



**LE RÉSEAU DE CRÉATION  
ET D'ACCOMPAGNEMENT PÉDAGOGIQUES**

**Ce document a été mis en ligne par le Réseau Canopé  
pour la Base Nationale des Sujets d'Examens de l'enseignement professionnel.**

**Ce fichier numérique ne peut être reproduit, représenté, adapté ou traduit sans autorisation.**

# 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.**

BTS Systèmes photoniques	Code épreuve : SH41PEM P	SESSION 2017
E41 - PRE-ETUDE ET MODELISATION D'UN SYSTEME OPTIQUE	Coef 2 - Durée 2,5h	Page 1 sur 16

## 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.

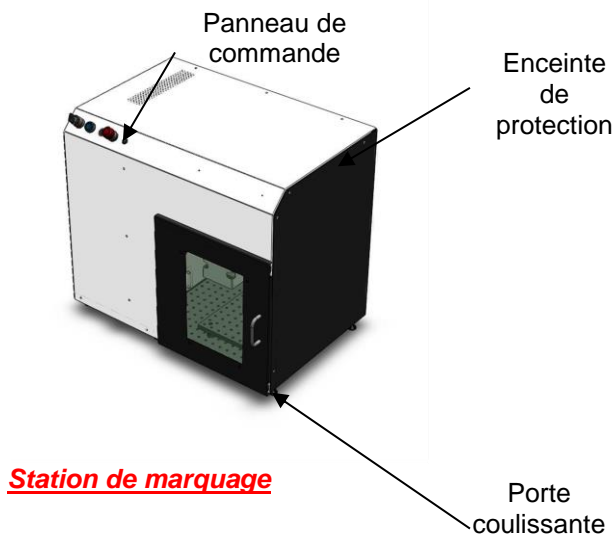
La station est constituée d'un laser fibré YAG dont la sortie est couplée à une tête optique « collimateur-isolateur-expandeur ».

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

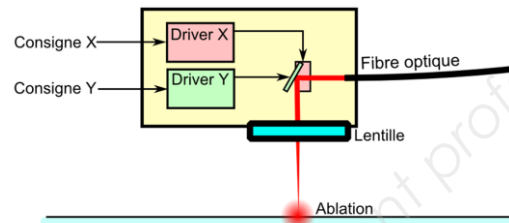
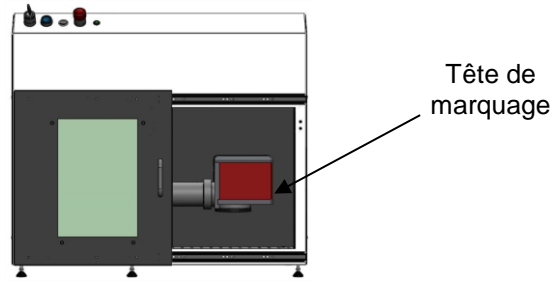
Une lentille F-Thêta située après la tête galvanométrique focalise le faisceau augmentant ainsi la densité de puissance afin d'atteindre le seuil d'ablation de la matière à graver.

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.

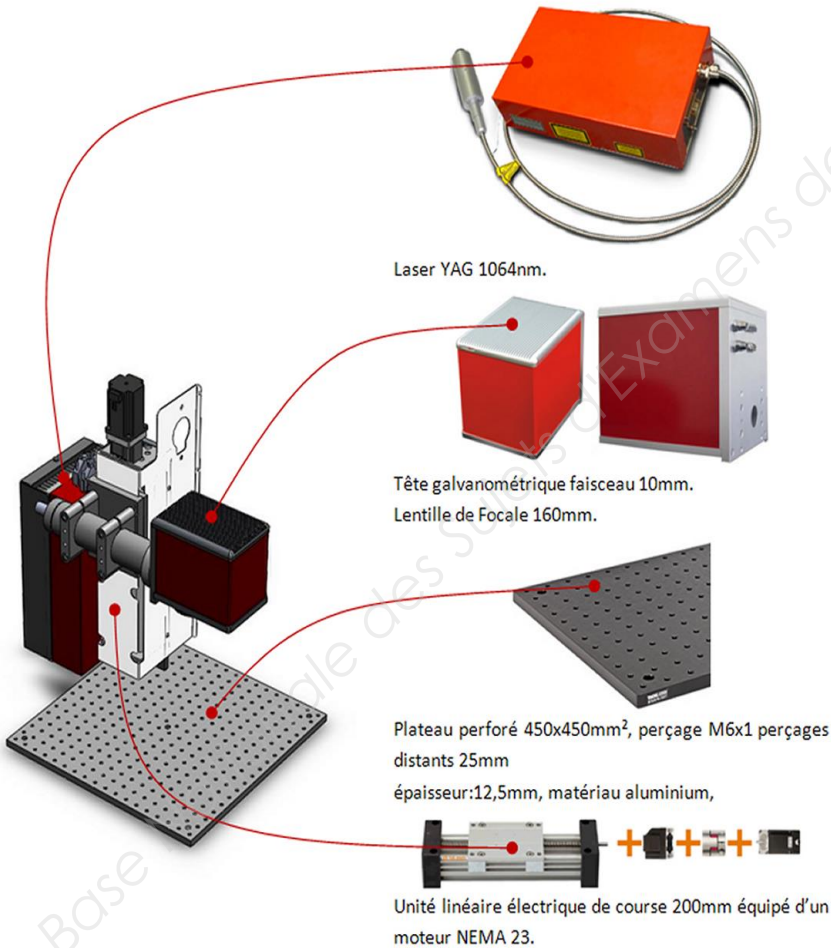
BTS Systèmes photoniques	Code épreuve : SH41PEM P	SESSION 2017
E41 - PRE-ETUDE ET MODELISATION D'UN SYSTEME OPTIQUE	Coef 2 - Durée 2,5h	Page 2 sur 16



