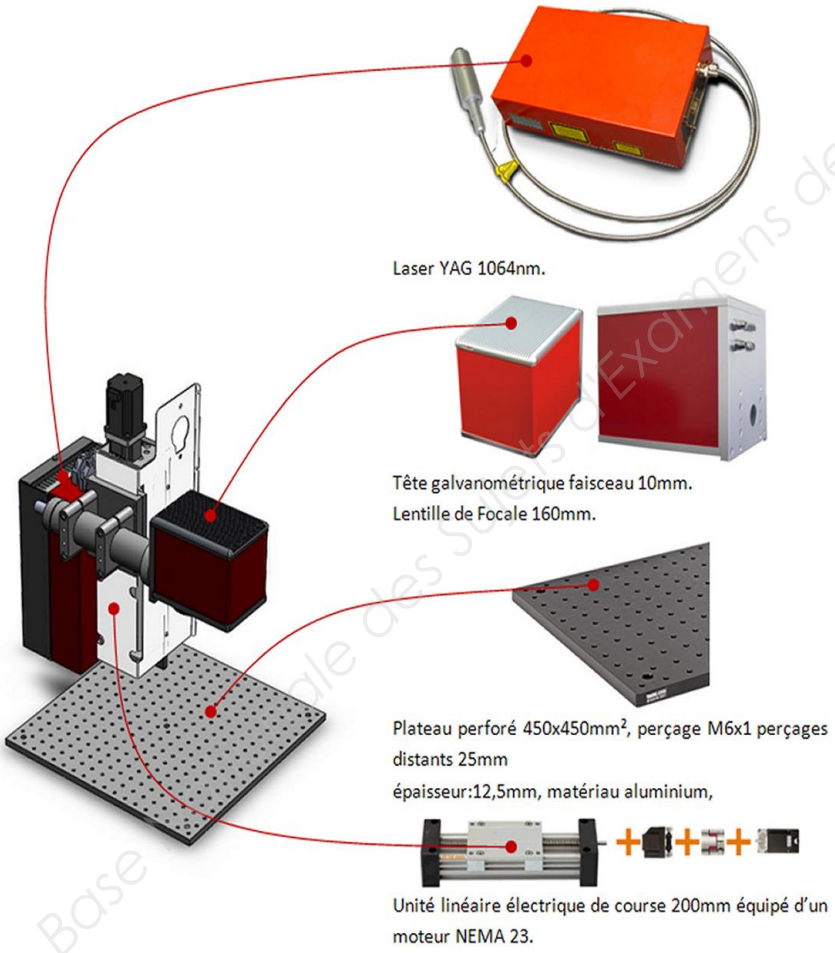


Station de marquage





Synoptique de la tête de marquage



La station de marquage intègre :

- ***Un laser YAG fibré (SPI)*** de longueur d'onde 1064nm et de puissance 20W.

- ***Une tête de marquage*** constituée de miroirs galvano-métriques et d'une lentille de focalisation.

- ***Un extracteur de fumées*** métalliques qui apparaissent lors de l'ablation de la matière.

- ***Un logiciel de marquage*** CSMarkseries qui permet le paramétrage du laser et le pilotage de la tête de marquage.

La tête de marquage est solidaire d'une platine de translation qui permet d'optimiser la focalisation du faisceau laser sur le matériau à graver.

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

Le synoptique optique de la station est le suivant :

