

Fiche pédagogique

SPECTROGRAPHE A CAPTEUR CCD

Niveau :

1^{ère} année de BTS systèmes photoniques.

Objectifs :

En possession des documents et des informations techniques complémentaires nécessaires, l'élève doit être capable de mettre en œuvre un système de mesure de longueur d'onde

- Compétence C1.5 : Simuler et valider les solutions techniques
- Compétence C3.2 : Valider un système
- Compétence C2.3 : Régler le système
- Compétences C3.1: Mettre en œuvre un système optique.

Forme :

TP de 6 heures, par binôme ou trinôme.

Pré-requis :

- Lecture de dossiers ressources.
- Connaissance en mathématiques, optique, mécanique et informatique.

Méthode :

On donne :

- Un sujet de T.P.,
- Un dossier technique.
- Les logiciels associés au TP
- Tout le matériel nécessaire à la mise en œuvre du système.

On demande :

- De faire l'analyse fonctionnelle du système.
- De mettre en œuvre le système.
- D'analyser les performances du système.

On évalue :

- La compréhension du principe de fonctionnement d'un spectromètre à capteur CCD.
- La mise en œuvre du système.
- L'analyse des résultats obtenus lors de la mise œuvre du système.
- L'attitude, l'autonomie.
- Le résultat obtenu
- Le respect des règles de sécurité
- La présentation du compte rendu.

SPECTROGRAPHE À CAPTEUR CCD

1. Éléments à votre disposition

1.1 Matériel

Voir cadre 1

1.2 Documentation

Voir cadre 2

1.3 Logiciels

Voir cadre 3

<i>Liste du matériel</i>
<i>Lampes à vapeur de Hg-Cd, Na</i>
<i>Alimentation HT</i>
<i>Condenseur</i>
<i>Fente réglable</i>
<i>Lentilles convergentes (150mm, 200mm) grande ouverture</i>
<i>Prisme et support réglable</i>
<i>Diaphragme à iris</i>
<i>Ecran dépoli</i>
<i>Capteur CCD SONY ILX503</i>
<i>Alimentation stabilisée</i>
<i>Oscilloscope</i>
<i>Micro-ordinateur</i>
<i>Imprimante</i>

cadre 1

<i>Liste de la documentation</i>
<i>Dossier technique</i>

cadre 2

<i>Liste des logiciels</i>
<i>Ccd</i>
<i>Labview</i>
<i>Excel</i>

cadre 3

Problématique du TP

La société PIERRON spécialisée dans le matériel pour l'enseignement cherche à développer un spectromètre . Elle cherche à en évaluer les performances tant au niveau du domaine des longueurs d'ondes observables que de la résolution du système.

2. Présentation du contexte

Spectroscopie à fentes

Le paramètre le plus important qui caractérise un spectroscope est son **pouvoir de résolution** c'est à dire sa capacité à séparer deux longueurs d'onde très voisines. On distingue les spectroscopes interférentiels (Michelson, Fabry-Pérot) et les spectroscopes à fentes (à prisme ou réseau).

Nous étudierons un spectroscopie à fente (voir cadre 4) où l'élément dispersif sera un prisme en flint d'indice 1,620 (à 589,3 nm). La fente, de largeur e , constitue la source fortement éclairée par une lampe à vapeur de cadmium et un condenseur. On fera l'image de la fente sur un capteur CCD formé de 2048 pixels (distants de $\epsilon = 14 \mu\text{m}$ centre à centre) grâce à deux lentilles de part et d'autre du prisme, permettant une incidence en faisceau parallèle.

Le **pouvoir de résolution** de l'ensemble dépendra de la largeur e de la fente source, des dimensions ϵ des pixels, de la diffraction due aux limitations du faisceau incident sur le prisme, des aberrations des lentilles.

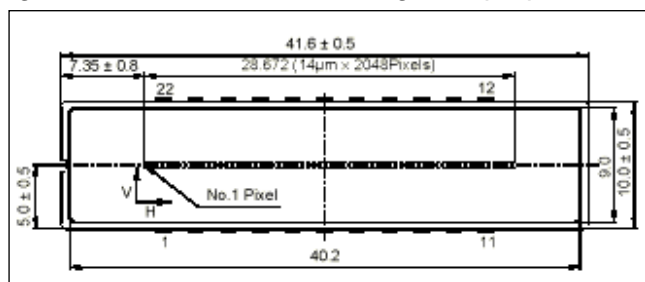
Barette CCD

Chaque pixel ("picture element") est une photodiode qui charge un condensateur. La charge est proportionnelle à l'éclairement reçu.

Les charges sont ensuite transférées en parallèle vers les registres de lecture grâce à l'horloge de passage (signal ROG: Read Out Gate pulse).

Une horloge de transfert (signal CLK) permet la conversion séquentielle des charges en tension.

Le temps d'intégration correspond au temps pendant lequel la barrette CCD est soumise à l'éclairement.



Cadre4: Capteur CCD.

Électronique associée au capteur ILX503

Le schéma de la maquette vous est donnée page 3 du dossier technique.

