

BREVET DE TECHNICIEN SUPÉRIEUR SYSTÈMES PHOTONIQUES
--

ÉPREUVE E4 : ÉTUDE D'UN SYSTÈME OPTIQUE
**SOUS-ÉPREUVE E42 : Conception et industrialisation d'un
système optique**

SESSION 2020

Coefficient 2 – Durée 3 heures

Aucun document autorisé - L'usage de la calculatrice avec mode examen actif est autorisé. L'usage de la calculatrice sans mémoire, « type collègue » est autorisé.

Constitution du sujet :

- **Dossier Sujet** (mise en situation et questions à traiter par le candidat)
 - **Mise en situation** Page 2
 - **PARTIE 1** Pages 3 à 6
 - **PARTIE 2** Pages 6 à 9
- **Documents Techniques**.....Pages 10 à 14
- **Documents Réponses à rendre avec la copie**..... Pages 15 à 16

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

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

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

Le sujet se compose de 16 pages, numérotées de 1/16 à 16/16.

BTS Systèmes photoniques	Épreuve écrite E42	SESSION 2020
Conception et industrialisation d'un système optique	Code :	Page 1 / 16

Mise en situation (Lecture conseillée 5 min)

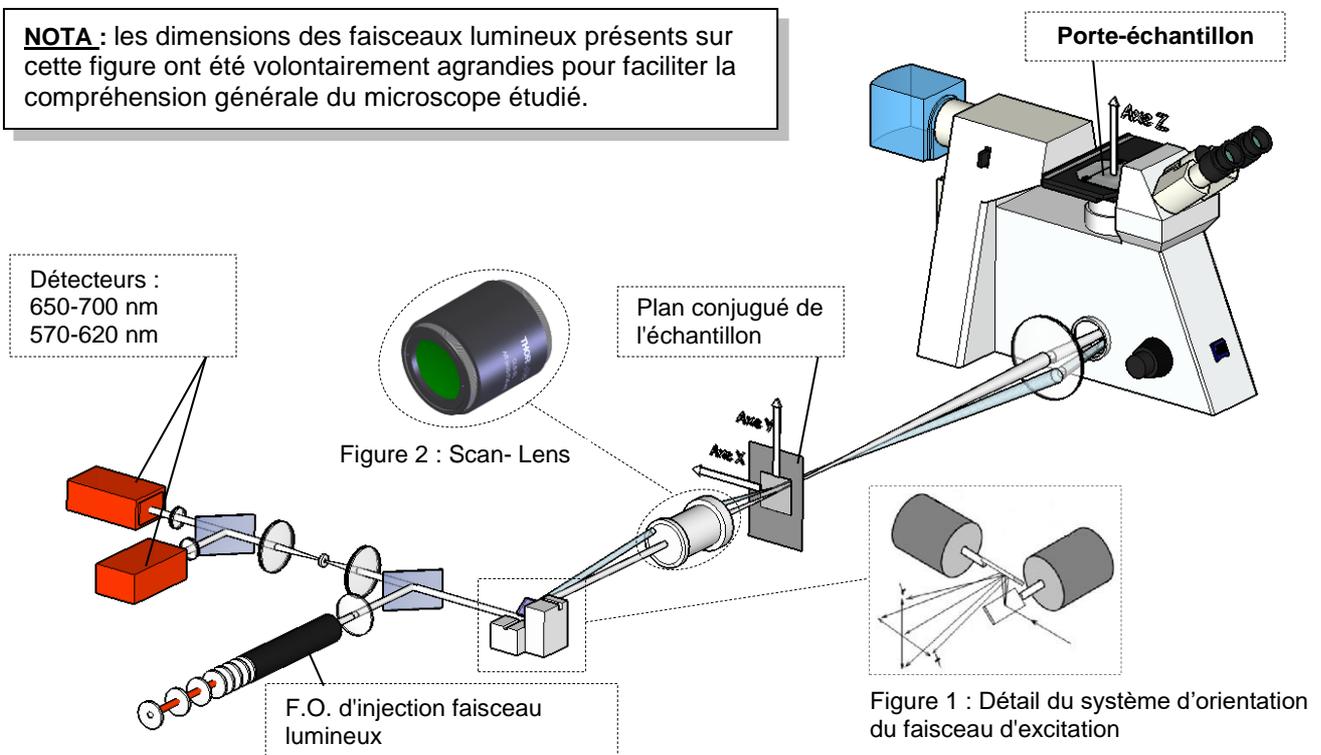
Présentation : Le système étudié est un microscope confocal à détection de photons uniques. L'échantillon à imager est typiquement constitué de macromolécules biologiques.

Le process d'imagerie par fluorescence permet d'obtenir des informations sur leurs formes (aspect structurel) et sur la mobilité de ces macromolécules en marquant des protéines avec des fluorophores spécifiques. Une impulsion laser va exciter la macromolécule qui va ensuite se désexciter en émettant des photons.

En ayant accès aux temps de fluorescence, on peut également obtenir des informations sur les interactions intermoléculaires.

L'échantillon pour lequel on souhaite obtenir une représentation 3D est placé dans un porte-échantillon dont la position en Z est obtenue par un déplacement mécanique manuel. Pour obtenir l'image d'une coupe de l'échantillon en position Z, un scan (X,Y) est effectué dans des conditions de cinématique paramétrées par des logiciels d'acquisition et de pilotage de matériels spécifiques (voir les figures ci-dessous).

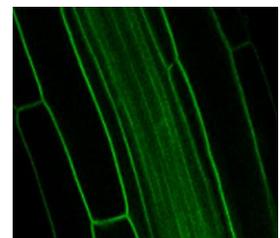
NOTA : les dimensions des faisceaux lumineux présents sur cette figure ont été volontairement agrandies pour faciliter la compréhension générale du microscope étudié.



Pour obtenir des images 3D de l'échantillon (exemple sur figure 3), une adaptation sur une base de microscope Axio Observer A1 de la marque ZEISS a été conçue et réalisée dans un centre de recherche en biochimie structurale par une équipe d'enseignants-chercheurs.