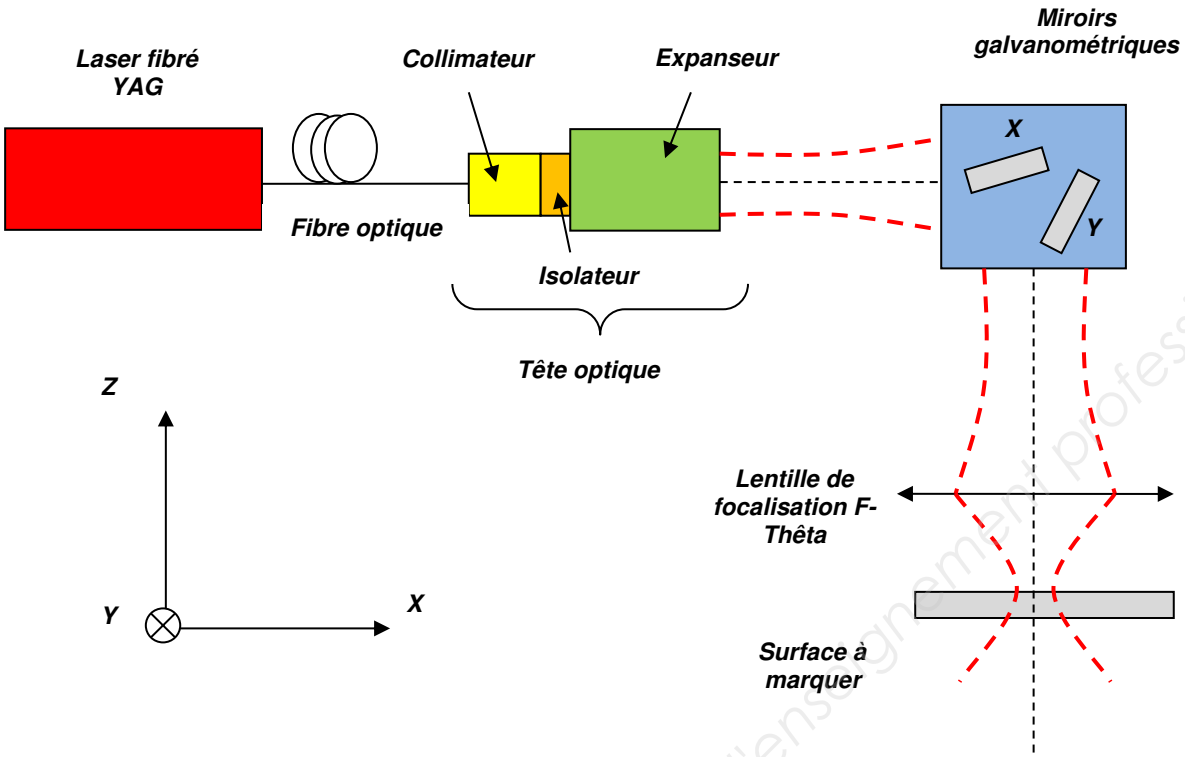


Figure 3 : synoptique de la station de marquage.

Le sujet est constitué de quatre parties indépendantes :

- Partie A : étude de la source laser.
- Partie B : mise en forme du faisceau.
- Partie C : marquage du matériau.
- Partie D : sécurité laser.

Des ressources scientifiques et techniques sont rassemblées en annexe 2.

Données :

- 1 eV = $1{,}602.10^{-19}$ J ;
- constante de Planck : $h = 6{,}626.10^{-34}$ J.s ;
- vitesse de la lumière dans le vide : $c = 2{,}998.10^{8}$ m.s^{-1}

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

PARTIE A : étude de la source laser (5,5 points)

Pour marquer une surface métallique (comme le capot de protection d'une diode laser) avec un faisceau laser, il faut atteindre de fortes densités de puissance. Le régime continu ne permet pas d'atteindre les seuils d'ablation de la matière. La puissance nécessaire serait telle qu'il faudrait un système de refroidissement surdimensionné par rapport aux dimensions de la source laser. On travaille plutôt en régime pulsé.

A.1 Le mécanisme d'émission de ce laser est un système à quatre niveaux (figure 4). Vérifier que la longueur d'onde de la radiation émise par le laser, λ_e, est bien celle donnée en annexe 1. Préciser le domaine d'appartenance de cette radiation.

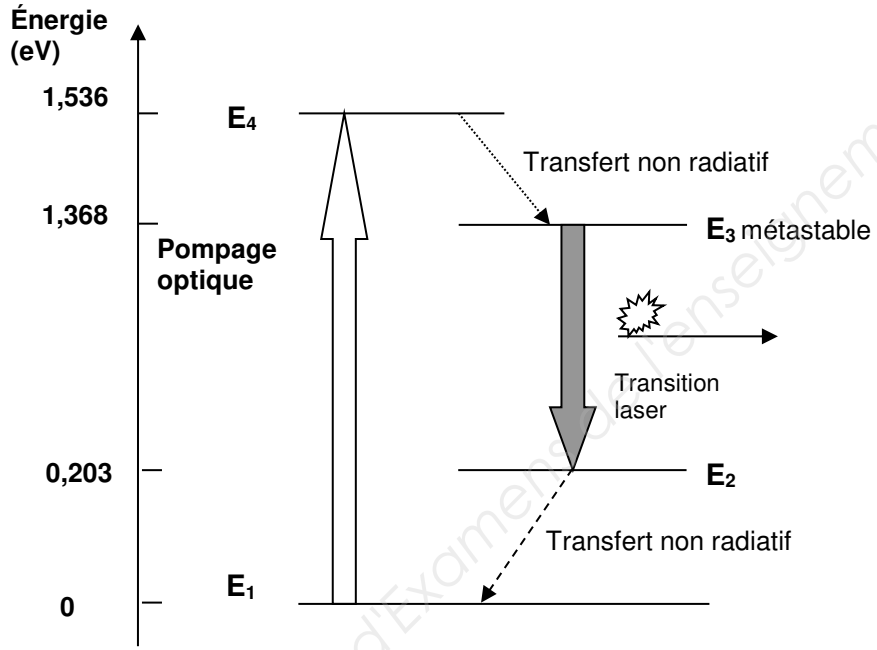


Figure 4 : mécanisme d'émission à quatre niveaux

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

En réalité, les niveaux E_2 et E_3 présentent des sous-niveaux d'énergie. Plusieurs longueurs d'onde sont émises dans une gamme variant de 1000 nm à 1100 nm. La sélection de la longueur d'onde 1064 nm est obtenue par des miroirs de Bragg photo-inscrits dans la fibre.

