

Les capteurs CCD

Initiation à la théorie et à la pratique

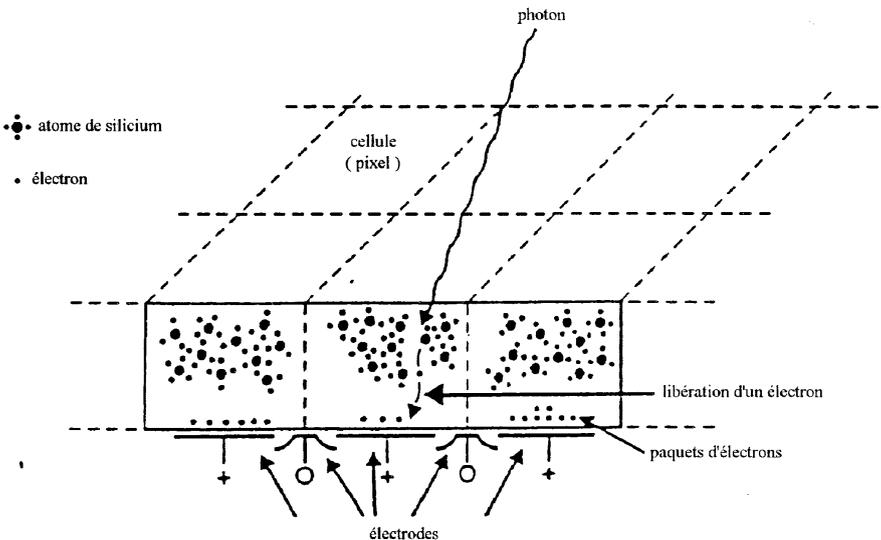
par Jacques CAZENOVE,
 Professeur Sc Physiques Lycée Diderot Narbonne
 Animateur Atelier Science - 2, rue Jean Moulin - 11100 Narbonne
 Philippe MARTINOLE - Pascal AYMERIC : Anciens élèves
 Club Astro M11 - Lycée Diderot - Observatoire de Narbonne
 Et la participation de Yves MORAND, Observatoire de Narbonne

1. LA TECHNOLOGIE CCD

1.1. Qu'est-ce qu'un CCD ?

Un CCD («Charge Coupled Device») ou DTC («Dispositif à Transfert de Charges»), est une puce de silicium dopé, d'une épaisseur de 20 à 100 microns sur laquelle a été implantée une mosaïque de 200 000 cellules photoMOS (micro photodiodes de 30 * 30 microns).

Les CCD ont vu le jour en 1970. Ils sont aujourd'hui utilisés dans de nombreuses applications (lignes à retard, Mémoires acquisition d'images...).



1.2. Le principe des CCD

Le Dispositif à Transfert de Charges ou DTC est constitué par une pastille de silicium. *Les photons interagissent avec certaines parties photosensibles* de cette pastille, formant ainsi une paire électron-trou. Le trou résulte de l'extraction temporaire d'un électron de la surface cristalline. *L'électron est capté dans un puits de potentiel* créé par une électrode. Il est maintenu sous l'électrode tant que celle-ci garde son potentiel. Si d'autres photoélectrons sont produits par interaction avec la lumière à proximité de l'électrode, ils seront eux aussi dirigés vers le puits de potentiel. Il y aura donc *stockage des électrons* et création d'une charge électrique (paquets d'électrons). La valeur de cette dernière sera l'image fidèle de la quantité de lumière tombant sur l'élément photosensible. *La charge est donc directement proportionnelle à l'éclairement du détecteur.* L'élément photosensible est appelé PIXEL (Picture element).

1.3. La capacité MOS

La capacité MOS est constituée :

- *d'un substrat* semi-conducteur dopé (en général P : les trous y sont donc majoritaires),
- recouvert *d'une couche isolante* (le diélectrique) d'oxyde de silicium SiO_2 (de quelques dixièmes de microns d'épaisseur),
- et sur laquelle on trouve *une électrode métallique* (dépôt d'aluminium ou de silicium fortement dopé pour être rendu conducteur) appelée «grille».