Figure 3 : localisation de protéines (PIP2) sur un extrait de plante

- **La partie 1** concernera l'étude de l'orientation du faisceau d'excitation vers la scan-lens (figures 1 et 2 ci-dessus), du balayage du plan conjugué de l'échantillon ainsi que la vérification des limites de résolution de ce système et du temps d'obturation à obtenir pour le faisceau d'excitation.
- **La partie 2** est relative au comptage de photons uniques issus de la désexcitation et à la durée pendant laquelle la molécule est excitée (intervalle de temps entre l'émission du pulse laser qui va exciter la molécule et l'émission du photon).



BTS Systèmes photoniques	Épreuve écrite E42	SESSION 2020
Conception et industrialisation d'un système optique	Code :	Page 2 / 16

Travail demandé

PARTIE 1 (Durée conseillée 1h10 min)

La plupart des microscopes confocaux à technologie par fluorescence du marché ont des prix au-delà de plusieurs centaines de k€ (kiloeuro).

Le centre de recherche concepteur de ce microscope offre la possibilité à des biochimistes de se servir de ce matériel en partage : réservation d'un créneau horaire, formation logicielle et aide à l'interprétation des résultats, aide à la mise en place matérielle des macromolécules à imager et du matériel spécifique du site etc...

Question 1.1 | On considérera que la taille de la surface totale à scanner sur l'échantillon est de **80 µm par 80 µm**.
DT1 | **Indiquer** la taille apparente maximale de l'échantillon pouvant être imagé.

Pour permettre d'orienter le faisceau d'excitation sur la surface d'entrée de la scan-lens, deux miroirs sont utilisés (figure 3).

Après conditionnement de ce faisceau par la scan-lens, le point focal M du faisceau (voir DT2) est situé sur la surface du plan focal de sortie associé à la lentille appelé plan conjugué de l'échantillon.

Données d'étude : le faisceau de référence correspond à un tir du faisceau d'excitation au point $X = 0$ et $Y = 0$ de l'échantillon, soit au point $X = 0$ et $Y = 0$ du plan focal.

Il est rappelé que la lentille-scan est équivalente à une lentille convergente mince de focale **$f' = 70$ mm**.

Une fois conditionné par les orientations des deux miroirs, le faisceau sera nommé "faisceau dévié".

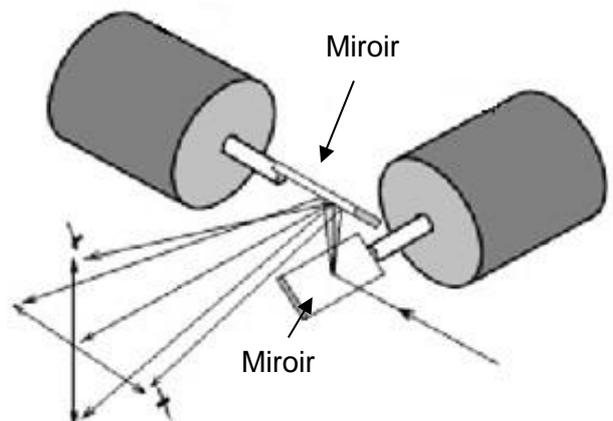


Figure 3 : miroirs d'orientation

Question 1.2 | **Préciser** sur la figure 1 (DR1), en complétant les mentions "miroir X" et "miroir Y", le miroir qui permet le balayage surfacique de l'échantillon en X et celui qui permet en Y. Vous pourrez vous aider de la figure générale fournie en page de présentation.
DT2, DR1

BTS Systèmes photoniques	Épreuve écrite E42	SESSION 2020
Conception et industrialisation d'un système optique	Code :	Page 3 / 16

Pour les questions 1.3 à 1.6, seule l'orientation en X (et donc seul le miroir le permettant) du faisceau dévié est à étudier. On cherchera par une étude géométrique la valeur du débattement angulaire maximal du faisceau dévié

Question 1.3 | **Compléter** la figure 2 (DR1) en y amenant les dimensions qui manquent (cadres à remplir). Vous préciserez l'unité.
 DT2, DR1

Pour cela, vous vous aiderez des spécifications dimensionnelles de la lentille-scan (DT2).

Question 1.4 | **Tracer et compléter sur** la figure 2 (DR1) :
 DR1

- L'axe X ;
- Le point O centre géométrique de la lentille-scan (en représentant au mieux sa position sur le tracé du faisceau de référence) ;

Indiquer la hauteur en [μm] notée h du point M lorsque celui-ci se trouve en bord de champ par rapport au faisceau de référence sachant que :

"Au plan focal, la position en X du point focalisé par rapport à la position de référence est 150 fois celle de la valeur de position en X du point réellement excité dans l'échantillon".

Question 1.5 | **Etablir la formule** qui donne l'angle [en radian] du positionnement du faisceau dévié par rapport au faisceau de référence après la réflexion sur le miroir X. Cet angle sera noté α .

Question 1.6 | **Justifier** que l'angle de rotation θ du rotor du moteur galvanométrique qui assure le déplacement sur X doit être de la moitié de cet angle α . Vous pourrez justifier votre réponse en utilisant un schéma explicatif.

Les miroirs galvanométriques sont commandés par un microcontrôleur par l'intermédiaire d'un système d'adaptation décrit sur le schéma fonctionnel suivant.

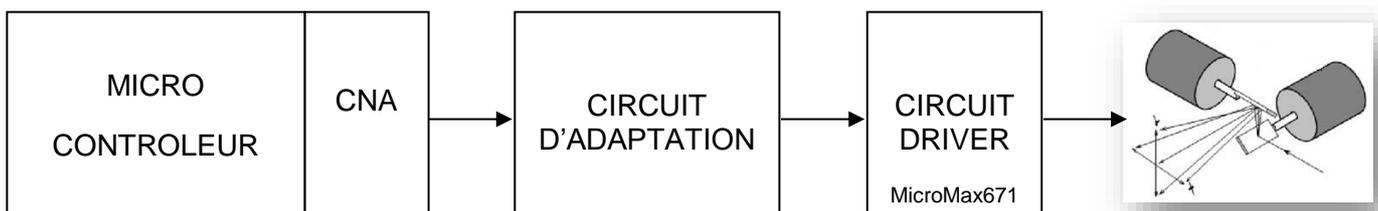


Figure 4 : Schéma fonctionnel

BTS Systèmes photoniques	Épreuve écrite E42	SESSION 2020
Conception et industrialisation d'un système optique	Code :	Page 4 / 16

On considérera que la taille de la surface totale à scanner sur l'échantillon est de **80 µm par 80 µm.**

Les mouvements de rotation des miroirs permettront de balayer l'échantillon point par point (pixel par pixel) avec une résolution souhaitée de 3 nm dans le plan horizontal de l'échantillon.