**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 galvanométriques 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.

<b>BTS Systèmes photoniques</b>	<b>Code épreuve : SH41PEM P</b>	<b>SESSION 2017</b>
<b>E41 - PRE-ETUDE ET MODELISATION D'UN SYSTEME OPTIQUE</b>	<b>Coef 2 - Durée 2,5h</b>	<b>Page 3 sur 16</b>

Le synoptique optique de la station est le suivant :

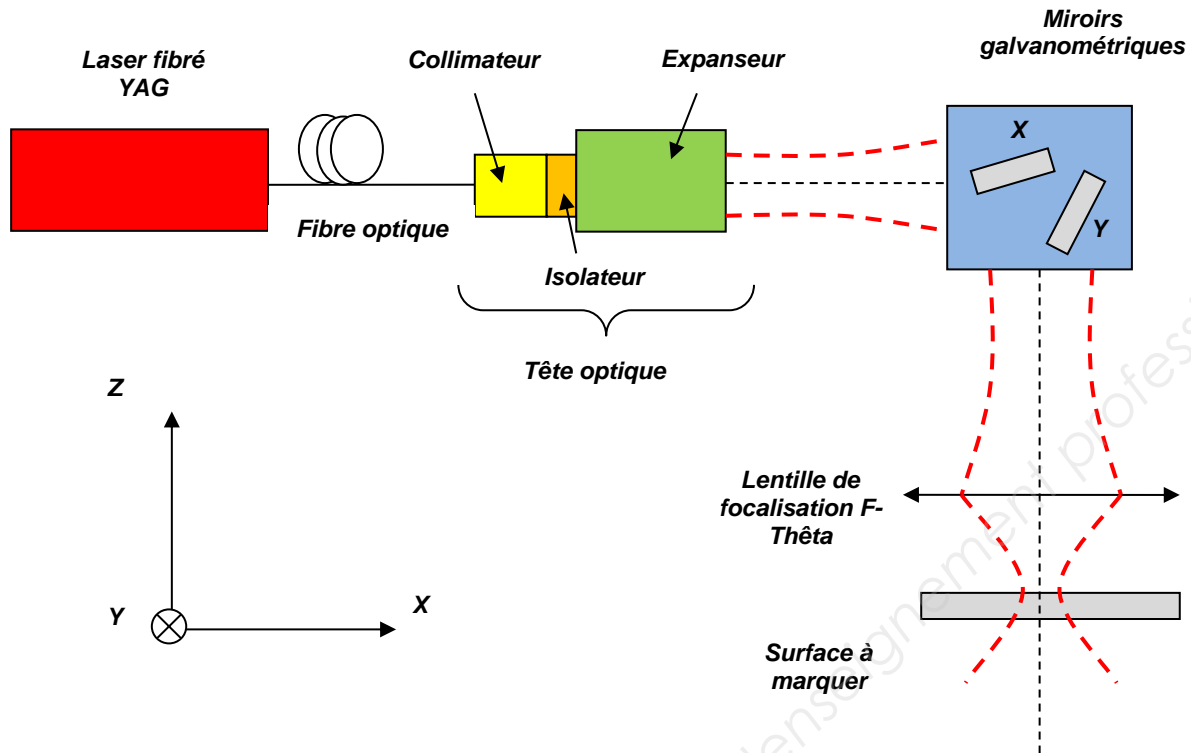


Figure 3 : synoptique de la station de marquage.