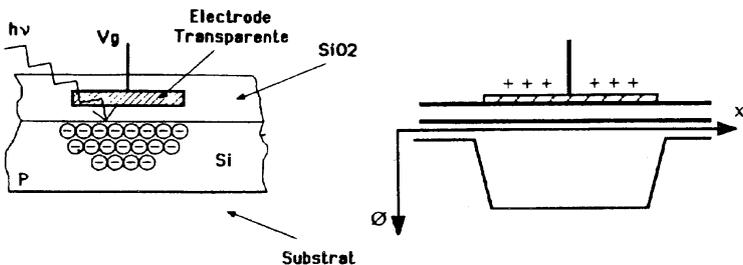


Diagramme des potentiels de surface dans une cellule MOS lorsque la grille est polarisée positivement.

Lorsqu'un photon d'énergie suffisante pénètre dans le silicium il y a formation d'une paire électron-trou (dans la suite de l'exposé seuls les électrons seront pris en considération).

Un puits de potentiel (quelques microns de profondeur) est créé sous l'électrode dans le substrat dopé P quand celle-ci est soumise à une tension $V_g > 0$.

Les porteurs majoritaires (les trous) sont repoussés loin de l'interface SiO_2/Si dans le substrat.

Les électrons créés (porteurs minoritaires), sont donc regroupés près de l'interface SiO_2/Si (Zone dite d'inversion).

La charge ainsi créée par effet photoélectronique demeure piégée tant que la polarisation positive (quelques dizaines de volts) de grille V_g est maintenue.

La couche d'inversion ainsi produite est donc le véhicule de l'information acquise.

La **charge** étant **proportionnelle** à la **quantité de lumière** (nombre de photons reçus), elle va donc constituer la grandeur analogique de référence du système (les électrons thermiques devant rester négligeables devant ceux créés par effet photoélectrique) !

1.4. Mécanisme du transfert de charges

Le mécanisme du transfert de charges est en fait assez simple :

- lorsque deux capacités MOS sont assez proches l'une de l'autre, leurs puits de potentiel peuvent communiquer (suppression de la barrière de potentiel) et le transfert de charge entre les deux puits voisins peut ainsi être réalisé,
- il suffit donc d'appliquer des tensions croissantes sur l'électrode voisine pour transférer de proche en proche des paquets de charges le long de la structure (les charges sont transférées d'un puits dans un plus profond),
- l'ensemble des électrodes liées électriquement constituent une **PHASE \emptyset** .

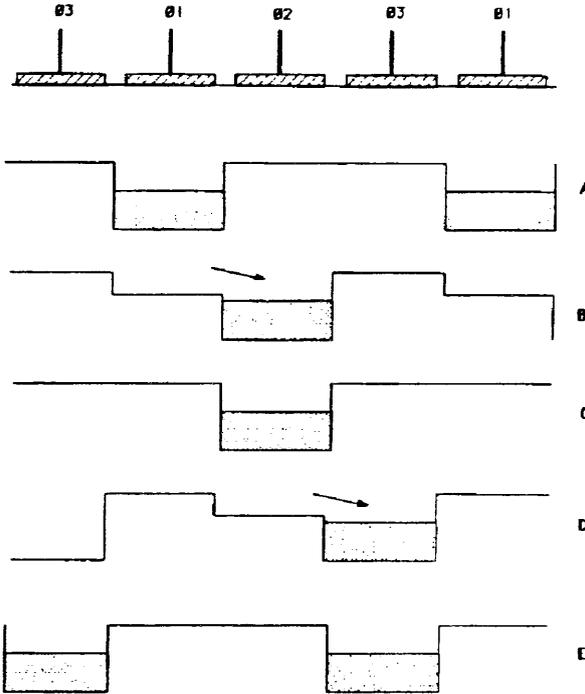
Plusieurs méthodes de transfert de charges sont utilisées. Nous allons décrire le TRANSFERT À TROIS PHASES.

En A : le puits de potentiel est créé sous l'électrode [1] : c'est lui qui reçoit directement les électrons créés par effet photoélectrique.

En B puis C : l'électrode [2] est mise progressivement à l'état haut (potentiel croissant par valeur positive), dans le même temps l'électrode

[1] est mise dans l'état bas (on obtient ainsi un vidage complet du premier puits dans le second).

En D : on retrouve le même processus au niveau des électrodes [2] et [3].



On remarquera surtout que les paquets de charges sont attirés par une électrode portée à un potentiel positif. Pour éviter le passage de certains électrons d'un paquet dans le précédent lors du transfert, il faut veiller à toujours entourer les électrodes positives avec deux électrodes négatives de part et d'autre. Malgré cette précaution, quelques électrons passent d'un paquet à l'autre. Cet effet, appelé Inefficacité de Transfert, est une des caractéristiques d'un CCD.