Les miroirs galvanométriques sont connectés à un circuit spécialisé, le driver MicroMax671, qui fournit l'énergie nécessaire au déplacement précis et régulier des miroirs. Ce driver reçoit en entrée le signal issu du circuit d'adaptation. Il permet d'adapter la dynamique de sortie du CNA (Convertisseur Numérique/Analogique) interne au microcontrôleur à la dynamique d'entrée du driver. Le microcontrôleur est programmé pour contrôler la rotation des miroirs (sens et amplitude du déplacement).

Question 1.7 | **Rechercher** la dynamique d'entrée du circuit driver MicroMax 671.

DT4

Les miroirs galvanométriques permettent un déplacement du faisceau laser sur l'échantillon de 4 µm / V.

Question 1.8 | **Déterminer** la surface d'échantillon que pourrait balayer ce système de miroirs.

Valider la conformité vis-à-vis de la taille de l'échantillon à balayer.

Question 1.9 | **Déterminer** le quantum du CNA utilisé sur la carte microcontrôleur sachant que la tension de référence est fixée à 3V.

DT4

Question 1.10 | **En déduire** la résolution du système galvanométrique sur le déplacement du faisceau.

Justifier la conformité par rapport à la résolution attendue.

Le circuit d'adaptation permettant d'adapter le signal fourni par le microcontrôleur à la commande des miroirs galvanométriques est donné ci-dessous :

BTS Systèmes photoniques	Épreuve écrite E42	SESSION 2020
Conception et industrialisation d'un système optique	Code :	Page 5 / 16

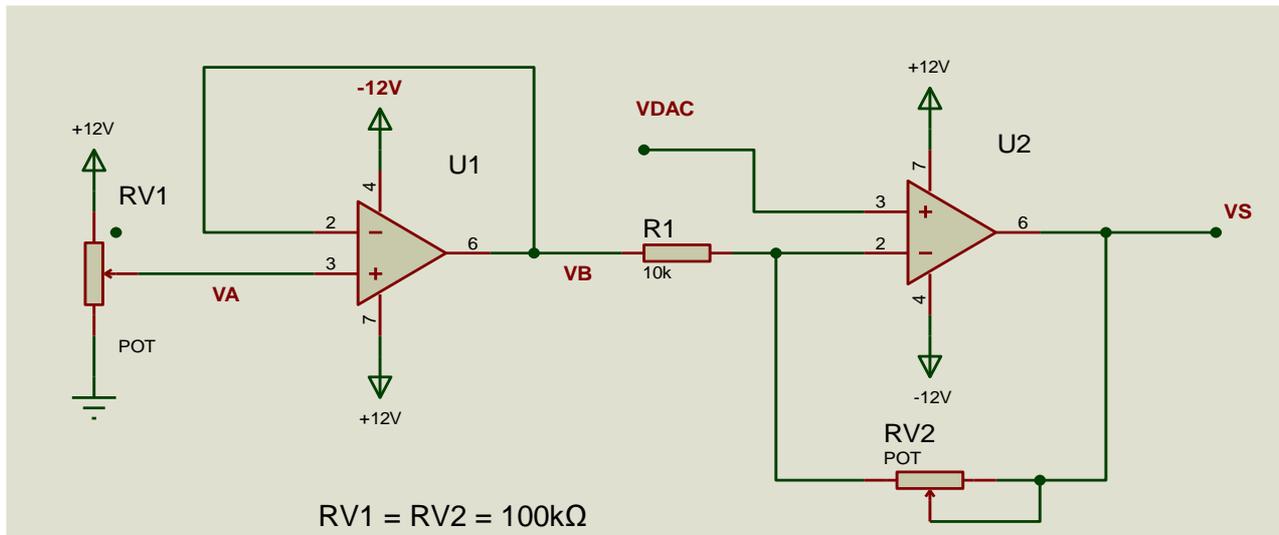
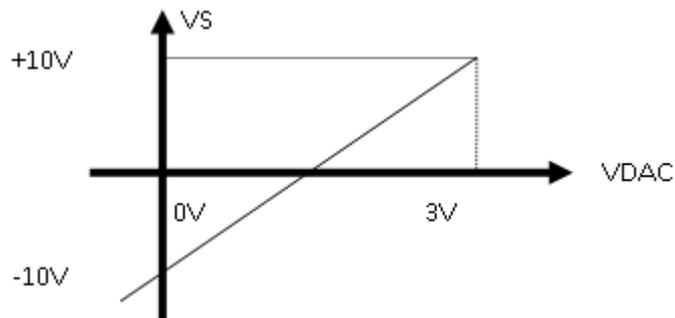


Figure 5 : Circuit d'adaptation

On souhaite élaborer un protocole de réglage du circuit d'adaptation pour obtenir la fonction de transfert suivante :



Question 1.11 | **Donner** la relation entre VA et VB en justifiant votre réponse.

Expliquer le rôle de ce montage.

Question 1.12 | **Donner** la relation de VS en fonction de VDAC et VB.

En déduire VA pour obtenir VS correspondant à VDAC = 0 V

Question 1.13 | **Calculer** la valeur RV2 à régler pour obtenir VS correspondant à VDAC = 3 V et VA = 1.76 V.

Question 1.14 | **Proposer** un protocole de réglage de cette carte électronique.

PARTIE 2 (Durée conseillée 1h45 min)

BTS Systèmes photoniques	Épreuve écrite E42	SESSION 2020
Conception et industrialisation d'un système optique	Code :	Page 6 / 16

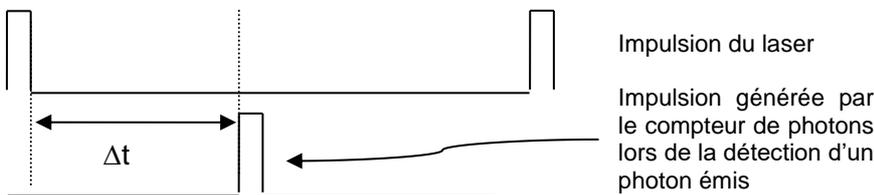
On s'intéresse maintenant à la partie réception, c'est-à-dire au comptage des photons émis après excitation.