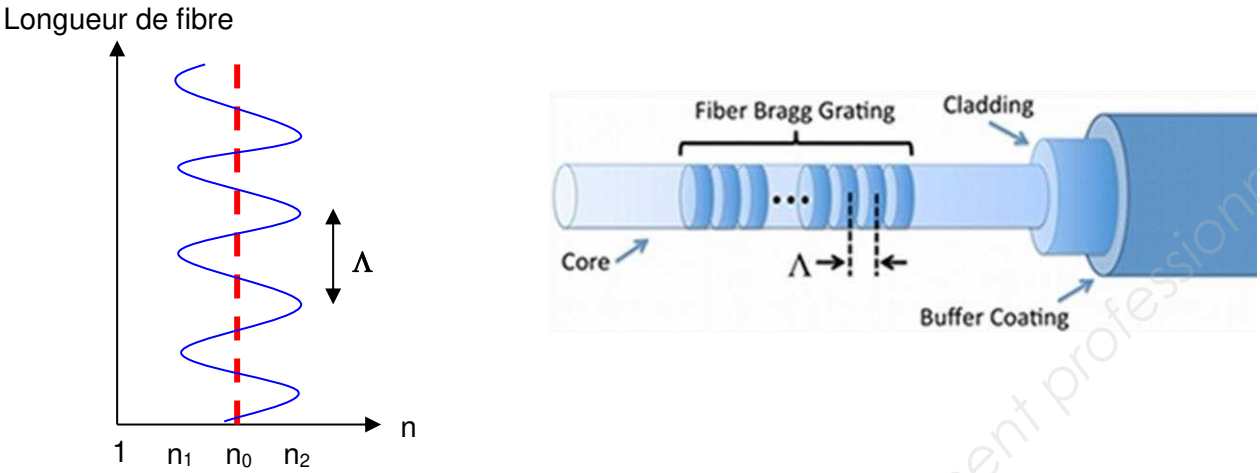


Figure 5 : réseau de Bragg photo-inscrit

L'indice de réfraction *n* de la fibre est modulé entre deux valeurs extrêmes n_1 et n_2 autour de l'indice moyen n_0. Le réseau de Bragg se comporte alors comme un réseau de phase de pas Λ.
Pour simplifier l'étude, on considère que le réseau de Bragg est constitué d'une succession de plans réfléchissants espacés de la distance Λ. Chaque plan réfléchit la lumière incidente. Il en résulte alors des interférences entre les différents faisceaux dont certaines seront constructives.
Le réseau de Bragg est éclairé en incidence normale. On considère qu'il n'y a pas de déphasage lors des réflexions sur les plans.

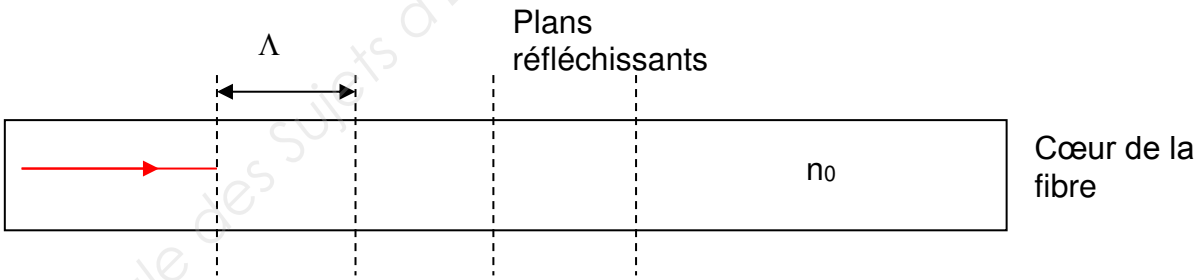


Figure 6 : modèle optique d'un réseau de Bragg

L'indice du cœur de la fibre n_0 vaut 1,465.

A.2 Faire un schéma faisant apparaître les deux premiers rayons réfléchis par deux plans réfléchissants consécutifs.

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

A.3 Déterminer le plus petit pas Λ du réseau de Bragg permettant de sélectionner la longueur d'onde 1064 nm. Expliquer votre raisonnement.

Le laser peut fonctionner en mode continu ou en mode impulsionnel (mode déclenché « Q-switching »). Dans ce cas, on génère des impulsions de quelques millijoules pendant une durée de quelques dizaines de nanosecondes.

A.4 En se référant à l'annexe 1, relever la gamme des fréquences F de répétition des impulsions et la gamme des durées Δt des impulsions.

A.5 On se placera dans les conditions suivantes :

Puissance moyenne : P_m = 20 W ; F = 10 kHz ; Δt = 15 ns.

À l'aide des documents fournis dans les ressources scientifiques, calculer la puissance crête P_c et l'énergie Q_i d'une impulsion. En déduire l'intérêt du régime pulsé.

