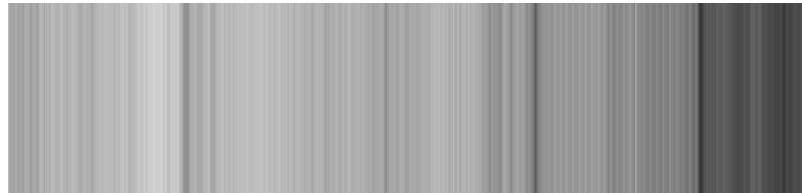
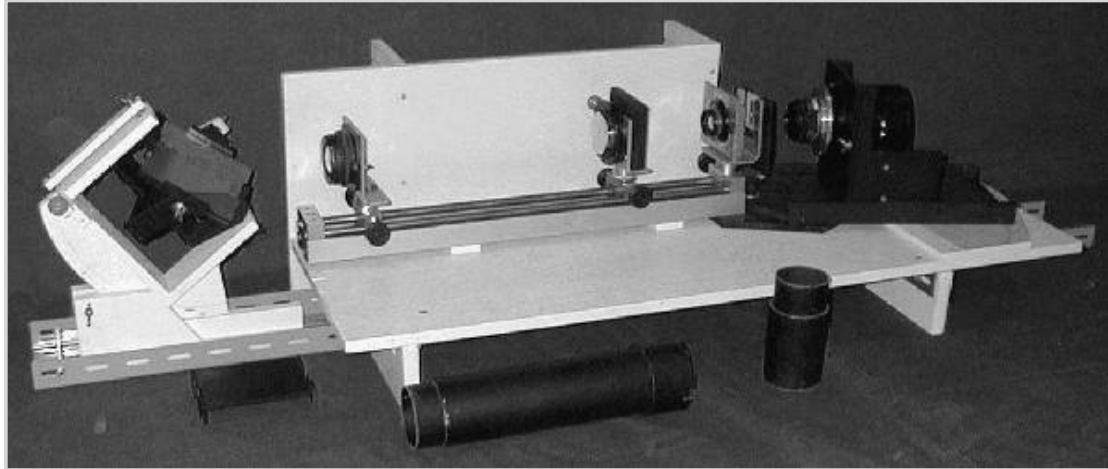
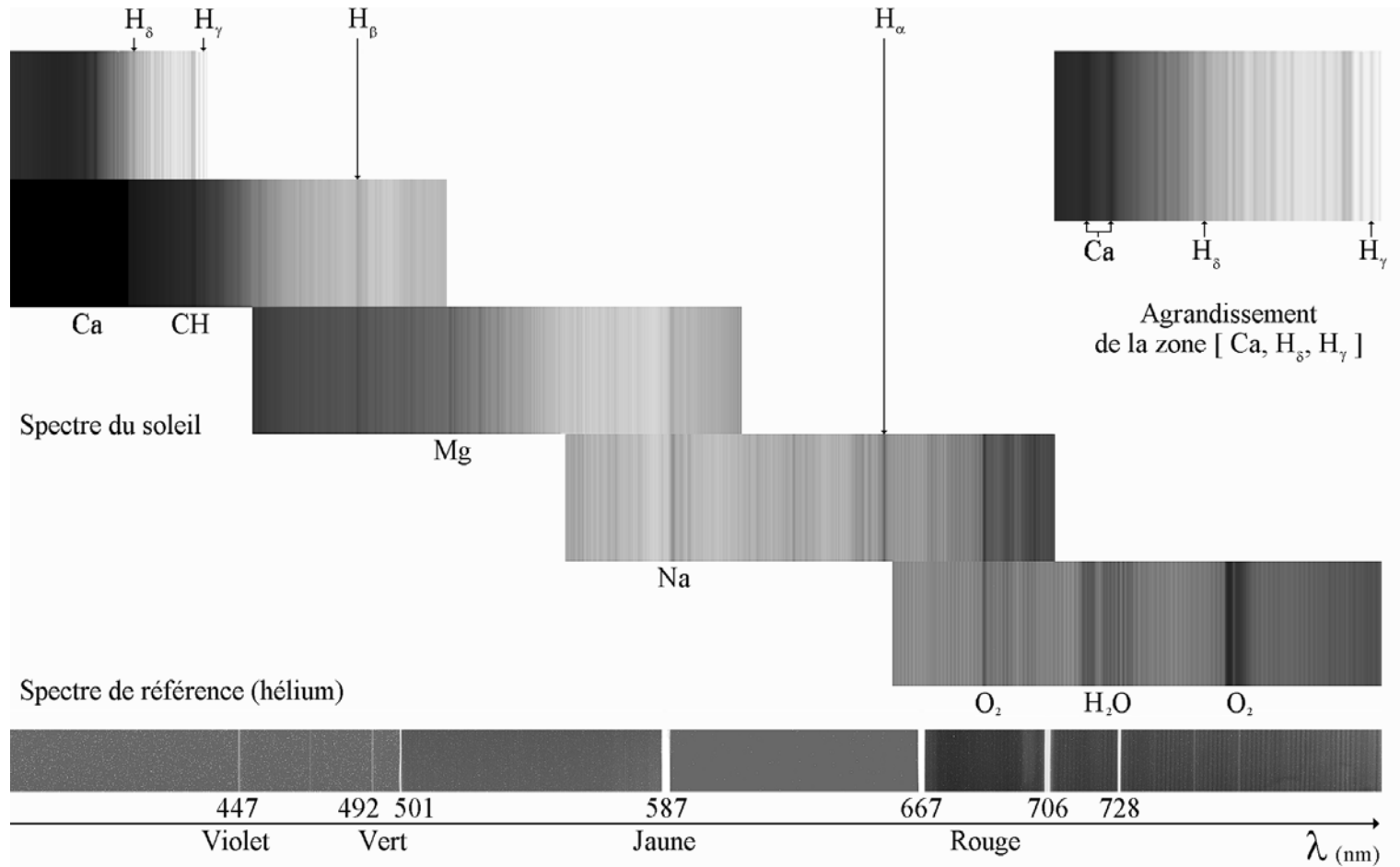