On utilisera le logiciel *Ccd* dont le raccourci est déposé sur le bureau. Ce logiciel permettra de faire l'acquisition de l'état logique (éclairé ou non) des pixels du capteur CCD ainsi que l'étalonnage en longueur d'onde pour l'analyse des différents spectres.

3. Analyse du système :

Connexion :

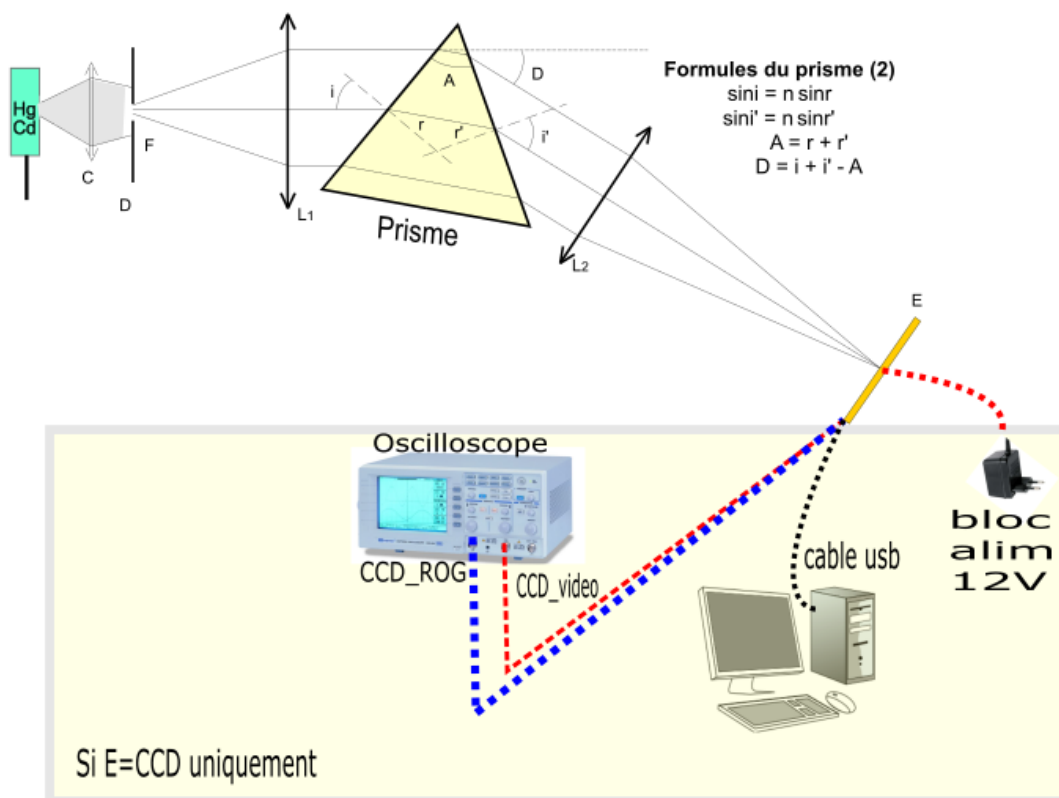
Connecter le boîtier électronique au port imprimante du micro-ordinateur.

Les différentes fonctions du logiciel seront décrites lors des acquisitions.

3.1. Principales caractéristiques

Rechercher dans le dossier technique les principales caractéristiques du capteur et de son électronique associée. (voir aussi cadre 5) :

- Nombre de pixels (utiles + aveugles)?
- À quoi sert le temps d'intégration dans un capteur CCD ?
- Quelle valeur théorique minimum peut prendre le temps d'intégration (on suppose que l'on connaît la fréquence f_0 de lecture des pixels et le nombre de pixels N) en fonction de f_0 et N ?
- Dans notre cas, la fréquence maximale de travail est de 5MHz. En déduire le temps d'intégration minimum.



- Hg-Cd: Lampe à vapeur de mercure-cadmium
- C: Condenseur
- F: Fente source
- L1: Lentille de focale 150mm
- L2: Lentille de focale 200mm
- E: **Ecran ou capteur CCD**

- A: angle du prisme (60°)
- I: angle d'incidence
- I': angle d'observation
- D: angle de déviation

cadre 5 : Principe du spectrographe à fente.

- Distance centre à centre en μm entre les pixels ?
- Longueur (notée d) de la partie active du capteur CCD ?