2. ORGANISATION GÉNÉRALE D'UN CCD

Il existe deux formes de CCD :

- les BARRETTES,
- les MATRICES.

2.1. Les barrettes CCD

Une barrette comporte une LIGNE PHOTOSENSIBLE comportant plusieurs milliers de pixels (1728 pour la TH 7801 de $13 * 13$ microns sur 22 mm de long).

Quatre éléments masqués en bout de ligne permettent de connaître le courant d'obscurité (électrons thermiques). Elle assure l'intégration des charges.

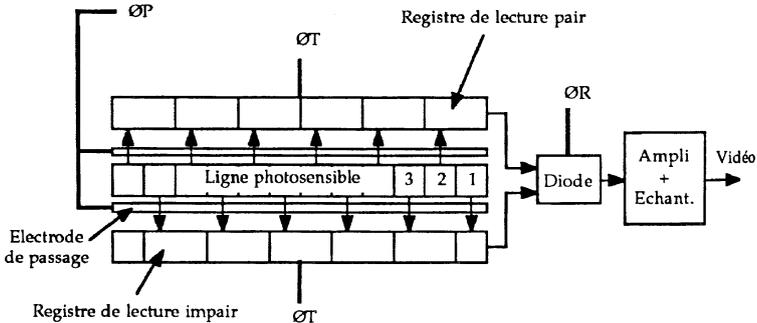


Schéma d'une barrette CCD.

La ligne photosensible est encadrée de part et d'autre par deux **grilles de passage** qui assurent le transfert en parallèle des charges accumulées dans la zone photosensible, vers les **registres de lecture**. C'est une **première horloge** $\phi(P)$ dite de passage qui commande ce transfert par création de puits de potentiel. Dans la TH 7801 il existe deux registres de lecture l'un correspondant à la lecture des pixels de rang pair, l'autre impair. A chacune des extrémités de la ligne, quatre éléments photosensibles sont masqués pour fournir une référence du niveau d'obscurité (électrons d'origine thermique).

Une **deuxième horloge** $\phi(T)$ assure le transfert séquentiel des charges provenant de chacun des photoéléments sur un circuit de sortie constitué d'une **diode** qui effectue la conversion charge-tension en jouant le rôle d'un condensateur dont le potentiel (positif) de référence est fixé avant le passage de chacune des charges. Sa valeur chute proportionnellement aux charges accumulées sous chaque pixel. La remise à niveau du potentiel avant l'arrivée d'une nouvelle charge est assurée par une horloge interne $\phi(R)$.

Un étage **multiplexeur** commandé par $\phi(T)$ assure la connexion des registres pairs et impairs alternativement.

Le signal recueilli est donc négatif, ce qui impose son inversion avant toute autre opération.

Un **amplificateur** permet d'augmenter le signal et dans certains CCD,

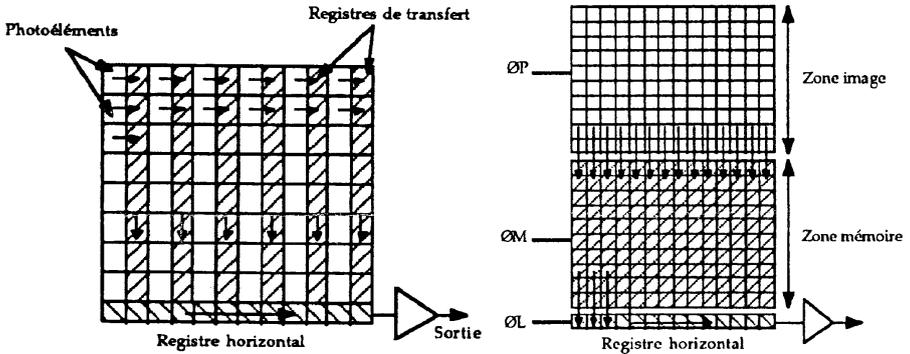
un **échantillonneur bloqueur** le maintient constant pendant la durée de numérisation.

On peut éventuellement coupler les deux horloges $\phi(R)$ et $\phi(T)$ dans un souci de simplification de l'électronique, mais la qualité de l'image s'en trouvera affecté par une augmentation du bruit.

Le **temps d'intégration** correspond au temps de lecture de toute la barrette (1728 pixels actifs + 2×4 pixels ref Obscurité + 18 inactifs = 1754). Il est de 1 ms pour 1000 pixels lus à 1 MHz. Durant le transfert des charges une nouvelle acquisition peut être assurée.