SPECTROGRAPHIE SOLAIRE par imagerie numérique





Olympiades de Physique 1996

Principe de la manipulation

1 - Le système dispersif : un réseau de diffraction par transmission

distance entre les traits :

a

nombre de traits par unité de longueur

$$n = 1/a$$

Lorsque de la lumière blanche arrive sur le réseau elle se disperse en plusieurs spectres colorés

Les rayons lumineux sortant du réseau ont des directions qui dépendent des longueurs d'onde des rayonnements présents dans la source de lumière.

$$\theta_{\text{violet}} < \theta_{\text{rouge}}$$

Quand ceux-ci arrivent perpendiculaires à la surface du réseau, l'angle θ de déviation est donné par la formule:

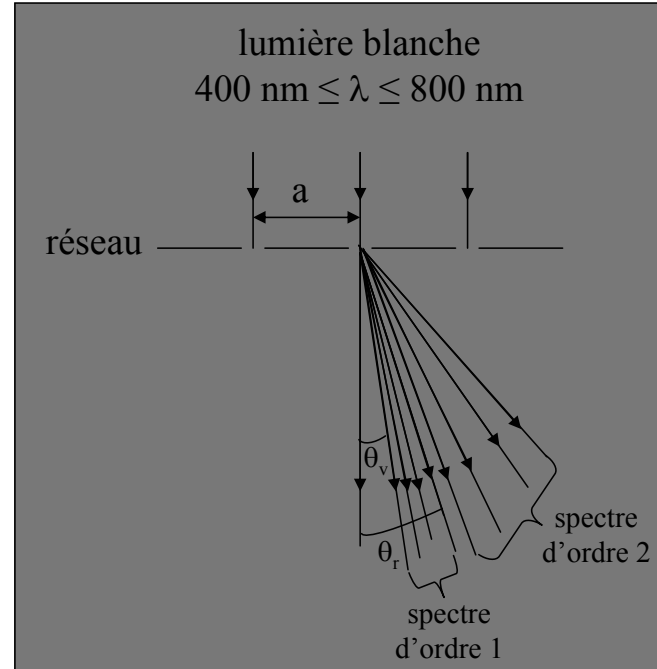
$$\sin \theta = n.k.\lambda$$

avec :

n le nombre de traits par unité de longueur du réseau,

k le numéro d'ordre du spectre,

λ la longueur d'onde de la lumière.



La résolution propre d'un réseau dépend du nombre total de traits éclairés ;
elle est donnée par la formule :

$$R = k.N$$

où : N = nombre total de traits éclairés et k = numéro d'ordre du spectre.

La résolution est donc maximale lorsque le réseau est éclairé sur toute sa surface.

Le Soleil n'est pas une source ponctuelle ; son diamètre apparent est de 32'.