3.2. Principes fondamentaux : Spectrographe

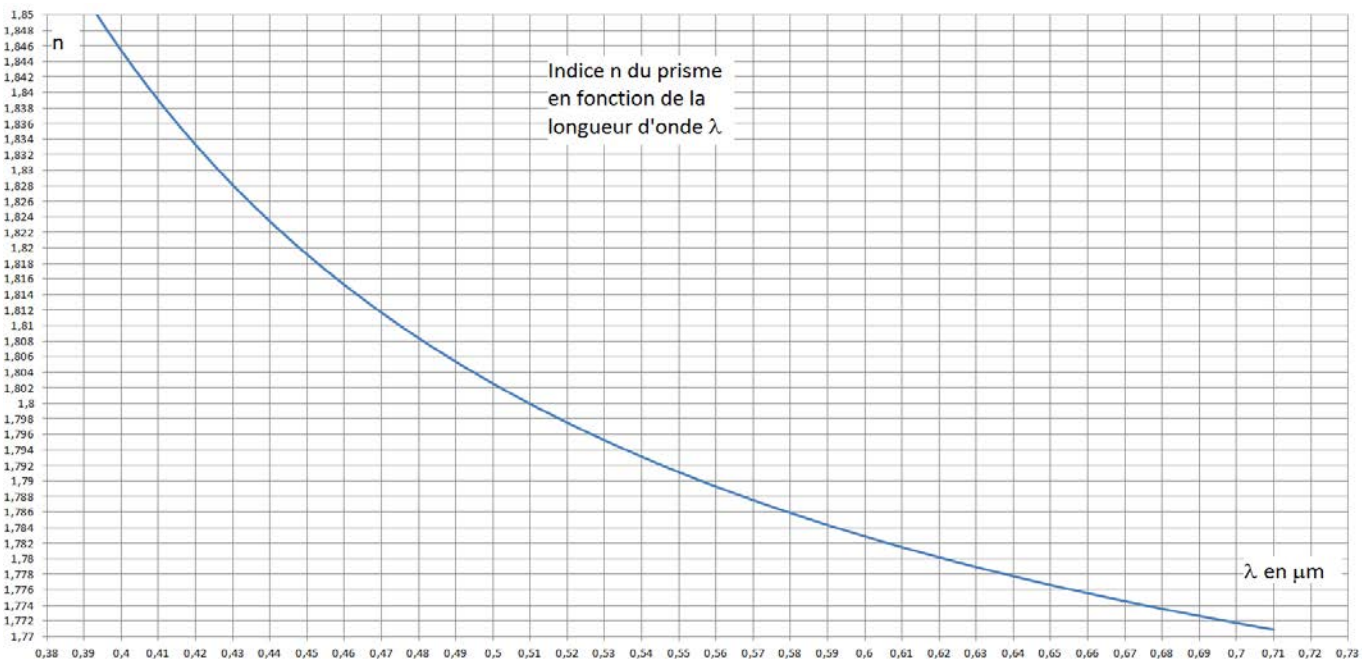
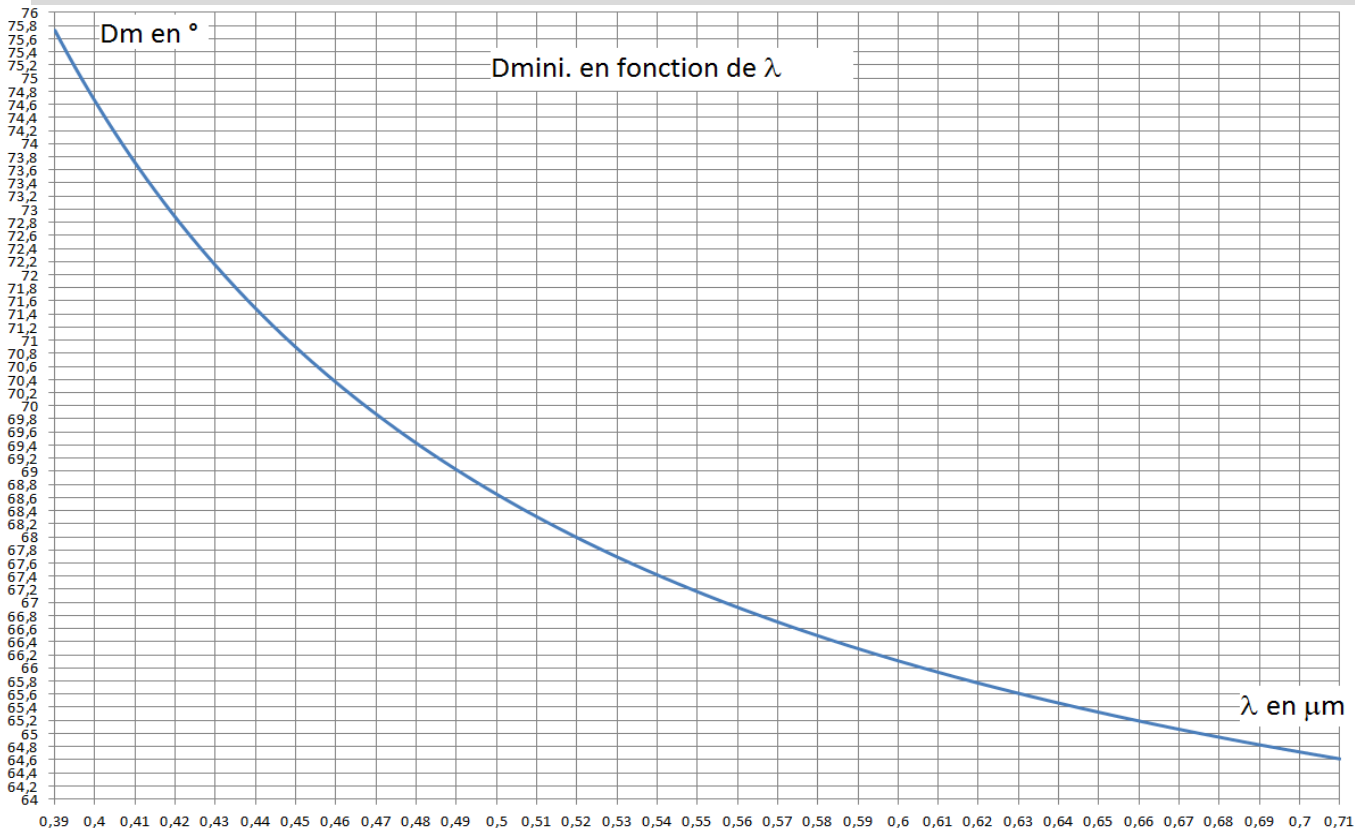
Le prisme d'angle A est utilisé au voisinage de la déviation minimum ($i \approx i'$).