La source laser utilisée est un laser blanc super-continuum impulsionnel dont les caractéristiques sont données dans le tableau suivant :

Spectre d'émission (nm)	Puissance moyenne totale	Puissance moyenne dans le visible	Densité spectrale dans le visible	Fréquence des impulsions	Durée des impulsions
400-2400	> 4 W	> 900 mW	> 2 mW/nm	40MHz	100 ps

Le laser envoie une impulsion qui va exciter la molécule à analyser, cette impulsion va déclencher simultanément la charge d'un condensateur. Le compteur de photons détecte un photon qui correspond à une émission due à la désexcitation de la macromolécule, il envoie alors une impulsion qui stoppe la charge du condensateur.

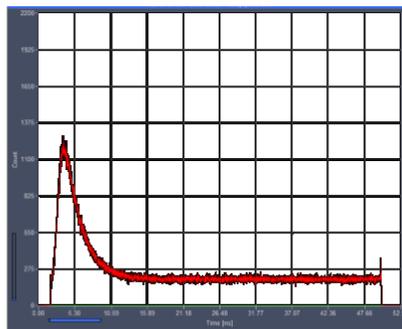
La tension aux bornes du condensateur est proportionnelle au temps de charge et est représentative de la proximité entre deux fluorophores.



Cette tension va être traitée par un microcontrôleur PIC18F2455 qui va assurer la conversion analogique numérique puis l'envoi à un PC pour l'affichage des résultats.

Figure 6 : Affichage

Nombre de photons reçus



Durée de vie (ns)

Question 2.1 | **Calculer** la durée qui sépare deux impulsions laser.

La commande de balayage et la capture du photon unique imposent une durée de traitement de 100 μ s par pixel.

BTS Systèmes photoniques	Épreuve écrite E42	SESSION 2020
Conception et industrialisation d'un système optique	Code :	Page 7 / 16

Question 2.2 | **Calculer** le nombre d'impulsions laser nécessaires pour exposer chaque pixel pendant 100 μ s.

On s'intéresse maintenant au traitement de la tension aux bornes du condensateur, celle-ci est convertie par le Convertisseur Analogique Numérique (CAN) du PIC 18F2455.

Ce convertisseur est paramétré par deux registres ADCON0 et ADCON1.

- ADCON0 est le registre qui permet de configurer le canal choisi pour la conversion et de lancer la conversion.
- ADCON1 configure les entrées / sorties et la tension de référence du convertisseur.

La tension aux bornes du condensateur est connectée sur l'entrée AN4, la conversion va se faire entre Vref- et Vref+.

Question 2.3 | **Compléter** le registre ADCON0 permettant de paramétrer la conversion.

DR2, DT5

Convertir le contenu de ce registre en hexadécimal.

Question 2.4 | Pour le registre ADCON1 :

DR2, DT5

Relever la plage d'adressage possible des bits PCFG3 à PCFG0 qui permet de connecter l'entrée analogique sur AN4. On utilisera la valeur haute de cette plage dans le document réponse DR2.

Donner les valeurs que doivent prendre bits VCFG1 et VCFG0.

Compléter alors la valeur du registre et la convertir en hexadécimal.

L'algorithme de paramétrage et de lecture du CAN est décrit ci-dessous :

DEBUT

- 1- Paramétrer les entrées de conversion et les tensions de références
- 2- Sélectionner l'entrée de conversion
- 3- Autoriser le fonctionnement du CAN
- 4- Démarrer la conversion
Attendre la fin de la conversion
- 5- Lire le résultat de la conversion

FIN

Question 2.5 | **Compléter** l'algorithme proposé.

DR2

Question 2.6 | **Calculer** le quantum de ce convertisseur pour Vref = 5 V

Calculer la tension mesurée pour un nombre converti à 614.

BTS Systèmes photoniques	Épreuve écrite E42	SESSION 2020
Conception et industrialisation d'un système optique	Code :	Page 8 / 16

On donne le rapport entre la durée de vie Δt du photon émis et la tension mesurée aux bornes du condensateur U_{cond} : $\Delta t \text{ (s)} = 4.10^{-9} \times U_{cond} \text{ (V)}$.

Question 2.7 | **Calculer** le temps Δt correspondant à la valeur numérique 614.

Question 2.8 | **Conclure** sur la compatibilité du système pour mesurer cette grandeur Δt et la valeur maximale mesurable par ce convertisseur CAN.

Dans le but de prolonger la durée de vie de la macromolécule lors des différents scannings, on envisage d'ajouter un dispositif supplémentaire qui coupe le faisceau à intervalles réguliers (dispositif de **shutter**). De plus, le temps d'illumination de l'échantillon par le faisceau laser d'excitation doit être minimisé.

Question 2.9 | **Choisir** (possibilités A, B C ou D sur DR1).

DR1 | **Justifier** la position optimale à donner à ce shutter dans le chemin optique.

Sur le Document Technique DT3 figurent deux vues du shutter ouvert et fermé. Chacune des lames (numérotée 1) participant à la fermeture de ce dispositif est en liaison rotation avec le corps principal (2) du shutter. Le centre de rotation d'une des lames est à une distance de 15 mm du centre de l'ouverture.

La vitesse de rotation $\omega_{1/2}$ est de $84,5 \text{ rad.s}^{-1}$ en phase de fermeture.

Question 2.10 | **Déterminer** la vitesse linéaire "V" du point d'une lame situé à 15 mm du centre de rotation.
DT3