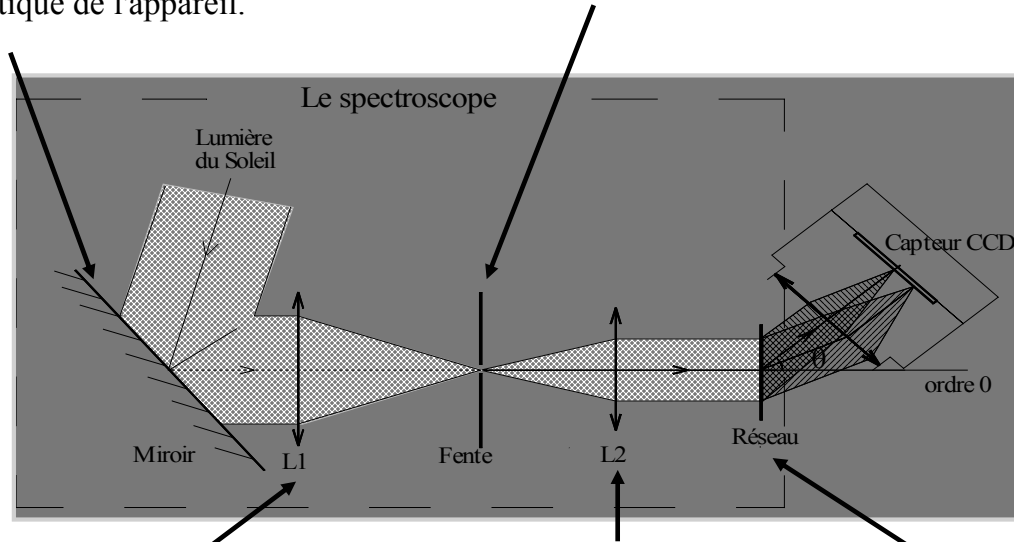
Pour que le réseau reçoive
un faisceau de rayons parallèles, perpendiculaires à sa surface
et que celle-ci soit totalement éclairée
il faut

un système optique situé à l'avant du réseau

2 - Le montage optique

un *miroir pivotant*,
placé face au Soleil
dirige les rayons lumineux
suivant l'axe optique de l'appareil.

une *fente F*,
située dans le plan focal de la lentille L_1 ,
isole une fine bande verticale de l'image du Soleil

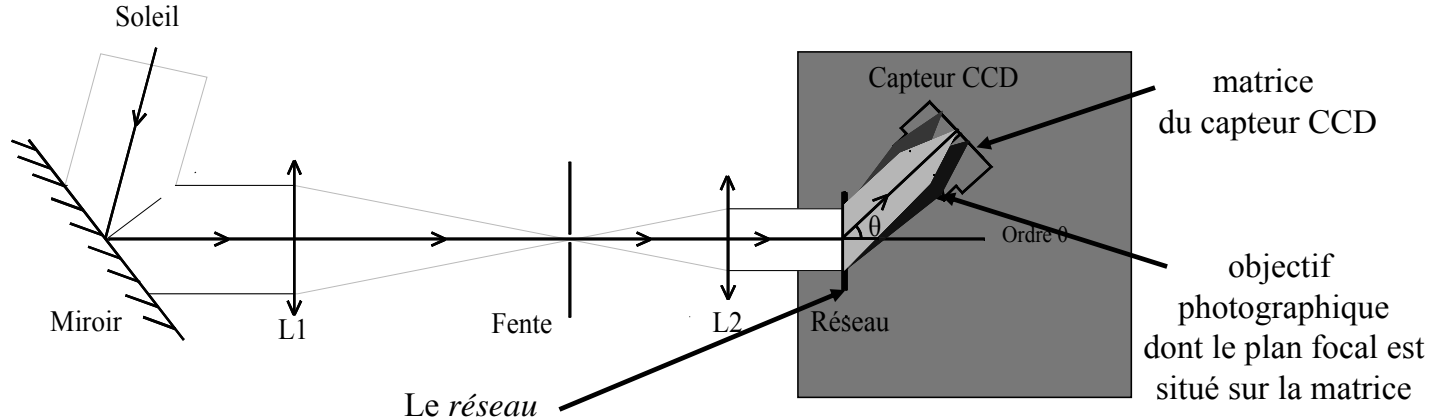


une *lentille collectrice* L_1
forme une image du Soleil
dans son plan focal

une *lentille collimatrice* L_2
dont le foyer est sur la fente F
donne, à la sortie,
un faisceau de rayons parallèles.