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 :**

- $1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$  ;
- constante de Planck :  $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$  ;
- vitesse de la lumière dans le vide :  $c = 2,998 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$

BTS Systèmes photoniques	Code épreuve : SH41PEM P	SESSION 2017
E41 - PRE-ETUDE ET MODELISATION D'UN SYSTEME OPTIQUE	Coef 2 - Durée 2,5h	Page 4 sur 16

## 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,  $\lambda_e$ , est bien celle donnée en annexe 1. Préciser le domaine d'appartenance de cette radiation.

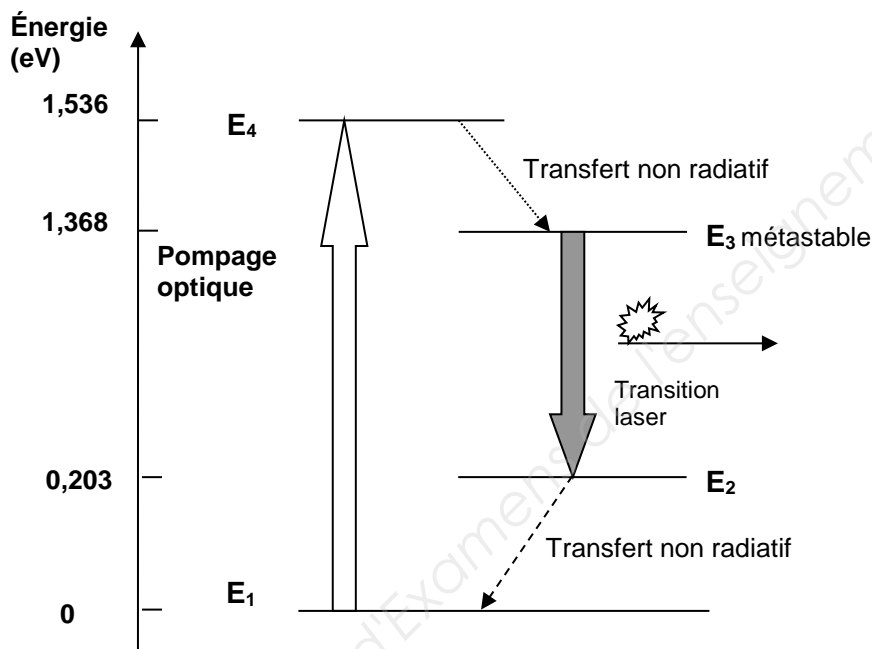


Figure 4 : mécanisme d'émission à quatre niveaux

BTS Systèmes photoniques	Code épreuve : SH41PEM P	SESSION 2017
E41 - PRE-ETUDE ET MODELISATION D'UN SYSTEME OPTIQUE	Coef 2 - Durée 2,5h	Page 5 sur 16

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.

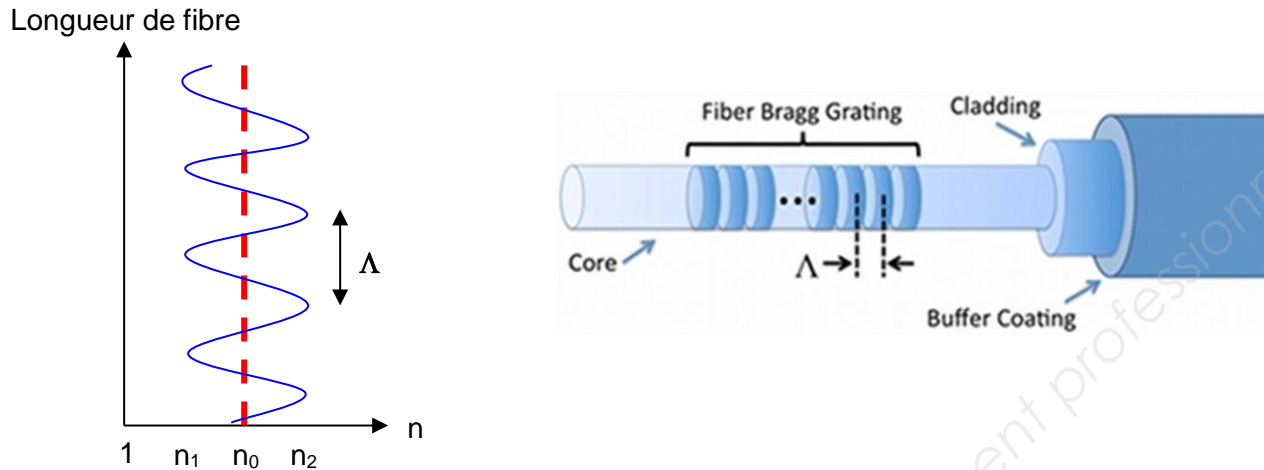


Figure 5 : réseau de Bragg photo-inscrit

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  $\Lambda$ .