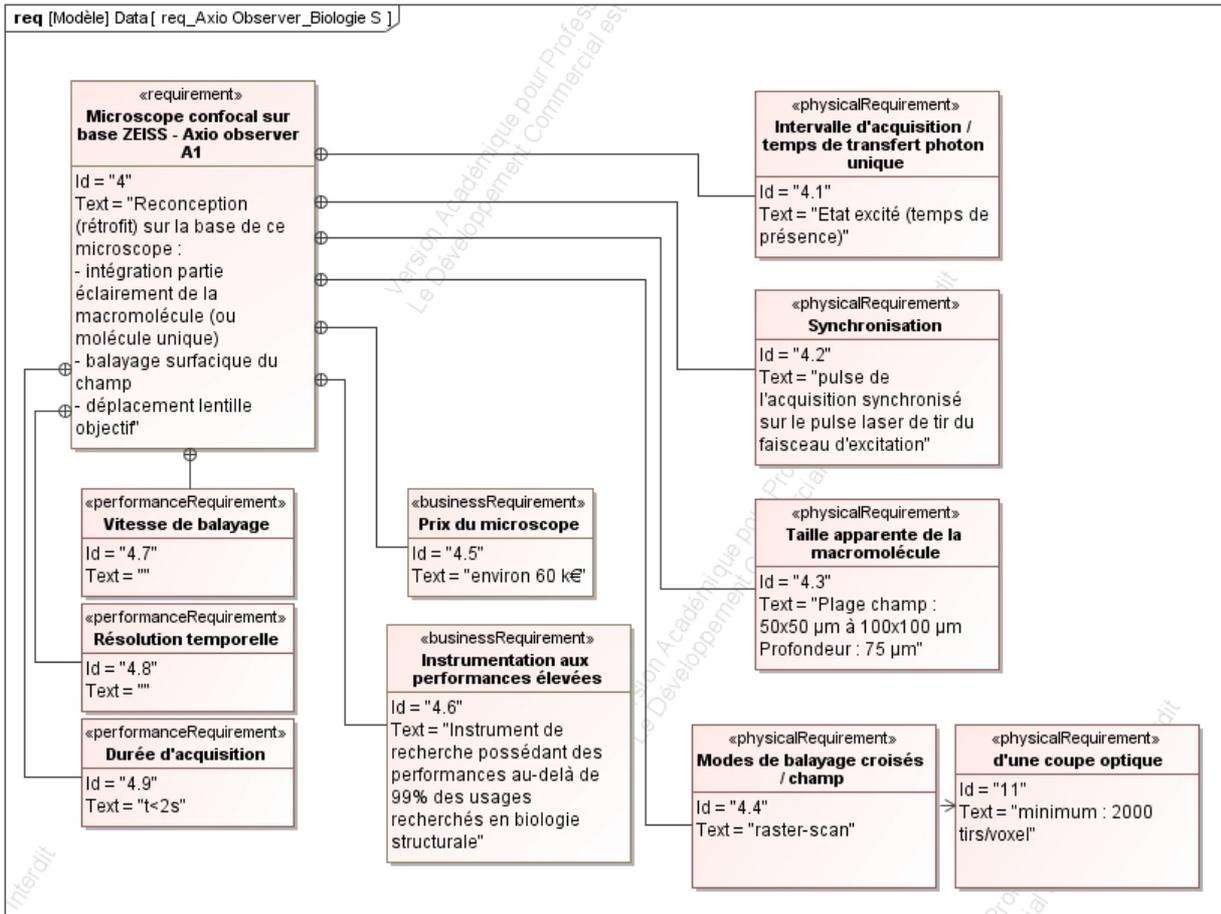
Question 2.11 | **Calculer** la distance "d" en [mm] que doit parcourir ce point pour obtenir la fermeture du shutter, compte tenu de la remarque technique concernant le "recouvrement" entre lames.
DT3

Question 2.12 | **En déduire** le temps d'obturation "t" à partir des calculs précédents.

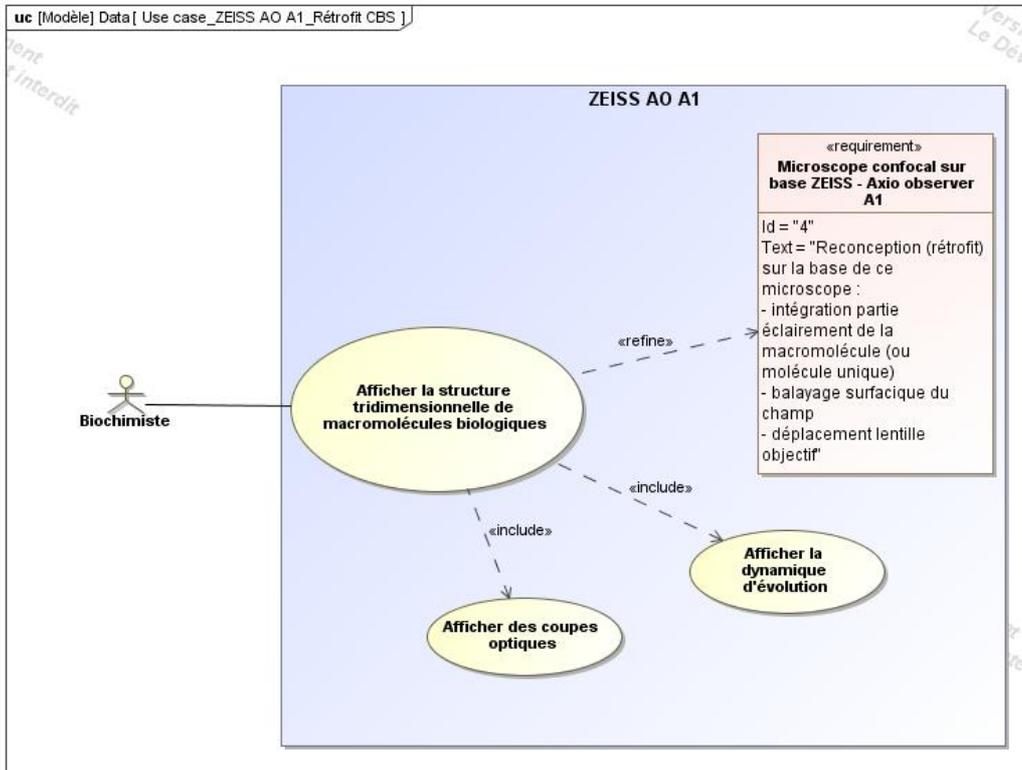
Question 2.13 | **Comparer** la valeur obtenue avec le temps d'obturation donné dans la documentation constructeur et conclure.
DT3

BTS Systèmes photoniques	Épreuve écrite E42	SESSION 2020
Conception et industrialisation d'un système optique	Code :	Page 9 / 16

DT1 : Eléments de fonctionnalité et d'exigences- Microscope confocal à détection de photons uniques