Les cristaux électro-optiques possèdent la propriété d'avoir une biréfringence qui peut être modifiée en appliquant une différence de potentiels à des électrodes de contact avec le cristal.

- Si l'on applique une tenson $V_{\lambda/2}$, le cristal devient une lame demi-onde.
- Si l'on applique une tenson V_{λ}, le cristal devient une lame d'onde.

Associés à des polariseurs convenablement orientés, les cristaux permettent d'obtenir des interrupteurs optiques d'une extrême rapidité. La cavité peut alors être commutée en mode « passant » ou « bloqué » pour les radiations électromagnétiques (*on dit que la cavité est « passante » ou « bloquée »*).

A.6 Indiquer sur les documents réponse **DR1 et DR2 à rendre avec la copie**, les états de polarisation de la lumière aux endroits repérés par des cercles en tirets. Préciser dans chaque cas si la cavité est bloquée ou passante en rayant la mauvaise réponse.

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

PARTIE B : mise en forme du faisceau (5,5 points)

Le faisceau laser est émis à la sortie d'une fibre multimode d'ouverture numérique *ON* égale à 0,197. Pour marquer la matière, il faut obtenir une tache de focalisation de très petite dimension. Plusieurs étapes intermédiaires sont donc nécessaires : après la sortie de la fibre, le faisceau est collimaté puis expansé et enfin focalisé. (Figure 7)

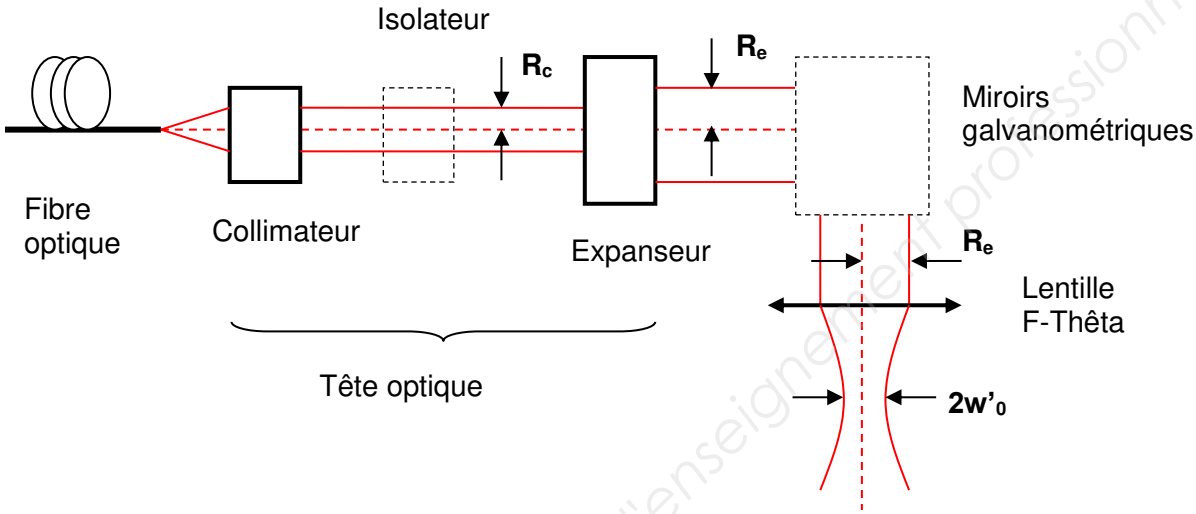


Figure 7 : marche du faisceau laser à travers le système

B.1 On modélise le collimateur par une lentille convergente de distance focale image *f'* égale à 5 mm. À l'aide d'un schéma de principe du collimateur, déterminer le rayon R_c du faisceau collimaté.

Afin de protéger les miroirs galvanométriques des fortes densités de puissance, il est nécessaire d'augmenter la surface du faisceau tout en conservant la collimation. On utilise alors un expanseur. C'est un doublet afocal constitué d'une lentille divergente et d'une lentille convergente de distances focales images respectives *f'1* et *f'2*.

$$f'_1 = -20 \text{ mm} \quad \text{et} \quad f'_2 = 80 \text{ mm}$$

B.2 Faire un schéma de principe de l'expanseur en choisissant une échelle adaptée. Préciser la position des foyers objet et image de chaque lentille. Faire apparaître les distances focales f'_1 et f'_2 et tracer la marche d'un faisceau incident collimaté et centré sur l'axe des lentilles.

B.3 Déterminer l'encombrement *L* de l'expanseur.

B.4 Déterminer le rayon R_e du faisceau en sortie de l'expanseur sachant que le rayon du faisceau incident vaut 1,00 mm.

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

B.5 Le diamètre $2w_0'$ de la tache de focalisation peut s'exprimer par la relation :

$$2w_0' = 2.\frac{\lambda.f}{\pi.R_e}, \qquad \text{avec :}$$

f la distance focale image de la lentille F-Thêta et R_e le rayon à la sortie de l'expanseur.