Pour simplifier l'étude, on considère que le réseau de Bragg est constitué d'une succession de plans réfléchissants espacés de la distance  $\Lambda$ . 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.

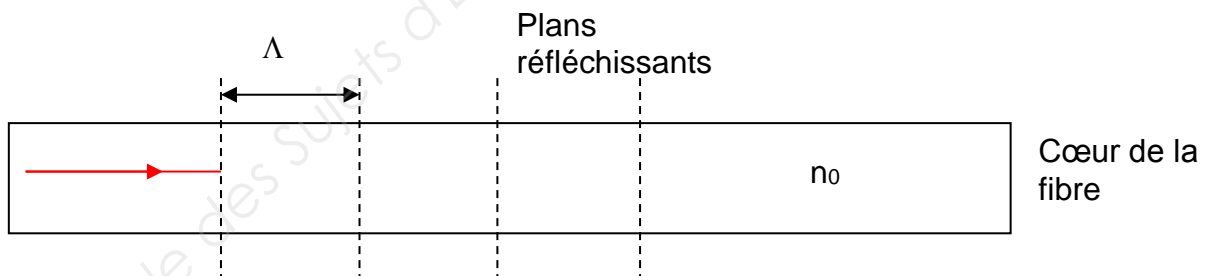


Figure 6 : modèle optique d'un réseau de Bragg

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.

BTS Systèmes photoniques	Code épreuve : SH41PEM P	SESSION 2017
E41 - PRE-ETUDE ET MODELISATION D'UN SYSTEME OPTIQUE	Coef 2 - Durée 2,5h	Page 6 sur 16

A.3 Déterminer le plus petit pas  $\Lambda$  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 impulsif (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  $\Delta t$  des impulsions.

A.5 On se placera dans les conditions suivantes :

Puissance moyenne :  $P_m = 20 \text{ W}$  ;  $F = 10 \text{ kHz}$  ;  $\Delta t = 15 \text{ ns}$ .

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

<b>BTS Systèmes photoniques</b>	<b>Code épreuve : SH41PEM P</b>	<b>SESSION 2017</b>
<b>E41 - PRE-ETUDE ET MODELISATION D'UN SYSTEME OPTIQUE</b>	<b>Coef 2 - Durée 2,5h</b>	Page 7 sur 16



## 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)

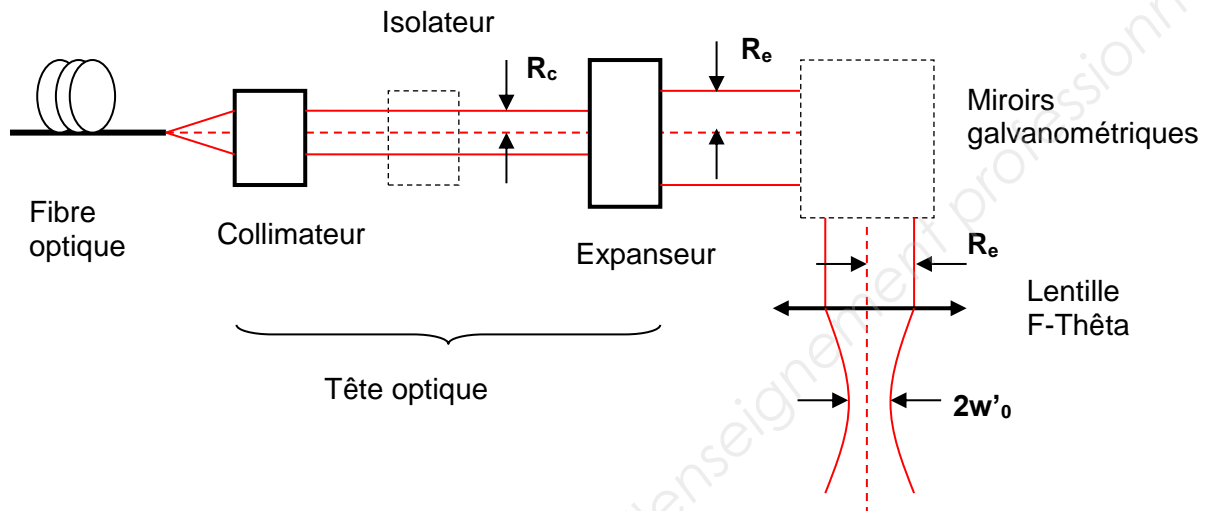


Figure 7 : marche du faisceau laser à travers le système

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

BTS Systèmes photoniques	Code épreuve : SH41PEM P	SESSION 2017
E41 - PRE-ETUDE ET MODELISATION D'UN SYSTEME OPTIQUE	Coef 2 - Durée 2,5h	Page 8 sur 16

B.5 Le diamètre  $2w'_0$  de la tache de focalisation peut s'exprimer par la relation :

$$2w'_0 = 2 \cdot \frac{\lambda \cdot f}{\pi \cdot R_e}, \quad \text{avec :}$$

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

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.