le *réseau de diffraction*

3 - La formation de l'image du spectre solaire sur le capteur



Le *réseau* donne pour chaque longueur d'onde un faisceau de rayons parallèles dont la déviation θ est spécifique à chaque couleur

L'objectif photographique forme sur la matrice un ensemble d'images nettes et colorées de la fente, qui constitue le

spectre solaire

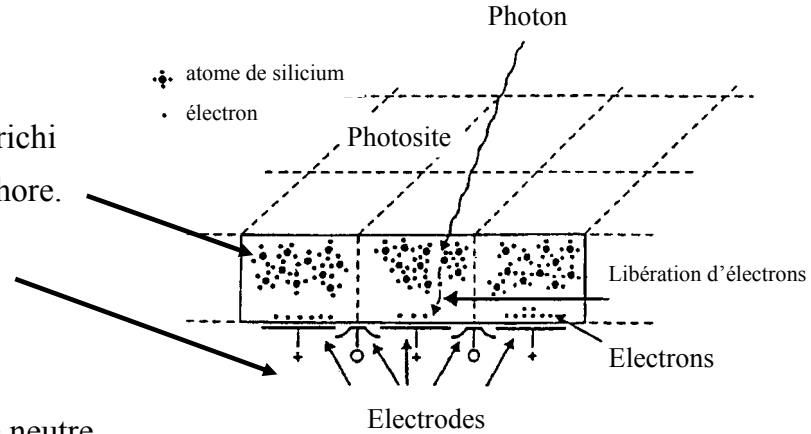
Le capteur électronique CCD enregistre l'image du spectre et la transfère à un ordinateur pour la visualiser.

4 - L'enregistrement de l'image du spectre solaire par le capteur

La matrice est une mosaïque de photosites.

Le détecteur photosensible est un substrat de silicium semi-conducteur enrichi par des impuretés d'arsenic ou de phosphore.

Sous le substrat, une couche isolante sur laquelle sont implantées environ 400 000 électrodes métalliques formant une mosaïque de photosites délimités par une séparation électronique neutre.



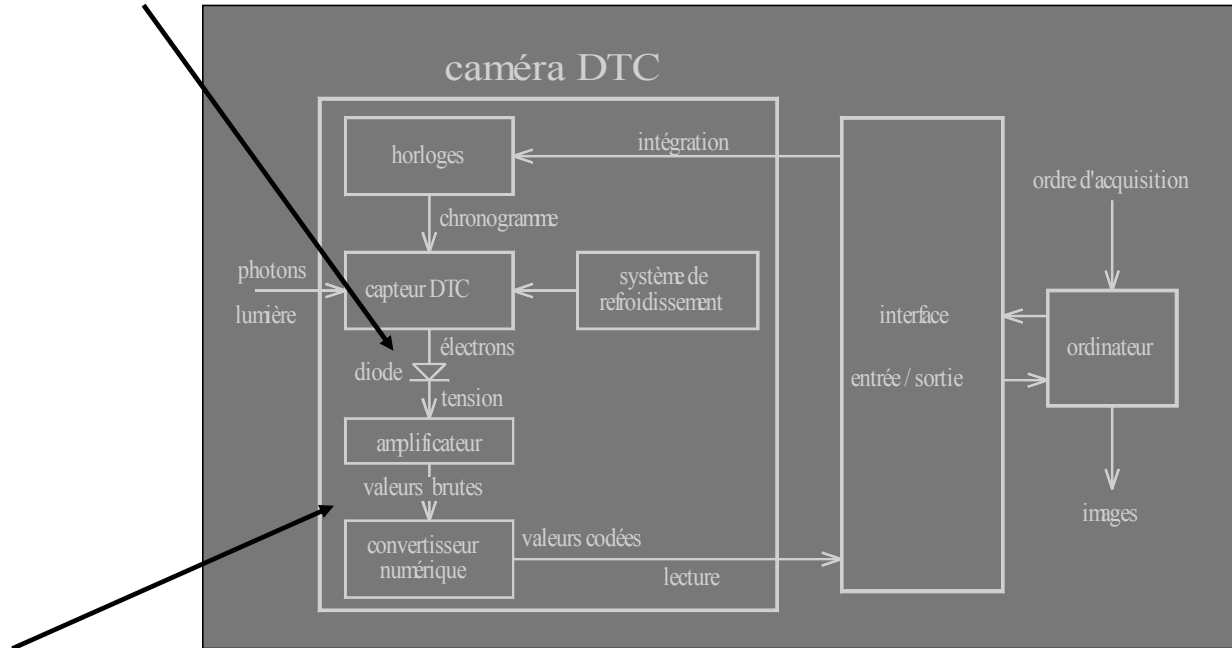
Lorsqu'un **photon** d'énergie suffisante pénètre dans le silicium dopé, il y a formation d'une paire (électron - trou).