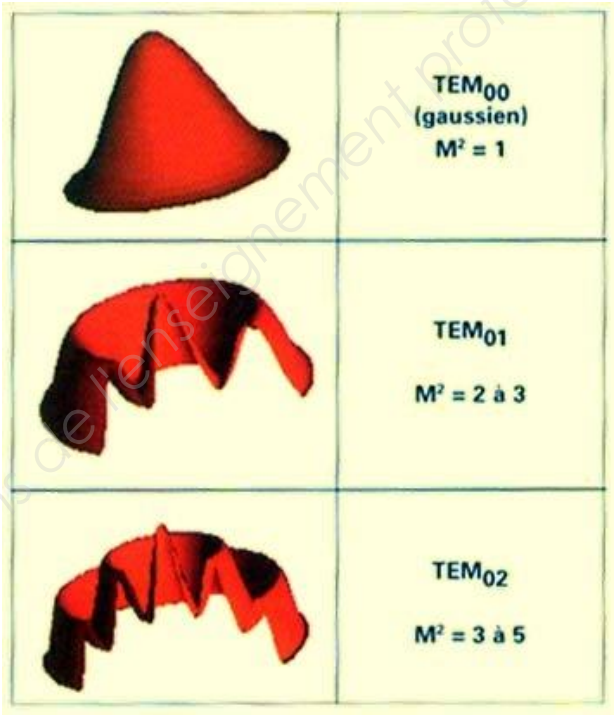
Le constructeur indique que R_e est égal à 4,00 mm. Calculer le diamètre de la tache de focalisation et comparer la valeur obtenue avec la donnée du constructeur (Annexe 1).

On note M^2 le facteur de dégradation de la divergence du faisceau. La valeur de M^2 est liée au mode d'émission (voir figure ci-contre).

Le diamètre le plus petit est obtenu lorsque M^2 vaut 1. Une augmentation de la valeur de M^2 induit une augmentation du diamètre de la tache de focalisation.

La connaissance du facteur M^2 est de plus en plus demandée par les utilisateurs de machine industrielle car il permet d'estimer avec plus de précision le diamètre de la tache de focalisation et la divergence du faisceau.

Dans le cas de la découpe laser, on obtient de bons résultats quand le faisceau est gaussien (mode TEM_{00}).



Pour le soudage laser, il est préférable de régler la cavité en mode TEM_{02} (cavité cylindrique).

Pour le marquage laser, il faut s'arranger pour que la tache de focalisation soit la plus petite possible.

B.6 Expliquer pourquoi la station Laséo est bien adaptée pour marquer des pièces métalliques.

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

PARTIE C : marquage du matériau (5,5 points)

Les deux miroirs galvanométriques ont un coefficient de réflexion de 99,5% chacun et la lentille F-Thêta absorbe 1% du rayonnement reçu.

C.1 Déterminer l'expression de la puissance moyenne P_s du faisceau en sortie de la lentille F-Thêta en fonction de la puissance moyenne P_m du faisceau d'entrée.

Le diamètre de la tache de focalisation vaut 26,0 µm et le seuil d'ablation de la plupart des métaux est supérieur à 10 GW.cm^{-2}. Le laser peut être utilisé selon deux modes :
- mode continu avec une puissance du faisceau, P_m, égale à 20,0 W ;
- mode impulsionnel (Q-switching) avec une puissance crête, P_c, de 1,33.10^5 W.

C.2 Quel mode devra-t-on utiliser pour effectuer le marquage du matériau (*La réponse sera argumentée par un calcul approprié)* ?

C.3 On souhaite marquer des capots de diodes laser de dimensions 10x20 mm. Déterminer le nombre maximal de capots que l'on peut marquer en même temps dans la zone de gravure de la station Laseo (Annexe 1).

C.4 On souhaite marquer un trait plein de 1mm. La station Laséo est paramétrée à une fréquence de tir de 10 kHz et à une vitesse de marquage de 0,10 m.s^{-1}. Déterminer le nombre de tirs/mm de la station avec ce réglage. En déduire si le trait marqué est effectivement plein. Justifier la réponse.

PARTIE D : sécurité laser (3,5 points)

Cette étude est réalisée dans le cas où le laser est utilisé en mode continu. La puissance du faisceau laser après focalisation est supposée égale à 19,6 W et son diamètre, avant la focalisation, vaut 8 mm.

D.1 En se référant aux ressources scientifiques, calculer la « distance nominale de risque oculaire » (DNRO) de la station de marquage en absence de protection. Conclure.

D.2 Citer des moyens de protection nécessaires à une utilisation sécurisée de la station. (*Sont au moins attendus : un moyen de protection individuelle, un moyen de protection collective et une signalétique*).

D.3 Dans le cas où le laser est utilisé en mode impulsionnel, les moyens de sécurité devraient-ils être renforcés ou allégés (*la réponse attendue est à justifier sans calcul)* ?