La déviation est alors donnée par :

$$D_{\text{mini}} = 2 \sin^{-1} \left(n \sin \frac{A}{2} \right) - A \quad (1)$$

D_{mini} est donné dans la documentation courbe *Excel* ci-dessous en fonction de la longueur d'onde λ .

Dans la relation (1), λ n'apparaît pas explicitement, expliquer pourquoi la déviation D dépend pourtant de λ en vous aidant de la deuxième courbe ci-dessous ?

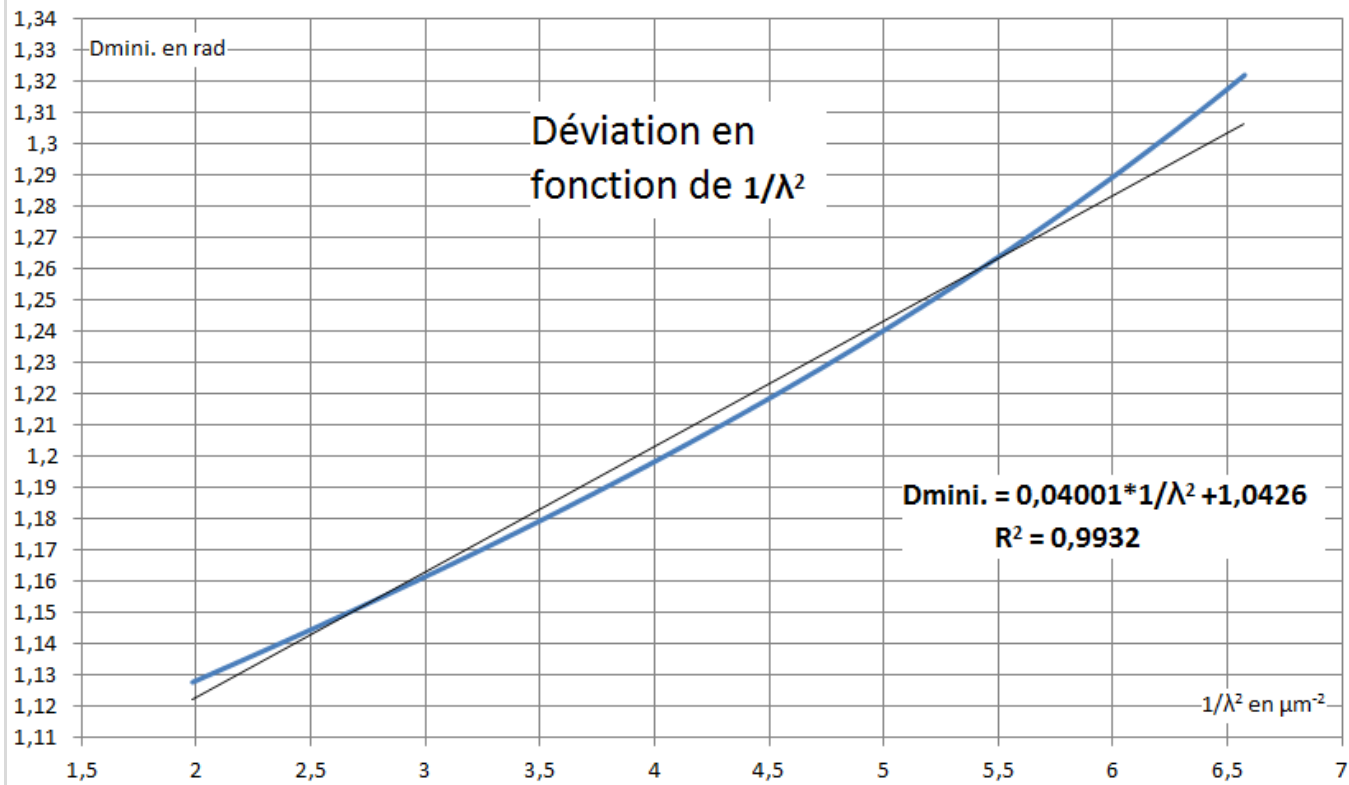


D'après les documents (la première courbe et des caractéristiques ci-dessous) la déviation est-elle une fonction affine de λ ? Est-elle une fonction affine de $1/\lambda^2$?