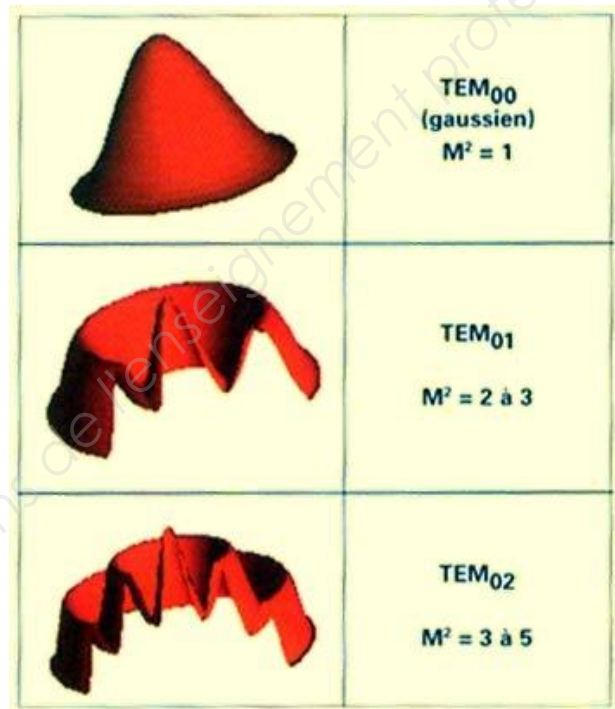
La connaissance du facteur  $M^2$  est de plus en plus demandée par les utilisateurs de machine industrielle car il permet d'estimer avec plus de précision le diamètre de la tache de focalisation et la divergence du faisceau.

Dans le cas de la découpe laser, on obtient de bons résultats quand le faisceau est gaussien (mode TEM<sub>00</sub>).

Pour le soudage laser, il est préférable de régler la cavité en mode TEM<sub>02</sub> (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.



<b>BTS Systèmes photoniques</b>	<b>Code épreuve : SH41PEM P</b>	<b>SESSION 2017</b>
<b>E41 - PRE-ETUDE ET MODELISATION D'UN SYSTEME OPTIQUE</b>	<b>Coef 2 - Durée 2,5h</b>	Page 9 sur 16

## 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  $\mu\text{m}$  et le seuil d'ablation de la plupart des métaux est supérieur à 10  $\text{GW}\cdot\text{cm}^{-2}$ . 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  $1,33\cdot 10^5$  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  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ . 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.

BTS Systèmes photoniques	Code épreuve : SH41PEM P	SESSION 2017
E41 - PRE-ETUDE ET MODELISATION D'UN SYSTEME OPTIQUE	Coef 2 - Durée 2,5h	Page 10 sur 16

## **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 $\pm$ 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

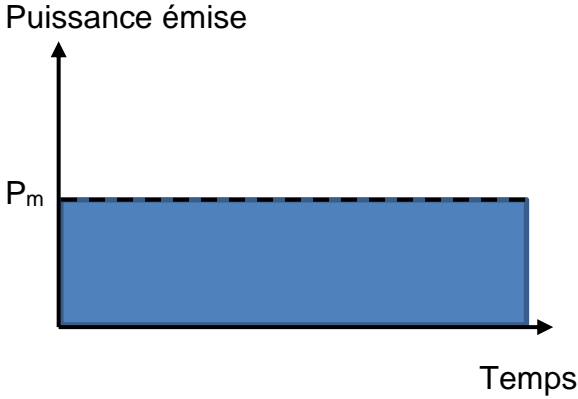
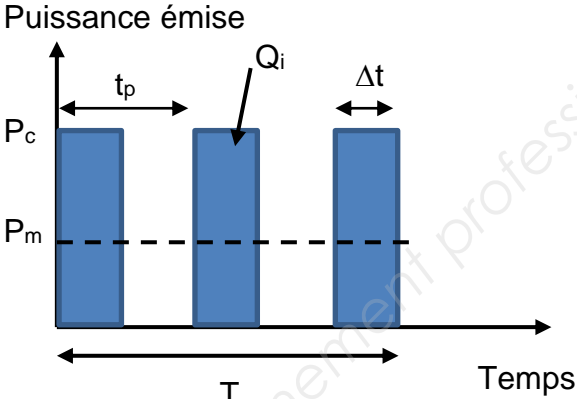
### **Caractéristiques de la lentille de focalisation F-Thêta**