D.4 En se référant aux ressources scientifiques, indiquer le marquage normalisé CE d'une paire de lunettes assurant la protection oculaire d'un technicien utilisant cette station de marquage en mode impulsionnel. Le facteur de transmission pour la longueur d'onde filtrée doit être au moins de 10^{-6}. Justifier la réponse.

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

ANNEXE 1 : Caractéristiques techniques de la station de marquage

Caractéristiques techniques du laser.

Type de laser	YAG
Puissance optique	20 W
Longueur d'onde	1064 nm ± 5nm
Taux de redoublement Q-switch	De 5 à 25 kHz
Mode de fonctionnement CW	Oui
Largeur des impulsions	De 5 à 50 ns
Polarisation	Aléatoire
Spécifications électriques	24 VDC, 10 A
Refroidissement	Air
Température de fonctionnement	15 – 40 °C
Hygrométrie acceptable	5 – 95 % RH, sans condensation
Qualité du faisceau (M^2)	< 1,5
Diamètre du faisceau $1/e^2$	< 8 mm

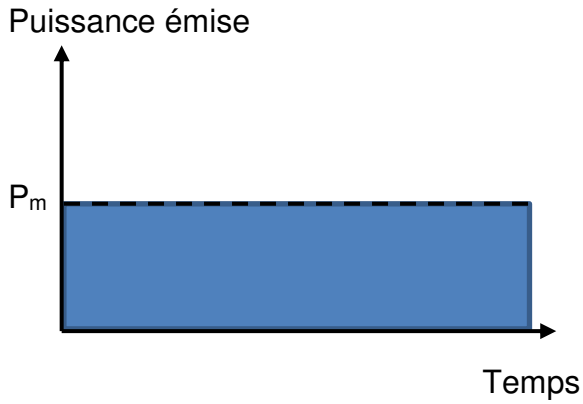
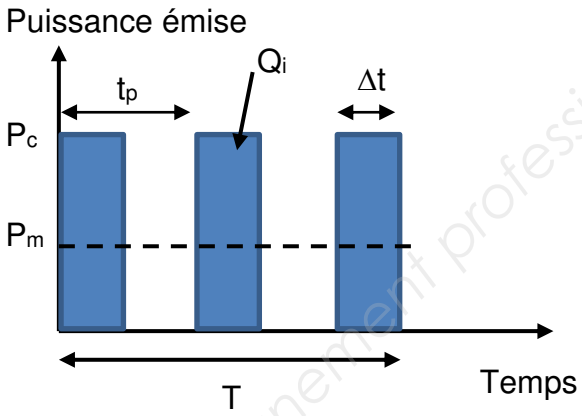
Caractéristiques de la lentille de focalisation F-Thêta

Focale de la lentille	Zone de gravure théorique	Distance de travail théorique	Diamètre moyen théorique du spot laser
160 mm	110 mm x 110 mm	174 mm	26 µm

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

ANNEXE 2. RESSOURCES SCIENTIFIQUES ET TECHNIQUES

Régimes de fonctionnement d'un laser

Régime continu	Régime pulsé
	

Puissance crête : P_c

Durée d'une impulsion : Δt

Période du signal impulsionnel : t_p

Durée du train d'impulsions : T

Fréquence de répétition des impulsions :

$$F = \frac{Nombre\ d'impulsions\ pendant\ la\ durée\ T}{T}$$

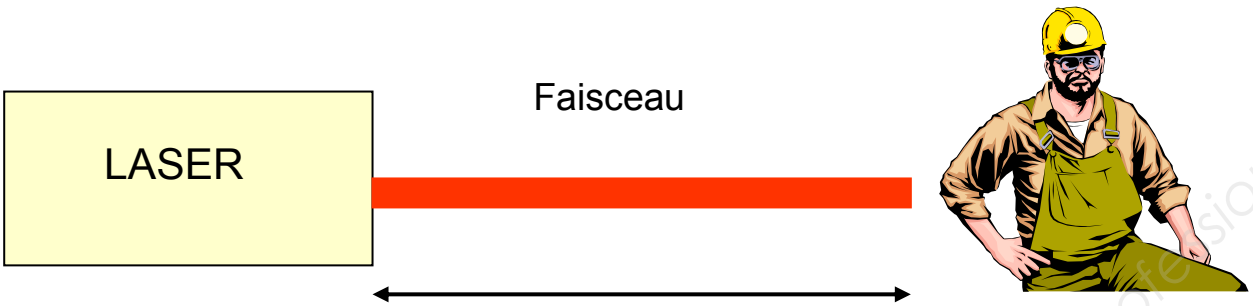
Énergie d'une impulsion : $Q_i = P_c \times t_p$