The refractive index of a glass in the wavelength range of 365 to 2300 nm can be calculated from the following formula	
$n = \left(\frac{B_1 \lambda^2}{\lambda^2 - C_1} + \frac{B_2 \lambda^2}{\lambda^2 - C_2} + \frac{B_3 \lambda^2}{\lambda^2 - C_3} + 1 \right)^{1/2}$	
Here λ , the wavelength, must be in μm , and the constants B_1 through C_3 are given by the manufacturer for each different glass. We have tabulated these constants for the glasses used in our catalog components in the table given on page 4-8. Values for other glasses can be obtained from the manufacturer's literature. This equation yields a value for index that is accurate to better than 1×10^{-5} over the entire transmission range, and even less in the visible spectrum.	
Melt-to-Melt Mean Index Tolerance	± 0.001
Homogeneity within Melt	$\pm 1 \times 10^{-4}$
Striae Grade (MIL-G-174-A)	A
Stress Birefringence, nm/cm, yellow light	10
Abbé Factor (v_d)	36.37
Constants of Dispersion Formula:	
B_1	1.34533359
B_2	$2.09073176 \times 10^{-1}$
B_3	$9.37357162 \times 10^{-1}$
C_1	$9.97743871 \times 10^{-3}$
C_2	$4.70450767 \times 10^{-2}$
C_3	1.11886764×10^2
Density (g/cm^{-3})	3.61

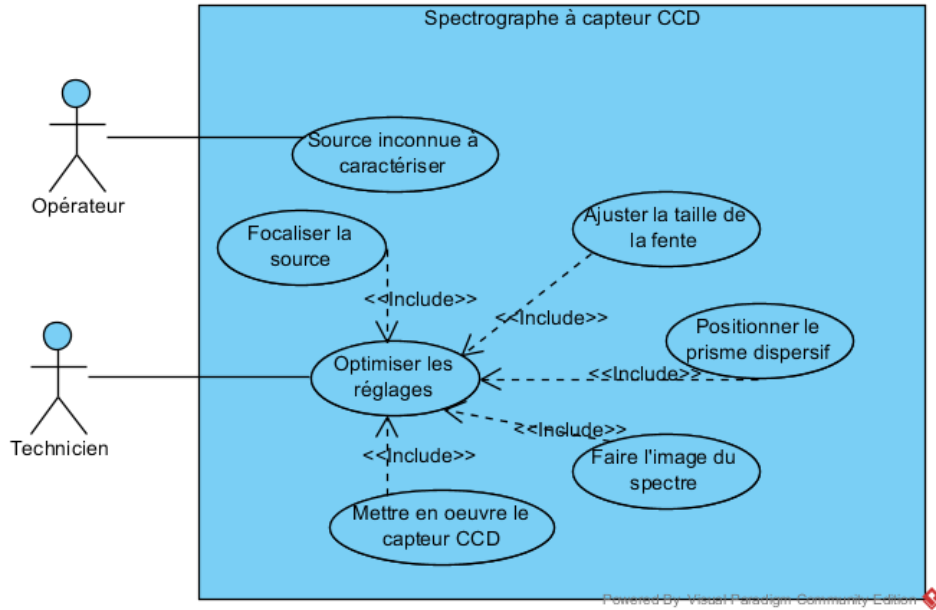
Pour simplifier, la loi de Cauchy qui donne l'indice n d'un verre en fonction de λ est généralement admise : $n = a + \frac{b}{\lambda^2}$.

Si on admet une loi semblable pour la déviation minimum : $D_{\text{mini}} = c + \frac{d}{\lambda^2}$, donner la valeur et l'unité des constantes c et d du graphe ci-dessous.