Dans chaque photosite les **électrons** se regroupent près de l'électrode lorsque celle-ci est soumise à une tension positive.

Le nombre d'électrons piégés dans un photosite est proportionnel au nombre de photons reçus.

Le dispositif électronique de transfert de charge.

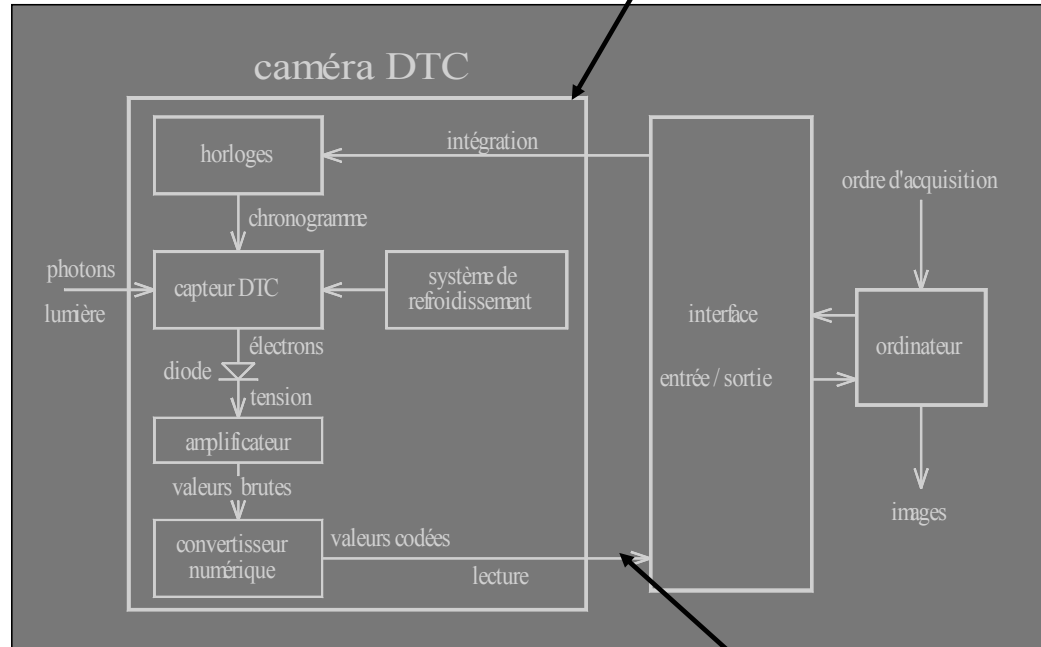
Le mécanisme du transfert de charge permet, grâce à des horloges internes, de faire défiler, à la sortie du capteur, une à une les charges électriques contenues dans chacun des photosites de la matrice.



Le signal analogique qui en résulte (sous forme de tension électrique) est alors amplifié puis numérisé pour être traité par l'ordinateur.

L'ordinateur, par l'intermédiaire d'un logiciel, possède deux fonctions :

faire fonctionner la caméra en lui donnant des commandes par l'intermédiaire du clavier