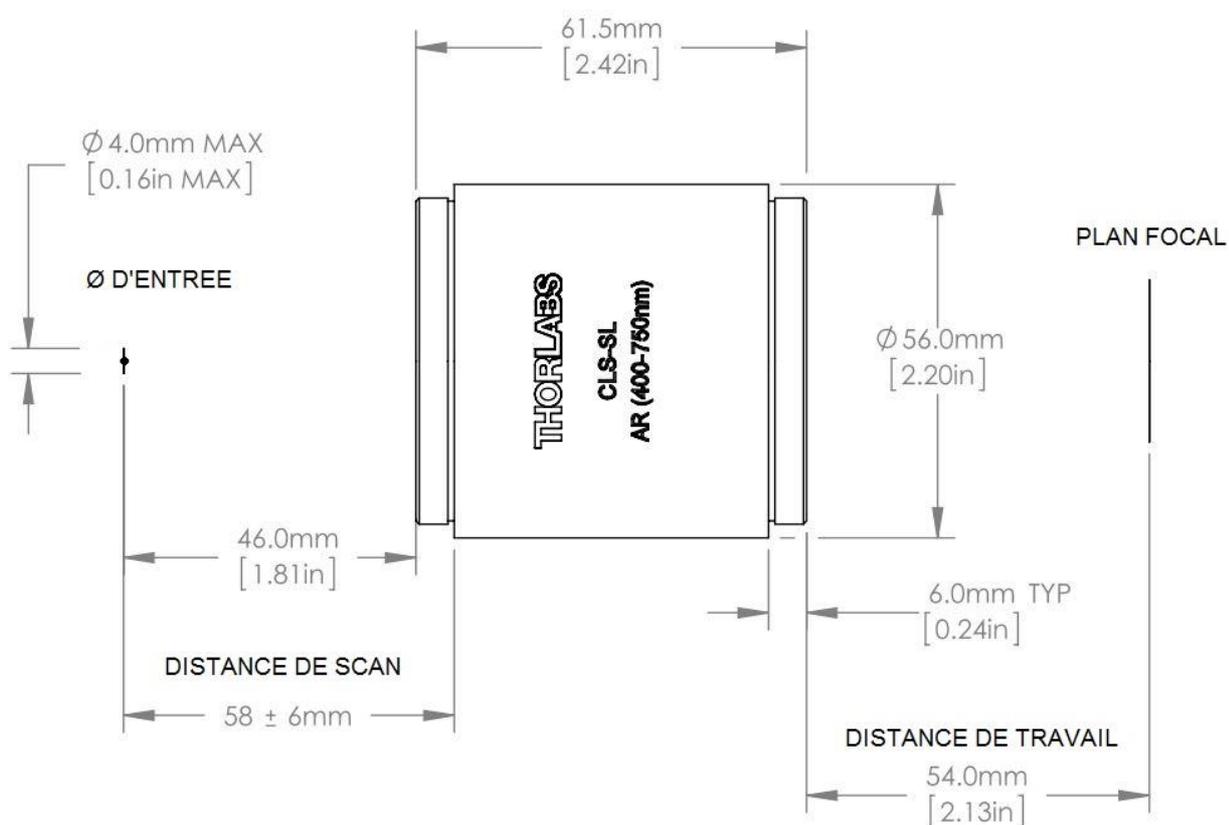


BTS Systèmes photoniques	Épreuve écrite E42	SESSION 2020
Conception et industrialisation d'un système optique	Code :	Page 10 / 16



BTS Systèmes photoniques	Épreuve écrite E42	SESSION 2020
Conception et industrialisation d'un système optique	Code :	Page 11 / 16

DT2 : Spécifications techniques - Scan-lens CLS - SL

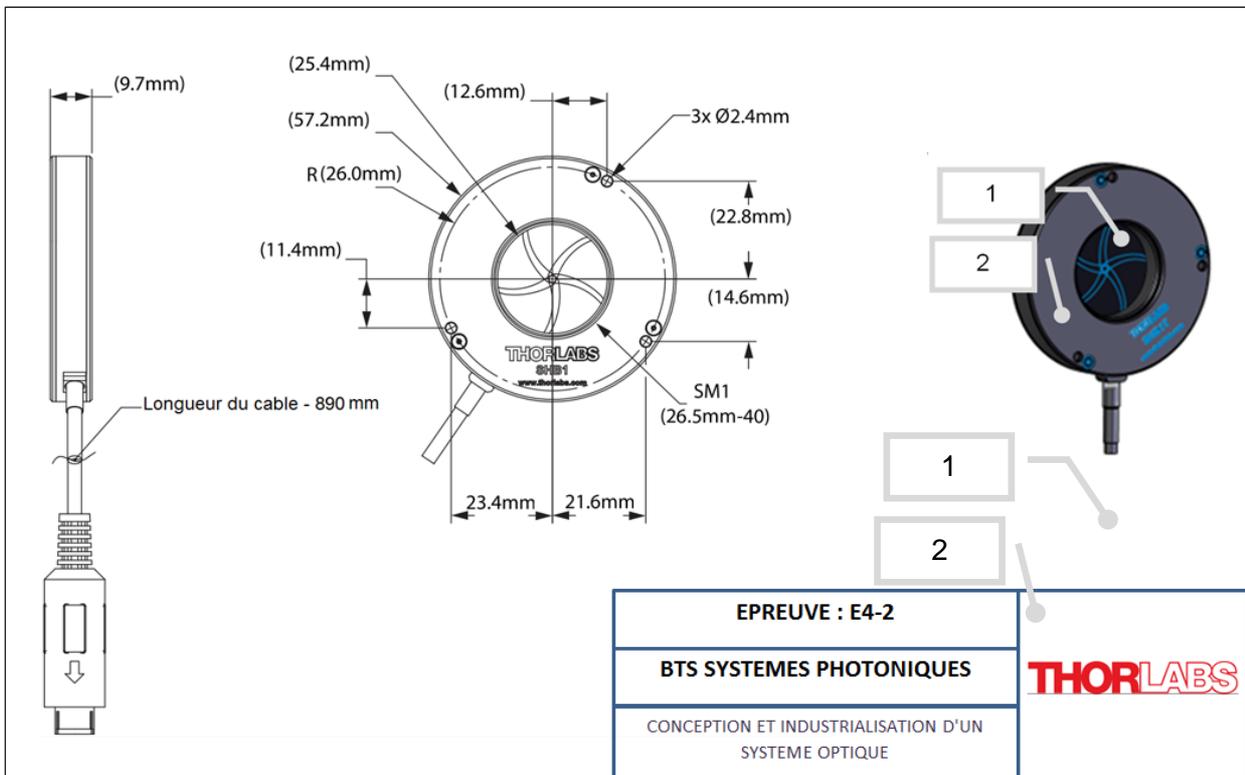


SPECIFICATIONS	
DISTANCE FOCALE EFFECTIVE	70.0 mm
DISTANCE DE TRAVAIL	54 mm
PLAGE DE LONGUEUR D'ONDE	400 - 750 nm
F#	17.5
Ø D'ENTREE DU FAISCEAU	4mm (MAX)