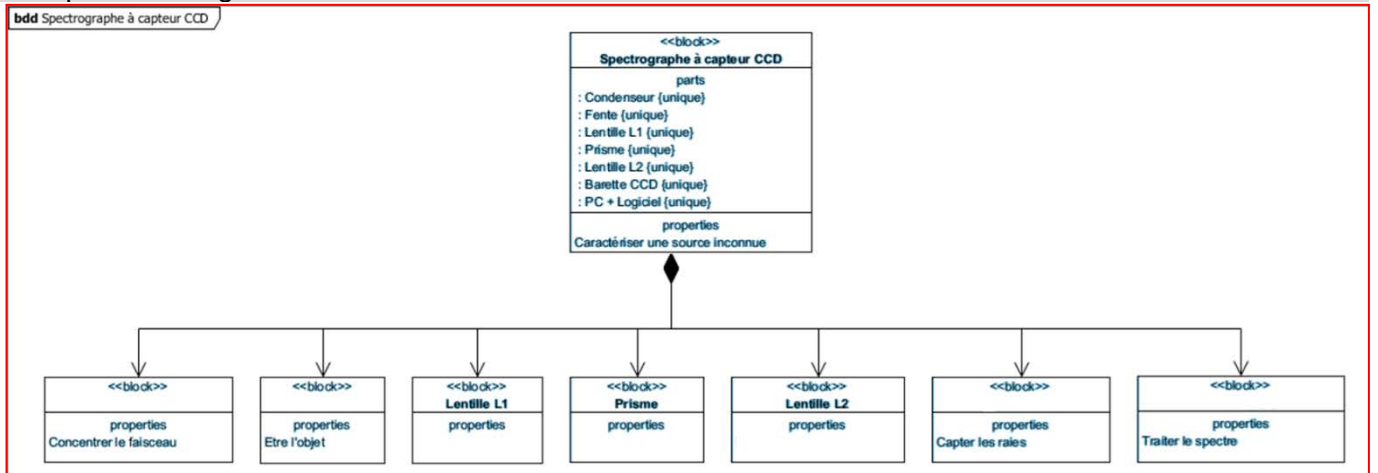


On s'intéresse aux radiations du domaine visible, du violet 405 nm au rouge 644 nm. Quelle sera en sortie de prisme l'écart angulaire α entre ces deux radiations extrêmes (1^{ière} courbe) ? On choisit la focale de la seconde lentille $f_2 = 300$ mm. Peut-on observer le spectre visible du violet au rouge sur toute la longueur active d du capteur ?

3.3. Analyse fonctionnelle



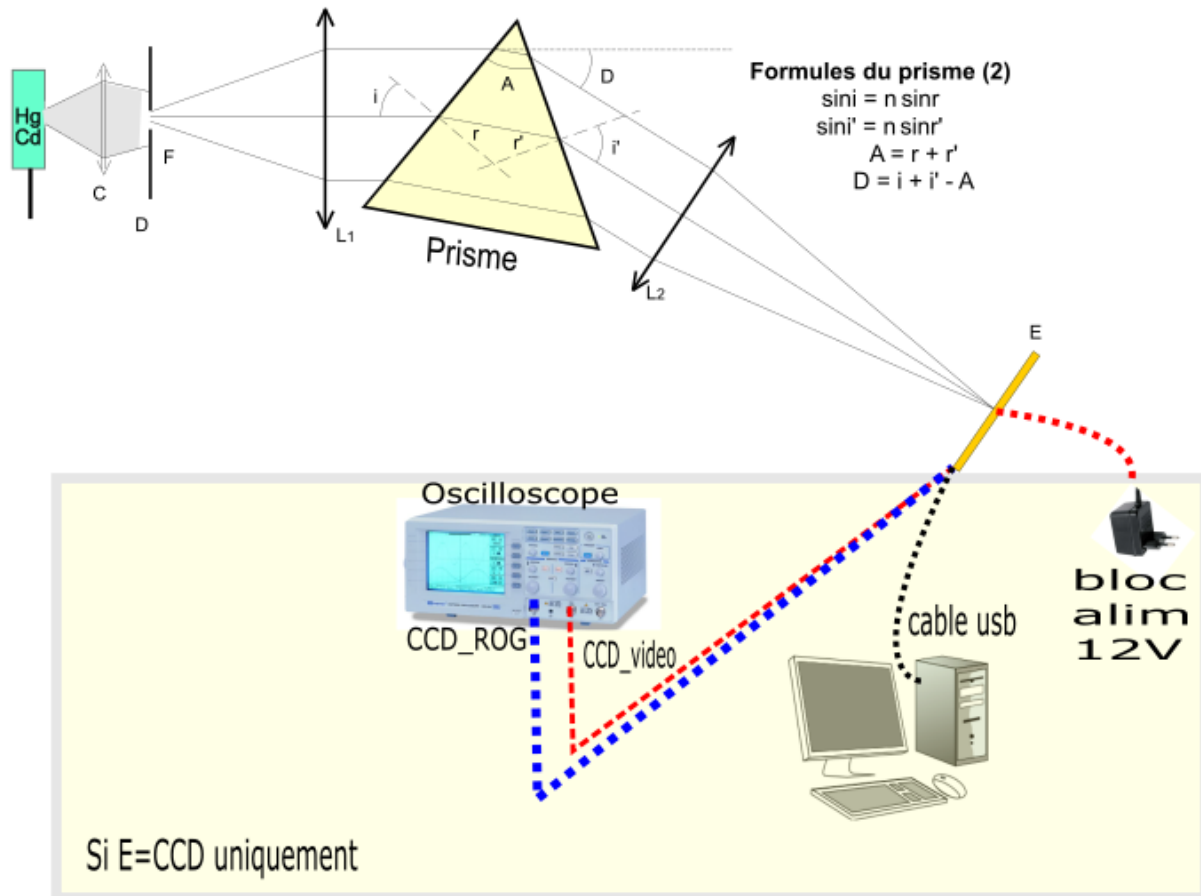
Compléter le diagramme de blocs ci-dessous :



4. Mise en œuvre du système

4.1. Montage optique

Réaliser le montage décrit ci-dessous avec une lampe à vapeur de cadmium et mercure.