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 $\mu$ m

<b>BTS Systèmes photoniques</b>	<b>Code épreuve : SH41PEM P</b>	<b>SESSION 2017</b>
<b>E41 - PRE-ETUDE ET MODELISATION D'UN SYSTEME OPTIQUE</b>	<b>Coef 2 - Durée 2,5h</b>	<b>Page 11 sur 16</b>

## ANNEXE 2. RESSOURCES SCIENTIFIQUES ET TECHNIQUES

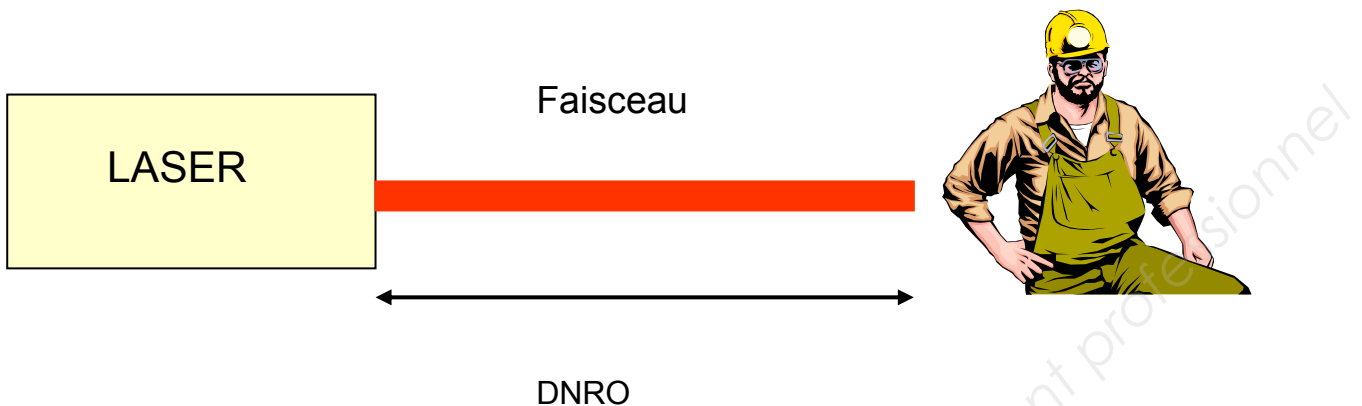
### Régimes de fonctionnement d'un laser

Régime continu	Régime pulsé
 <p>Puissance émise</p> <p>Puissance crête : <math>P_c</math></p> <p>Durée d'une impulsion : <math>\Delta t</math></p> <p>Période du signal impulsionnel : <math>t_p</math></p> <p>Durée du train d'impulsions : <math>T</math></p> <p>Fréquence de répétition des impulsions :</p> $F = \frac{\text{Nombre d'impulsions pendant la durée } T}{T}$ <p>Énergie d'une impulsion : <math>Q_i = P_c \times t_p</math></p> <p>Puissance moyenne du train d'impulsions sur la durée <math>T</math> : <math>P_m = Q_i \times F</math></p>	 <p>Puissance émise</p> <p>Puissance crête : <math>P_c</math></p> <p>Durée d'une impulsion : <math>\Delta t</math></p> <p>Période du signal impulsionnel : <math>t_p</math></p> <p>Durée du train d'impulsions : <math>T</math></p> <p>Fréquence de répétition des impulsions :</p> $F = \frac{\text{Nombre d'impulsions pendant la durée } T}{T}$ <p>Énergie d'une impulsion : <math>Q_i = P_c \times t_p</math></p> <p>Puissance moyenne du train d'impulsions sur la durée <math>T</math> : <math>P_m = Q_i \times F</math></p>

BTS Systèmes photoniques	Code épreuve : SH41PEM P	SESSION 2017
E41 - PRE-ETUDE ET MODELISATION D'UN SYSTEME OPTIQUE	Coef 2 - Durée 2,5h	Page 12 sur 16

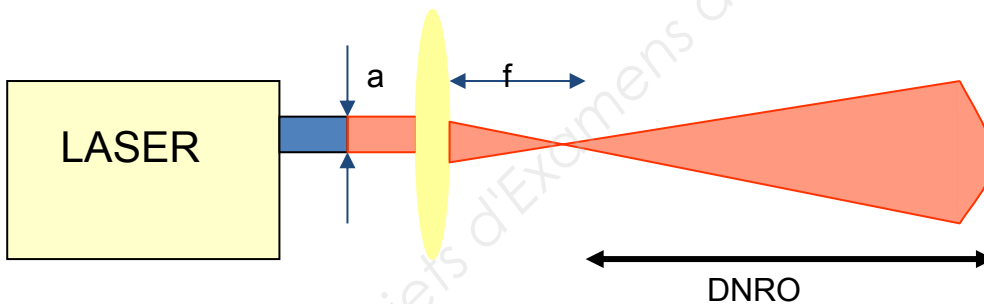
## Sécurité laser

### 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 :

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

- $a$  : 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<sup>-2</sup>.