Extrait de documentation technique Thorlabs - Microscopie confocale / Lentille de scan CLS - SL

BTS Systèmes photoniques	Épreuve écrite E42	SESSION 2020
Conception et industrialisation d'un système optique	Code :	Page 12 / 16

DT3 : Document Shutter



Extraits documentation constructeur (Thorlabs)

Temps d'ouverture / obturation	9 - 10 ms
Nombre de cycle / seconde	15



a) shutter fermé



b) shutter ouvert

Indication technique :

les 5 lames obturent complètement le champ diamétral lorsqu'elles ont franchi 9/10ème du rayon de l'ouverture

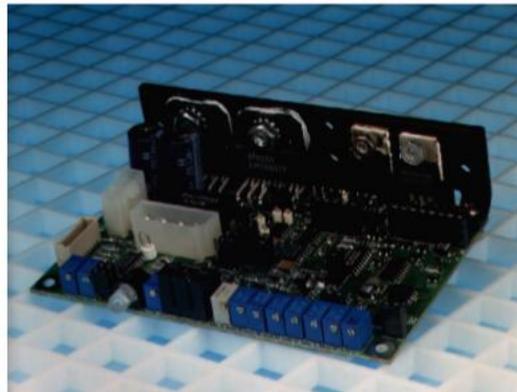
BTS Systèmes photoniques	Épreuve écrite E42	SESSION 2020
Conception et industrialisation d'un système optique	Code :	Page 13 / 16

The MicroMax[®] Model 671XX

Board Level Single Axis Driver Electronics

Architecture and Benefits

- **Microradian Level Accuracy And Maximum Frequency Response**
- **Flexible For Use With All Cambridge Technology Scanners**
- **Compact Size for Easy Integration**
- **Position, Error, and Velocity Output Signals**
- **Input Scale And Offset Adjustment**
- **Analog or Digital Input**
- **System Conditioning and Status Monitoring**



The MicroMax Model 671XX

General Specifications

All angles are in mechanical degrees. All specifications apply after a 1 minute warm up period.

Analog Input Impedance	200K +/- 1% ohms (Differential) 100K +/- 1% ohms (Single Ended)
Analog Output Impedance	1K +/- 1% ohms (for all other observation outputs)
Position Input Scale Factor	0.5 volt/mechanical degree (2 degrees/volt), other configurations available
Position Input Range	+/- 10 volts, maximum
Position Offset Range	+/- 2 volts
Digital Position Input Range	2 ¹⁶ dac counts
Non-Linearity of 16 Bit Digital Input	0.006% of full scale, maximum
Position Output Scale Factor	0.5 volt/degree
Error Output Scale Factor	0.5 volt/degree
Velocity Output Scale Factor	Analog output (scaled by position differentiator gain)
Fault Output	Open collector: 1K ohm output impedance (pulls down to -15V), with 10mA sink capability

Carte microcontrôleur Teensy



Spécifications :

- Processeur à 32 bits : ARM Cortex-M4 @ 72MHz
- Mémoires : 256 Ko Flash, 64 Ko de RAM et 2Ko de EEPROM
- 21 entrées analogiques haute résolution
- 34 broches d'entrées/sorties numériques
- 12 sorties MLI
- 1 sortie CNA 12 bits
- USB avec transfert DMA

BTS Systèmes photoniques	Épreuve écrite E42	SESSION 2020
Conception et industrialisation d'un système optique	Code :	Page 14 / 16

PIC18F2455/2550/4455/4550

21.0 10-BIT ANALOG-TO-DIGITAL CONVERTER (A/D) MODULE

The Analog-to-Digital (A/D) converter module has 10 inputs for the 28-pin devices and 13 for the 40/44-pin devices. This module allows conversion of an analog input signal to a corresponding 10-bit digital number.

The module has five registers:

- A/D Result High Register (ADRESH)
- A/D Result Low Register (ADRESL)
- A/D Control Register 0 (ADCON0)
- A/D Control Register 1 (ADCON1)
- A/D Control Register 2 (ADCON2)

The ADCON0 register, shown in Register 21-1, controls the operation of the A/D module. The ADCON1 register, shown in Register 21-2, configures the functions of the port pins. The ADCON2 register, shown in Register 21-3, configures the A/D clock source, programmed acquisition time and justification.

REGISTER 21-1: ADCON0: A/D CONTROL REGISTER 0

U-0	U-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0
—	—	CHS3	CHS2	CHS1	CHS0	GO/DONE	ADON
bit 7						bit 0	

- bit 7-6 **Unimplemented:** Read as '0'
- bit 5-2 **CHS3:CHS0:** Analog Channel Select bits
 - 0000 = Channel 0 (AN0)
 - 0001 = Channel 1 (AN1)
 - 0010 = Channel 2 (AN2)
 - 0011 = Channel 3 (AN3)
 - 0100 = Channel 4 (AN4)
 - 0101 = Channel 5 (AN5)^(1,2)
 - 0110 = Channel 6 (AN6)^(1,2)
 - 0111 = Channel 7 (AN7)^(1,2)
 - 1000 = Channel 8 (AN8)
 - 1001 = Channel 9 (AN9)
 - 1010 = Channel 10 (AN10)
 - 1011 = Channel 11 (AN11)
 - 1100 = Channel 12 (AN12)
 - 1101 = Unimplemented⁽²⁾
 - 1110 = Unimplemented⁽²⁾
 - 1111 = Unimplemented⁽²⁾
- bit 1 **GO/DONE:** A/D Conversion Status bit
 - When ADON = 1:
 - 1 = A/D conversion in progress
 - 0 = A/D Idle
- bit 0 **ADON:** A/D On bit
 - 1 = A/D converter module is enabled
 - 0 = A/D converter module is disabled