Hg-Cd: Lampe à vapeur de mercure-cadmium

C: Condenseur

F: Fente source

L1: Lentille de focale 150mm

L2: Lentille de focale 200mm

E: **Ecran ou capteur CCD**

A: angle du prisme (60°)

I: angle d'incidence

I': angle d'observation

D: angle de déviation

Attention :

On veillera tout particulièrement à l'alignement des composants optiques et à utiliser les lentilles de façon à minimiser les aberrations.

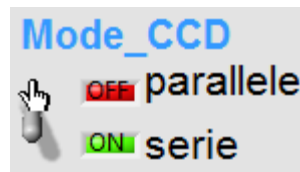
- L₁ fait une image à l'infini de la fente F.
- Le prisme disperse les différentes radiations composant la lumière incidente.
- L₂ réalise autant d'images de la fente dans son plan focal qu'il y a de radiations (couleurs) composantes.
- Affiner la netteté des images de la fente source sur un écran blanc.
- Ajuster le diaphragme I pour n'utiliser que le centre de L₂.
- Centrer le faisceau sur L₂.
- Placer l'écran E à la bonne distance
- **Tourner le prisme jusqu'au point de rebroussement.**

En faisant tourner le prisme, on observe un mouvement des raies dans un **sens puis** dans l'autre (on a atteint alors le point **de rebroussement**). **Placer vous au plus près** du point de rebroussement.

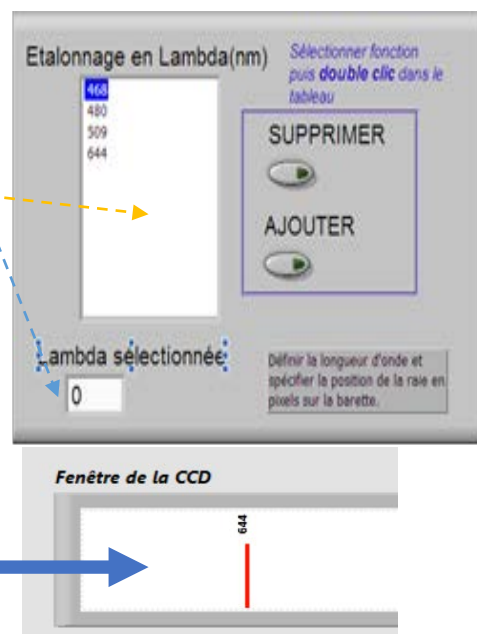
Montrer le montage à un professeur.

4.2. Mise en œuvre du CCD

- Remplacer l'écran E par le CCD linéaire. (brancher tous les éléments du montage)
- Faire en sorte que les 7 raies (de 436 indigo à 644 nm rouge) tombent sur la surface du capteur bien perpendiculairement.
- Affiner la position de façon à avoir des raies bien nettes et bien fines sur la surface du capteur.
- Démarrer le logiciel **CCD**
- Placer l'interrupteur **Mode _CCD** sur la position série
- A l'aide du logiciel *CCD*, faire une acquisition du spectre. Utiliser le bouton **LECTURE CCD**.
- Vérifier que 7 raies (436; 468, 480, 509, 546; 578; 644 nm) apparaissent. Modifier éventuellement le temps d'intégration (bouton plus ou moins) et/ou la largeur de la fente source, pour avoir les raies les plus fines et les mieux séparées possibles. Refaire une acquisition.
- Étalonner le capteur CCD avec ces longueurs d'onde. Utiliser les commandes de la partie **Etalonnage** et le bouton **Etalonner spectre de couleur** une fois toutes les raies connues placées.



- Pour ajouter une longueur d'onde :
 - Valider **AJOUTER**
 - Entrer la longueur d'onde à ajouter dans la partie Lambda sélectionnée
 - Double cliquer dans la fenêtre blanche
 - Invalider **AJOUTER**
- Pour supprimer une longueur d'onde
 - Valider **SUPPRIMER**
 - Double cliquer sur la longueur d'onde à supprimer
 - Invalider **SUPPRIMER**
- Placer une longueur d'onde sur la Fenêtre de la CCD
 - Invalider **SUPPRIMER** et **AJOUTER**
 - Double cliquer sur la longueur d'onde qui vous intéresse jusqu'à son apparition dans la partie lambda sélectionnée
 - Placer alors la raie sur la fenêtre par un simple clic procéder ainsi pour le placement de chaque les longueurs d'onde.



- Retrouver les différentes longueurs d'onde du cadmium et du mercure.
- Pour retrouver les différentes longueurs d'onde du cadmium et du mercure une fois l'étalonnage réalisé, déplacer la souris dans la fenêtre CCD, la longueur d'onde correspondant à la position de la souris s'affiche alors dans l'indicateur **Long. D'onde en nm**.
- **Sauvegarder l'enregistrement sous vos initiales.**

Faire appel à un professeur en cas de difficultés.