<b>BTS Systèmes photoniques</b>	<b>Code épreuve : SH41PEM P</b>	<b>SESSION 2017</b>
<b>E41 - PRE-ETUDE ET MODELISATION D'UN SYSTEME OPTIQUE</b>	<b>Coef 2 - Durée 2,5h</b>	<b>Page 13 sur 16</b>

## Marquage normalisé CE

Les lunettes doivent respecter une identification stricte.

- $\lambda$  : longueur d'onde de filtration.
- D : laser continu.
- I, R : laser impulsionnel et déclenché (ms,  $\mu$ s, ns).
- M : laser impulsionnel (ps, fs) à couplage de modes.
- $L_n$ , OD : indice de protection CE et US.
- Identifiant du fabricant.



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.

<b>BTS Systèmes photoniques</b>	<b>Code épreuve : SH41PEM P</b>	<b>SESSION 2017</b>
<b>E41 - PRE-ETUDE ET MODELISATION D'UN SYSTEME OPTIQUE</b>	<b>Coef 2 - Durée 2,5h</b>	<b>Page 14 sur 16</b>

# DOCUMENT RÉPONSE DR1

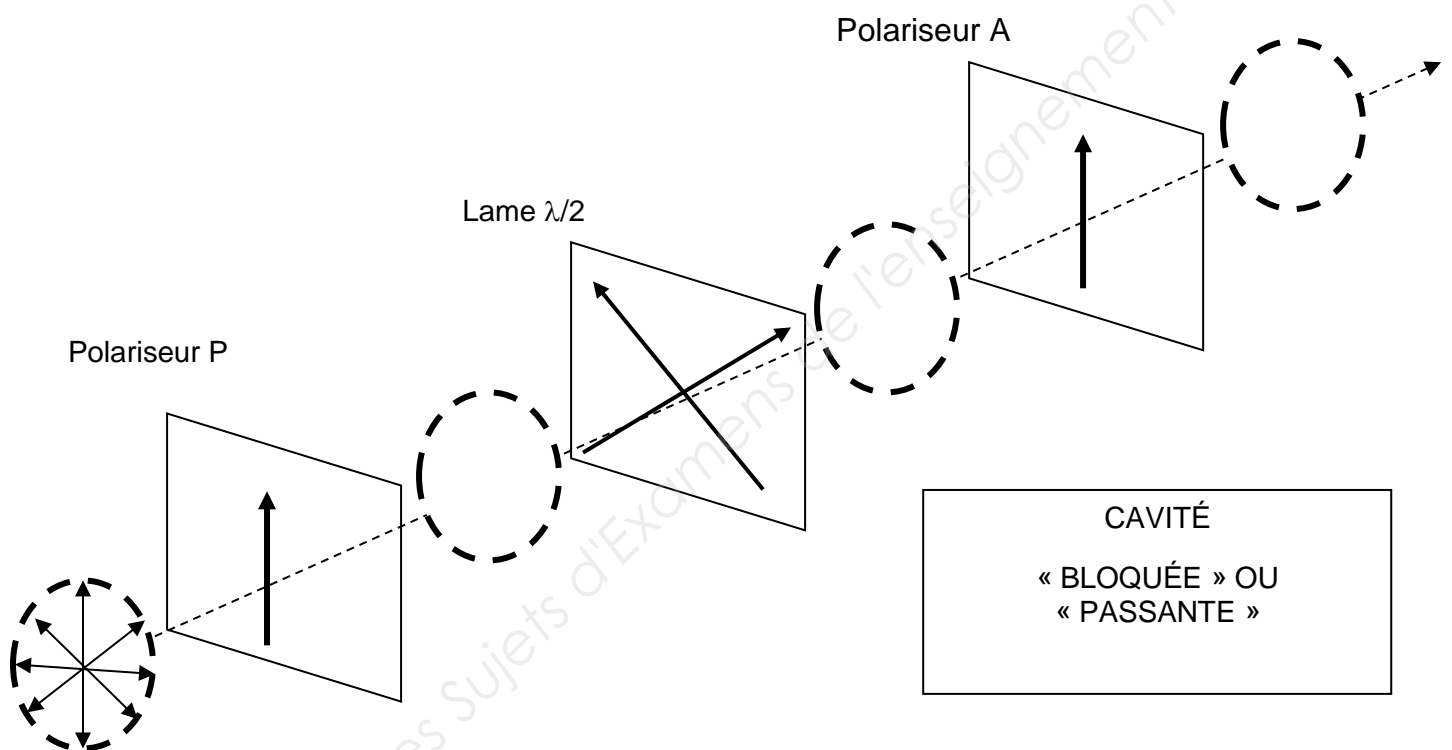
## PARTIE 1

### Réponses à la question 1.7.

#### 1<sup>er</sup> cas.

Les axes des polariseurs P et A sont orientés à  $45^\circ$  des lignes neutres de la lame  $\frac{1}{2}$  onde ( $\lambda/2$ ). La lumière incidente n'est pas polarisée.