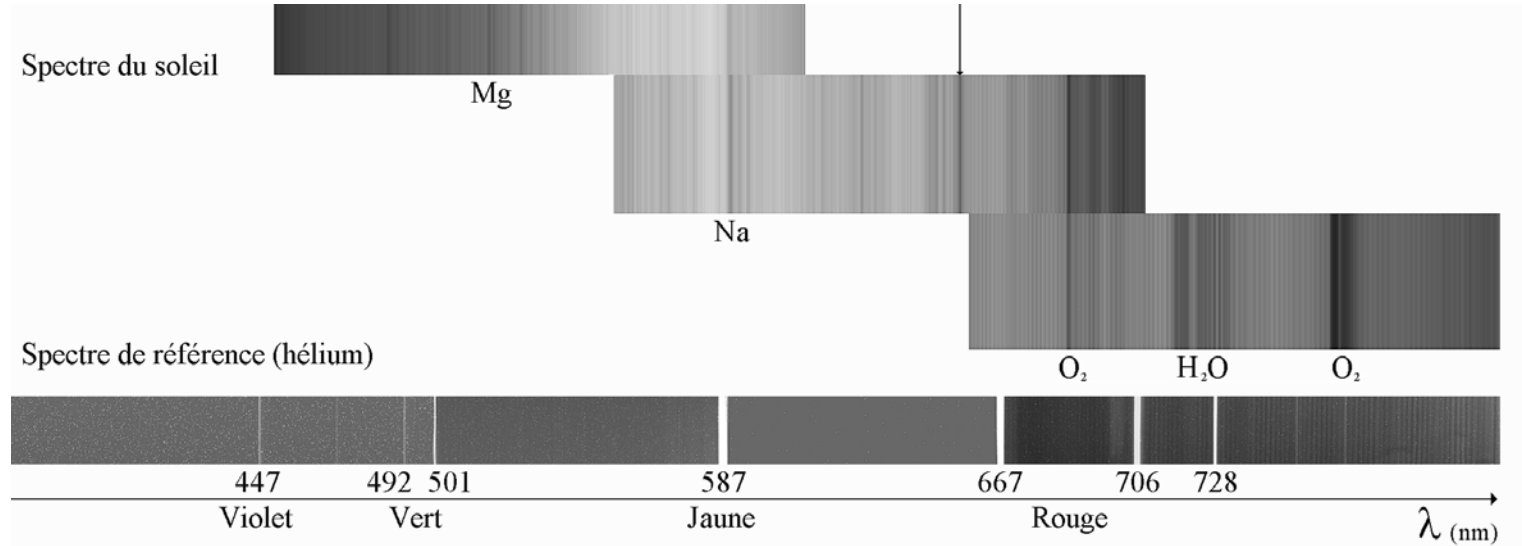
acquérir les données afin de visualiser les images obtenues puis les sauvegarder et les traiter.

L'écran de l'ordinateur est une mosaïque de pixels.

5 - L'identification des raies du spectre solaire

Pour connaître les longueurs d'onde des raies contenues dans le spectre solaire, on réalise le spectre d'une lampe de référence pris *rigoureusement dans les mêmes conditions expérimentales*.

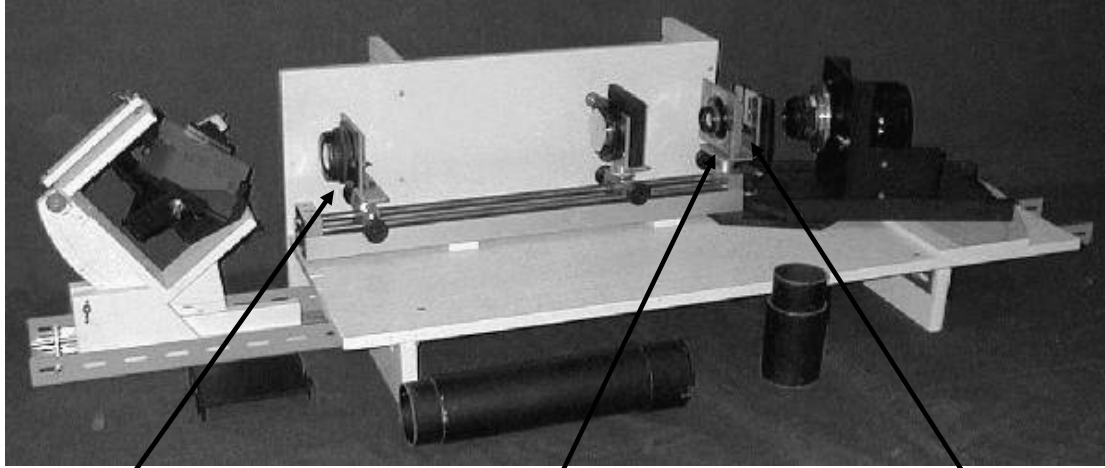
Les longueurs d'onde des raies de cette lampe étant connues, le repérage de leurs positions sur l'image permettra l'étalonnage de l'image spectrale



Il faudra donc prendre **successivement** et, impérativement, **sans toucher** à la caméra