Puissance moyenne du train d'impulsions sur la durée T : $P_m = Q_i \times F$

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

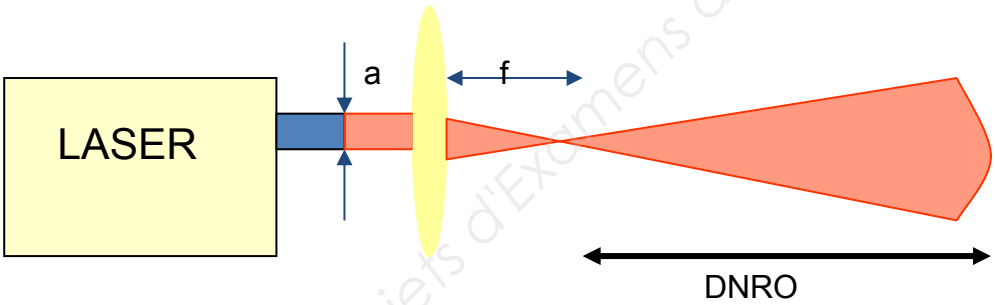
Sécurité laser

Laser non focalisé



La Distance Nominale de Risque Oculaire (DNRO) est la distance pour laquelle l'éclairement sur la cornée correspond à l'Exposition Maximale Permise (EMP). Un technicien sans protection qui se trouve à une distance du laser inférieure à la DNRO est en danger.

Laser focalisé.



Dans le cas d'un faisceau laser focalisé, on calcule la DNRO à partir de l'expression suivante :

$$DNRO = \frac{f}{a}\left(\frac{4\,P}{\pi\,EMP}\right)^{\frac{1}{2}}$$

- *a* : diamètre du faisceau avant focalisation.
- *f* : distance focale image de la lentille de focalisation.
- *P* : puissance optique du faisceau focalisé.

L'EMP (exposition maximale permise) pour un laser YAG (1064 nm) est de 500 $W.m^{-2}$.

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

Marquage normalisé CE

Les lunettes doivent respecter une identification stricte.



- λ : longueur d'onde de filtration.

- D : laser continu.

- I, R : laser impulsionnel et déclenché (ms, µs, ns).

- M : laser impulsionnel (ps, fs) à couplage de modes.

- L_n , OD : indice de protection CE et US.

- Identifiant du fabriquant.

À titre d'exemple, les lunettes marquées 950 D L5 CE sont des lunettes de protection d'indice 5 pour l'utilisation d'une source laser de longueur d'onde 950 nm fonctionnant en régime continu. Le facteur de transmission vaut 10^{-5} pour la longueur d'onde filtrée. Les lunettes sont de fabrication européenne.