Système intra-cavité équivalent à une lame  $\frac{1}{2}$  onde



BTS Systèmes photoniques	Code épreuve : SH41PEM P	SESSION 2017
E41 - PRE-ETUDE ET MODELISATION D'UN SYSTEME OPTIQUE	Coef 2 - Durée 2,5h	Page 15 sur 16



# DOCUMENT RÉPONSE DR2

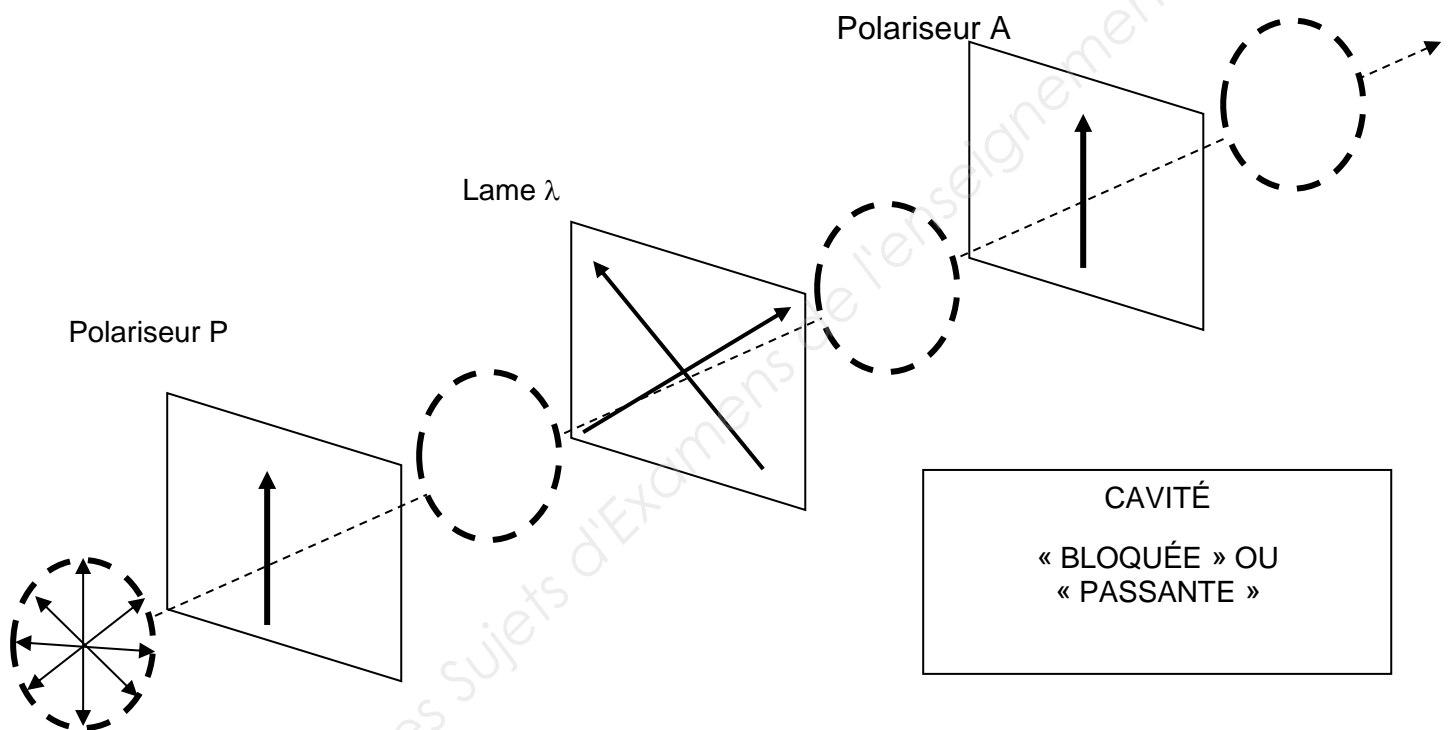
## PARTIE 1

### Réponses à la question 1.7.

#### 2<sup>nd</sup> cas.

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

Système intra-cavité équivalent à une lame d'onde



BTS Systèmes photoniques	Code épreuve : SH41PEM P	SESSION 2017
E41 - PRE-ETUDE ET MODELISATION D'UN SYSTEME OPTIQUE	Coef 2 - Durée 2,5h	Page 16 sur 16