- *l'image du spectre solaire,*
- *l'image du spectre de la lampe de référence.*

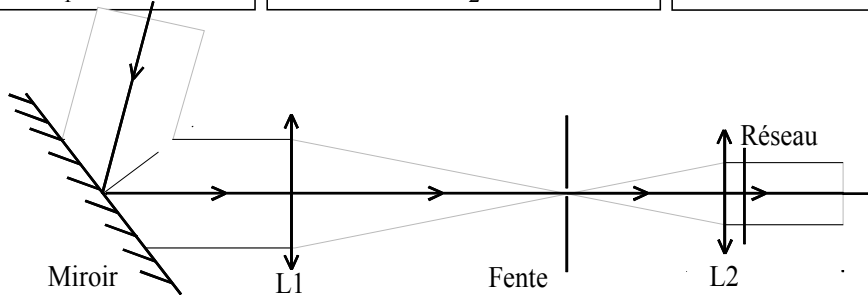
Réalisation de l'appareil



Lentille collectrice L_1 :
distance focale $f_1 = 35$ cm
diamètre $d_1 = 5,5$ cm

Lentille collimatrice L_2
distance focale $f_2 = 18$ cm
diamètre $d_2 = 26$ mm

réseau :
taille = 26 mm \times 26 mm,
nombre de traits $n = 754$ traits/mm.

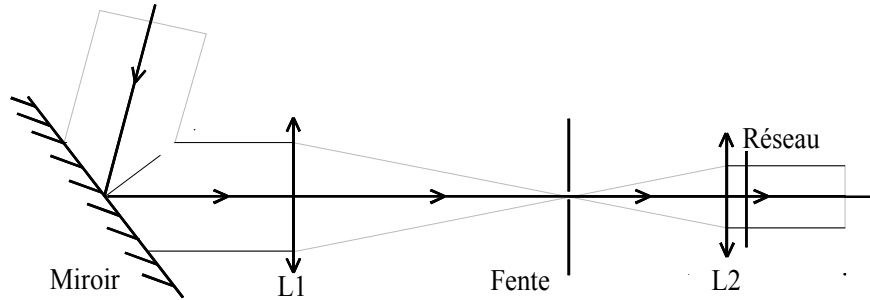


La surface du réseau est-elle entièrement éclairée ?

lentille collectrice L_1
distance focale $f_1 = 35$ cm
diamètre $d_1 = 5,5$ cm

lentille collimatrice L_2
distance focale $f_2 = 18$ cm
diamètre $d_2 = 2,6$ cm

réseau
taille = 26 mm \times 26 mm,
nombre de traits $n = 754$ traits/mm.



L'ouverture de faisceau lumineux avant la fente est $\frac{d_1}{f_1} = \frac{5,5}{35} = 0,16$

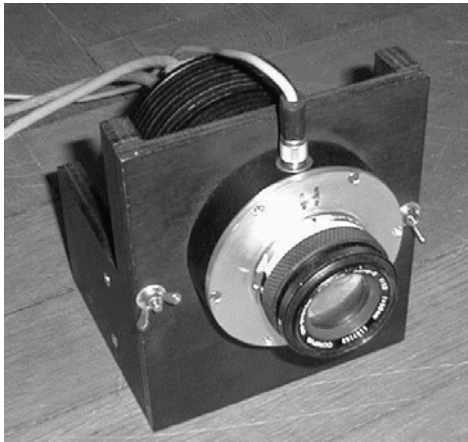
Elle reste la même après la fente

Le diamètre du faisceau au niveau de la lentille L_2 est $0,16 f_2 = 2,88$ cm

La surface de la lentille L_2 est donc totalement éclairée par la lumière arrivant de la lentille L_1

Le réseau a une surface comparable à celle de la lentille L_2

**Le réseau est totalement éclairé par le faisceau lumineux
il fonctionne donc dans de bonnes conditions**



LE CAPTEUR CCD

La matrice photosensible

Dimensions : longueur $L = 6,9$ mm
 largeur $l = 4,6$ mm,

Photosites : $768 \times 512 = 393216$ photosites
 de 9×9 mm.

Numérisation :

La caméra Hi-SIS utilisée fournit des données codées sur 12 bits. Elle permet ainsi de diviser la plage de tension à traiter en $2^{12} = 4096$ valeurs qui s'afficheront en autant de niveaux de gris dans chaque *pixel* de l'écran.

L'objectif photographique

Objectif de focale 28 mm

Objectif de focale 50 mm

Objectif de focale 135 mm

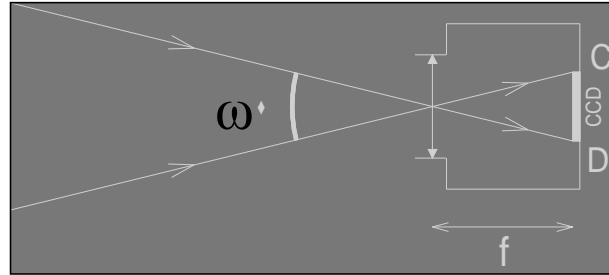
Le support

L'ensemble objectif/CCD est placé sur support permet l'orientation en fonction de l'angle de déviation des rayons lumineux

Ce support tournant autour d'un axe vertical passant par le point d'intersection du réseau et de l'axe optique du spectroscopie

Quelle largeur du spectre peut-on obtenir sur une seule image ?