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

DOCUMENT RÉPONSE DR1

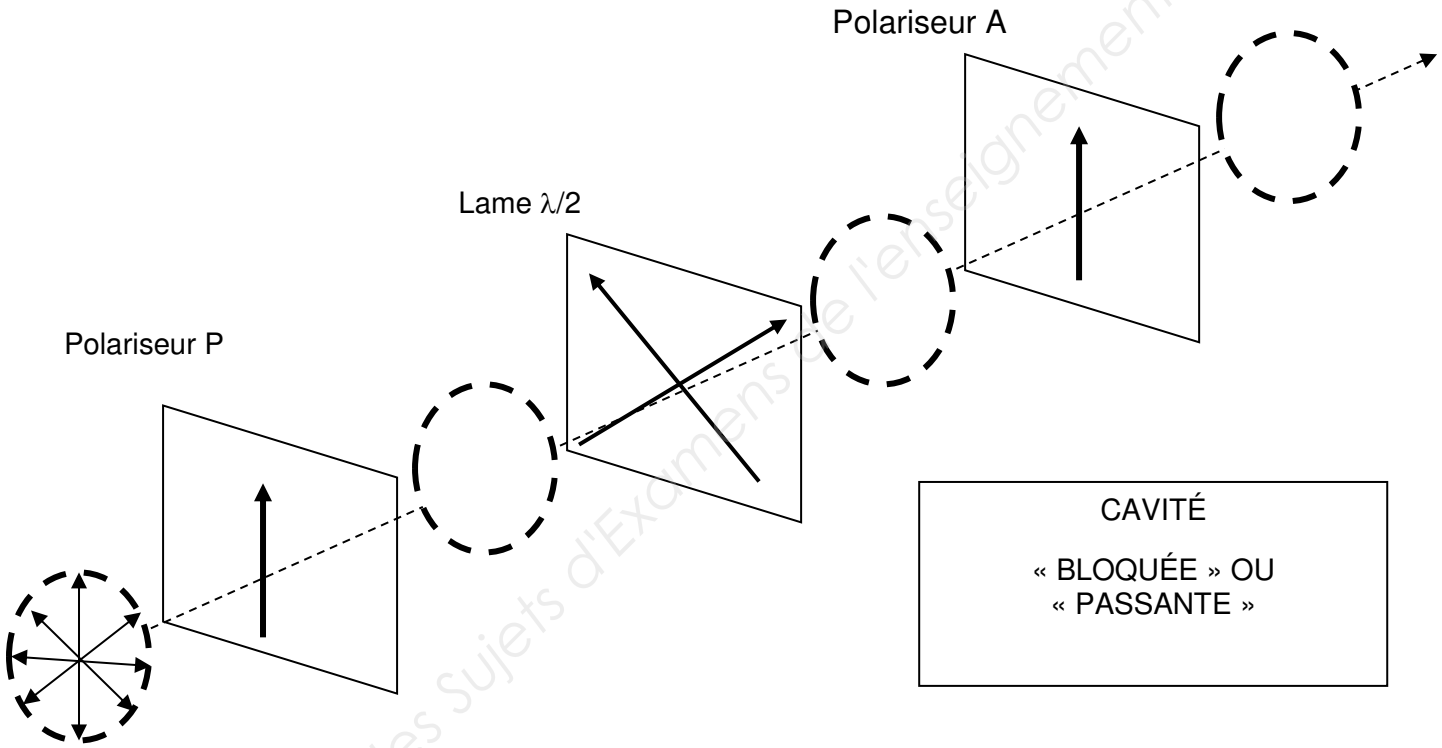
PARTIE 1

Réponses à la question 1.7.

1er cas.

Les axes des polariseurs P et A sont orientés à 45° des lignes neutres de la lame ½ onde (λ/2). La lumière incidente n'est pas polarisée.

Système intra-cavité équivalent à une lame ½ onde



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

DOCUMENT RÉPONSE DR2

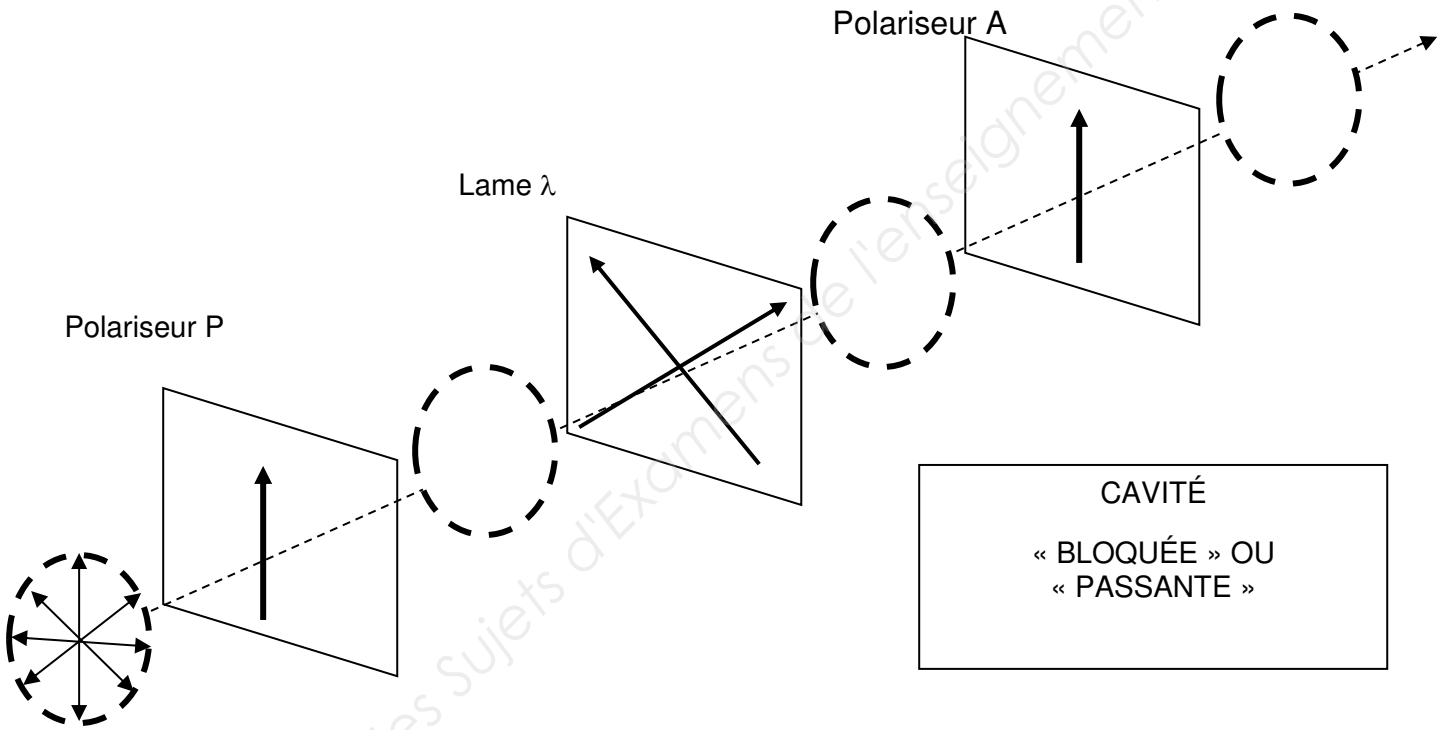
PARTIE 1

Réponses à la question 1.7.

2nd cas.

Les axes des polariseurs P et A sont orientés à 45° des lignes neutres de la lame d'onde (λ). La lumière incidente n'est pas polarisée.

Système intra-cavité équivalent à une lame d'onde



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.