- Rassembler vos résultats dans le Tableau 1 :
- Noter la valeur des coefficients a et b de la régression.
- Sauvegarder à nouveau sous vos initiales.

λ (nm)	436 Hg	468 Cd	480 Cd (F')	509 Cd	546 Hg	578 Hg	644 Cd(C')
Couleur	violet indigo	bleu	bleu clair	vert bleu	vert	jaune	rouge
N° pixel							

Tableau 1 : Raies du cadmium (468; 480; 509; 644 nm) et du mercure (436; 546 et le doublet jaune 577+579).

**NE PAS DEMONTER LE MONTAGE JUSQU'A LA FIN DU TP
FAIRE VERIFIER L'ETAT DU PRISME PAR LE PROFESSEUR AVANT DE QUITTER LE TP
LE JEUDI SOIR**

4.3. Étalonnage du spectrographe

Faire sous *Excel* le graphe du N° du pixel en fonction de $1/\lambda^2$ à partir du Tableau 1. Rechercher une régression linéaire permettant d'établir l'équation $N = f(1/\lambda^2)$. Comparer les coefficients de la DMC aux valeurs a et b précédentes.

4.4. Électronique

Relever à l'aide de l'oscilloscope l'allure du signal CCD_ROG qui a permis d'avoir l'ensemble des raies sur le signal CCD_video.

Que représente ce signal ? (que se passe-t-il lorsque celui-ci est au niveau haut, puis au niveau bas ?)

4.5. Calcul informatique des coefficients DMC

On souhaite calculer par un programme écrit en Labview les coefficients a , b de la droite de régression linéaire d'équation :

$$N = a \cdot \frac{1}{\lambda^2} + b$$

Lambda(nm)	N° pixel
435	1731
468	1345
480	1224
509	974
546	700
578	523
644	232

Charger le logiciel *LabView*

Créer un nouveau Vi vide

Créer deux tableaux d'entiers un pour Lambda et un pour Npixel

Compléter ces tableaux avec les valeurs données ci-contre.

Réaliser le programme face diagramme qui permet l'affichage simultané de la courbe précédente et de sa droite de régression linéaire (le graphe est de type XY).

L'affichage des coefficients a et b de la droite de régression sera fait sur la face avant.

Imprimer la face diagramme

Faire valider par un professeur le fonctionnement de votre programme.

5. Analyse des performances du système

5.1. Pouvoir dispersif du prisme

A partir de la première courbe (page 4 : D_{mini} en fonction de λ) calculer l'écart angulaire α' entre les deux raies suivantes : les raies F' (480 nm) et C' (644 nm) du cadmium. Comparer le résultat α' à celui (noté $\delta_{F'} - \delta_{C'}$) trouvé dans les livres (Tableau ci-contre). De quel type de verre est constitué le prisme .

En tenant compte de la focale de 300 mm calculer la distance théorique entre ces deux raies.

A partir du tableau 1, établir en pixels puis en mm (1pix = 14 μm) l'écart expérimental entre les raies F' et C'. Comparer à la distance théorique. Comment peut-on expliquer la différence ?

Matériaux	Crown	Flint léger	Flint lourd	Silice fondue	Verre IR
Domaine spectral (μm)	0,3-2,7	0,3-2,8	0,36-2,8	0,18-3	0,3-4
n_e (0,5461 μm)	1,519	1,624	1,734	1,460	1,544
$n_{F'} - n_{C'}$	0,008	0,017	0,026	0,007	0,017
$\delta_{F'} - \delta_{C'}$	0° 40'	1° 40'	3°	0° 35'	1° 10'

5.2. Spectre du sodium

On suppose la largeur e de la fente source $\approx 0,1$ mm. Calculer la largeur de son image $e' = e \frac{f_2}{f_1}$. Com-

bien de pixels du capteur seront excités par une radiation supposée parfaitement monochromatique ? (On ne tient pas compte ici des aberrations et de la diffraction.)

Remplacer la lampe source par une lampe à vapeur de sodium.

Le reste du montage doit rester inchangé !

Rechercher sur l'écran de l'oscilloscope le spectre du sodium, il se réduit à sa raie jaune (doublet D) très intense.

Faire l'acquisition informatique du 2^{ème} spectre.

Sauvegarder encore sous vos initiales.

Représenter le spectrographe du sodium et rechercher la longueur d'onde de la raie D.

Faire une sortie imprimante. Porter sur le graphe la valeur trouvée (longueur d'onde de la raie D) et comparer à la valeur attendue.

Expliquer pourquoi on ne voit pas les autres longueurs d'ondes du sodium.

Expliquer pourquoi on ne distingue pas les deux raies qui constituent le doublet du sodium.

5.3. Étude de la CCD

Connaissant le nombre des pixels (utiles et inutiles), retrouver, en observant le chronogramme du signal CCD ROG, la fréquence horloge des pixels.

5.4. Conclusion

Pour satisfaire aux exigences de la société PIERRON, précisez :

Le domaine des longueurs d'ondes observables ?

Sachant que la résolution théorique est de 0.16 nm/pixels, donner la résolution globale du système ?