Le dispositif de prise d'image, l'ensemble capteur C.C.D.-objectif photographique, ne peut capter que les rayons lumineux contenus dans un certain cône, appelé *champ angulaire* de l'appareil.



Ce champ dépend des *dimensions de la matrice* et de la *distance focale de l'objectif* utilisé.

les angles étant petits on peut en assimiler $\tan \omega$ avec ω en radians, $\Leftrightarrow CD = f \cdot \omega$

$$\omega \text{ (radian)} = CD / f$$

CD = longueur de la matrice = 6,9 mm).

focale de l'objectif (en mm)	28	50	200
champ angulaire (en radians)	0,246	0,138	0,0345
champ angulaire (en degrés)	14,09°	7,9°	1,98°

Quelle est la largeur angulaire du spectre solaire ?

L'angle θ de déviation est donné par la formule:

$$\sin \theta = n \cdot k \cdot \lambda$$

avec : n le nombre de traits par unité de longueur du réseau,
 k le numéro d'ordre du spectre,
 λ la longueur d'onde de la lumière.

Pour le spectre d'ordre 1 ,obtenu avec un réseau ayant $n = 754$ traits/mm

lumière violette $\lambda = 400$ nm	$\sin \theta = 0,30$	$\theta = 17,6^\circ$
lumière jaune $\lambda = 600$ nm	$\sin \theta = 0,45$	$\theta = 29,9^\circ$
lumière rouge $\lambda = 800$ nm	$\sin \theta = 0,60$	$\theta = 37,1^\circ$

La largeur angulaire du spectre visible est d'environ 20°

Combien d'images au minimum faudra - t - il faire, avec chacun des objectifs, pour couvrir tout le spectre visible ?

La largeur angulaire du spectre visible est d'environ 20°
et

focale de l'objectif (en mm)	28	50	200
champ angulaire (en radians)	0,246	0,138	0,0345
champ angulaire (en degrés)	$14,09^\circ$	$7,9^\circ$	$1,98^\circ$

Pour couvrir tout le spectre :

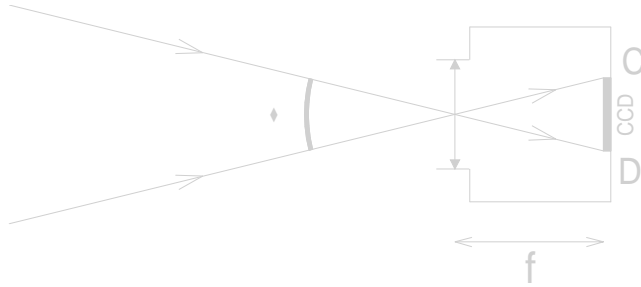
Objectif de focale 28 mm : 2 images

Objectif de focale 50 mm : 3 images

Objectif de focale 135 mm : 10 images

Description de l'appareillage

B - LE CAPTEUR CCD



Sur la figure, on voit (en assimilant $\tan \omega$ avec ω en radians, les angles étant petits) que :

$$CD = f \cdot \omega$$

d'où : ω (radian) = CD / f

Calculer le *champ angulaire de l'ensemble capteur C.C.D.-objectif photographique* (en radians puis en degrés) correspondant à l'utilisation de divers objectifs (la longueur de la matrice est de 6,9 mm)

focale de l'objectif (en mm)	28	50	200
champ angulaire (en radians)			
champ angulaire (en degrés)			

Connaissant la largeur du spectre visible (calculée précédemment), en déduire combien d'images au minimum il faudra faire avec chacun des objectifs, pour couvrir tout le spectre visible ?

Résultat des calculs :

focale de l'objectif (en mm)	28	50	200
champ angulaire (en radians)	0,246	0,138	0,0345
champ angulaire (en degrés)	14,09°	7,9°	1,98°

Pour couvrir tout le spectre :

Objectif de focale 28 mm : 2 images

Objectif de focale 50 mm : 3 images

Objectif de focale 135 mm : 10 images

focale de l'objectif (en mm)	28	50	200
champ angulaire (en radians)	0,246	0,138	0,0345
champ angulaire (en degrés)	14,09°	7,9°	1,98°