REGISTER 21-2: ADCON1: A/D CONTROL REGISTER 1

U-0	U-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0 ⁽¹⁾	R/W ⁽¹⁾	R/W ⁽¹⁾	R/W ⁽¹⁾
—	—	VCFG1	VCFG0	PCFG3	PCFG2	PCFG1	PCFG0
bit 7							bit 0

bit 7-6 **Unimplemented:** Read as '0'

bit 5 **VCFG1:** Voltage Reference Configuration bit (VREF- source)
1 = VREF- (AN2)
0 = VSS

bit 4 **VCFG0:** Voltage Reference Configuration bit (VREF+ source)
1 = VREF+ (AN3)
0 = VDD

bit 3-0 **PCFG3:PCFG0:** A/D Port Configuration Control bits:

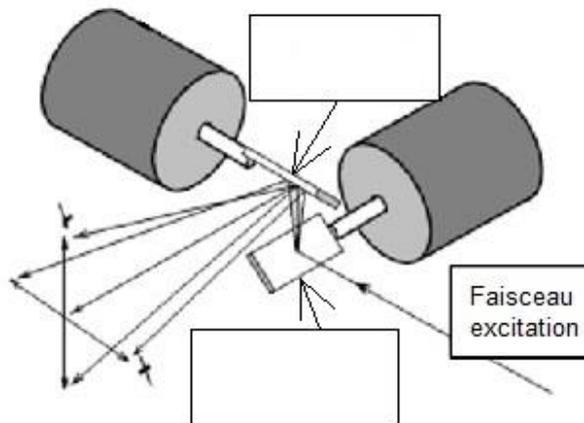
PCFG3: PCFG0	AN12	AN11	AN10	AN9	AN8	AN7 ⁽²⁾	AN6 ⁽²⁾	AN5 ⁽²⁾	AN4	AN3	AN2	AN1	AN0
0000 ⁽¹⁾	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
0001	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
0010	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
0011	D	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
0100	D	D	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
0101	D	D	D	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
0110	D	D	D	D	A	A	A	A	A	A	A	A	A
0111 ⁽¹⁾	D	D	D	D	D	A	A	A	A	A	A	A	A
1000	D	D	D	D	D	D	A	A	A	A	A	A	A
1001	D	D	D	D	D	D	D	A	A	A	A	A	A
1010	D	D	D	D	D	D	D	D	A	A	A	A	A
1011	D	D	D	D	D	D	D	D	D	A	A	A	A
1100	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	A	A	A
1101	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	A	A
1110	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	A
1111	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D

A = Analog input D = Digital I/O

DOCUMENT RÉPONSES DR1

Réponse à la question 1.2 :

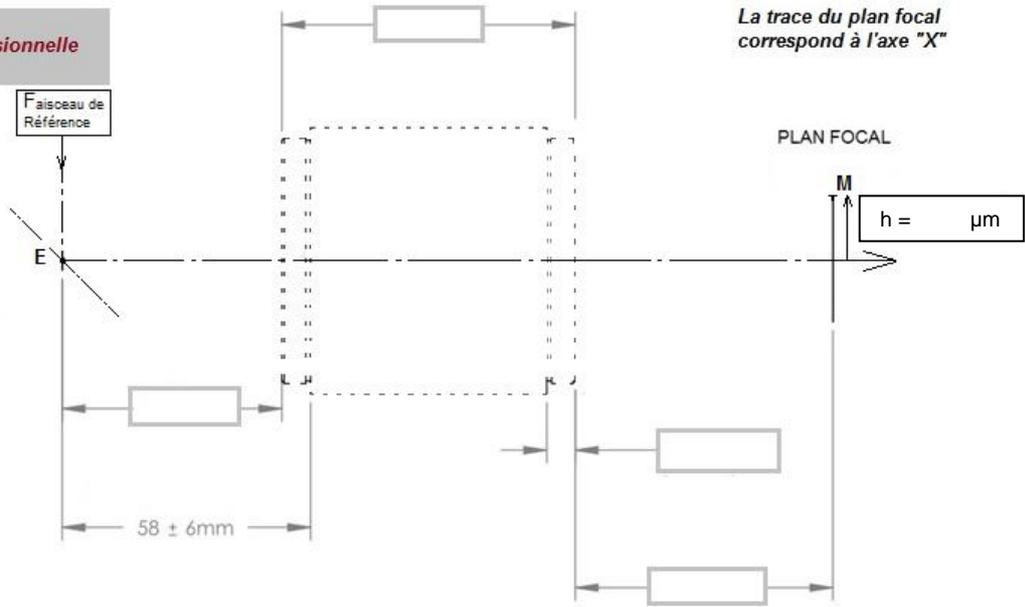
figure 1



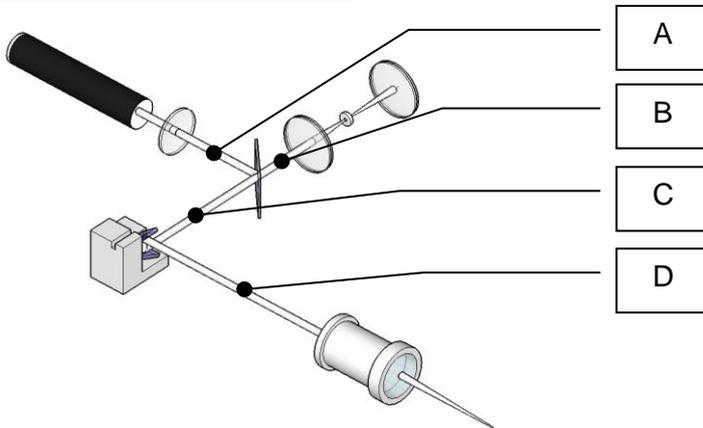
Réponse aux questions 1.3 et 1.4 :

figure 2

Figure n°2
Echelle dimensionnelle
non respectée



Réponse à la question 2.9



DOCUMENT RÉPONSES DR2

Réponse à la question 2.3 :

ADCON0

	6	5	4	3	2	1	0
-	-	CHS3	CHS2	CHS1	CHS0	GO/DONE	ADON
0	0						

Réponse à la question 2.4 :

ADCON1

7	6	5	4	3	2	1	0
-	-	VCFG0	VCFG0	PCFG3	PCFG2	PCFG1	PCFG0
0	0			1	0	1	

Réponse à la question 2.5 :