2.2. Les matrices CCD

L'obtention d'une image 2D à partir d'une barrette exige qu'un balayage de celle-ci soit effectué perpendiculairement à la ligne photosensible ; il en résulte des temps d'acquisition parfois excessifs pour l'intégration de chacune des colonnes constituant l'image 2D reconstituée.



Matrice à transfert interligne.

L'organisation en transfert de trame.

La matrice CCD convient mieux à ce type de résultat puisque l'élément photosensible est constitué de pixels disposés sur une surface. L'acquisition de l'image 2D peut-être organisée de deux méthodes différentes :

- **Par transfert interligne** : chaque colonne photosensible est associée à un registre à décalage adjacent de même nature que les photosites mais insensibilisé optiquement par dépôt d'un masque d'aluminium

afin que l'information transmise ne soit pas perturbée par le flux incident.

A la fin du temps d'intégration les charges produites sont transférées en bloc dans ces registres de lectures adjacents, puis chaque colonne est lue ligne par ligne et transférée dans un registre horizontal, (quelques microsecondes) pendant qu'une nouvelle acquisition est provoquée (deux horloges sont encore nécessaires pour les commandes des séquences).

• **Par transfert par trames** : il exige de disposer, côte à côte, de deux matrices identiques dont l'une est sensible l'autre masquée (zone mémoire) au rayonnement incident et dont la fonction consiste à recevoir transversalement les charges générées sur la matrice photosensible et ce le plus rapidement possible. La totalité de la zone image est donc photosensible contrairement au cas précédent où des effets de moiré peuvent parfois constituer une gêne.

Le contenu d'une colonne sensible est maintenant transféré en bloc dans son vis-à-vis masqué (Horloges $\emptyset(P) = \emptyset(L)$), puis ligne par ligne dans le registre horizontal (horloge $\emptyset(L)$) comme dans le cas précédent. Il en résulte une diminution importante du temps de transfert de la zone image à la zone mémoire (qq μ s), le temps de lecture complet de la matrice est de l'ordre de la microseconde mais dépend du nombre de pixels concernés pour constituer une image.

Une amélioration (mode TDI = Time Delay Integration) consiste à déplacer l'image de la valeur de 1 pixel en même temps que la lecture est réalisée dans le même sens que le transfert. Il en résulte d'excellents résultats radiométriques puisque l'image est intégrée sur l'ensemble des photosites d'une colonne (une poussière sur un pixel devient moyennée sur l'ensemble de la colonne et ses effets très atténués).

3. PERFORMANCES DU CCD

3.1. Robustesse

La rétine photosensible du CCD peut être soumise à de forts éclaircissements sans subir le moindre dommage.

3.2. Rendement quantique et réponse spectrale

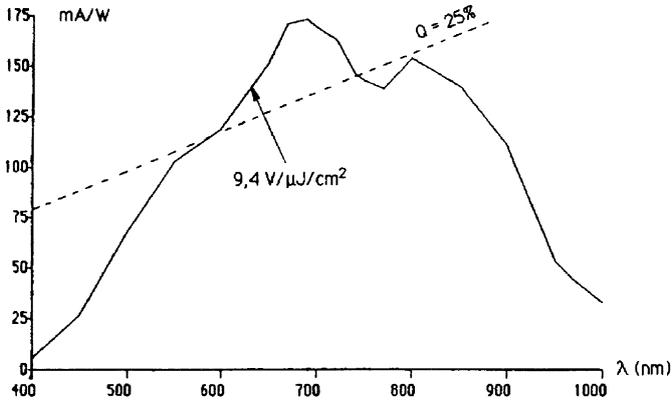
Le rendement quantique est défini par la relation suivante :

$$Q = \frac{\text{nombre de photoélectrons} / \text{pixels} / \text{s}}{\text{nombre de photons incidents} / \text{pixels} / \text{s}}$$

Le rendement dépend de la longueur d'onde du rayonnement reçu mais aussi de la technologie pour éclairer le CCD :

- puce épaisse éclairée par l'avant (rendement < 50 %),
 - puce amincie éclairée par l'arrière (rendement > 80 %),
- pour une bande spectrale couvrant 0,4 à 0,8 microns.

L'étendue spectrale de sensibilité du CCD est typiquement celle du silicium.



Réponse spectrale d'une matrice TH 7852.

La ligne oblique matérialise les lieux ayant un rendement quantique de 25 %.

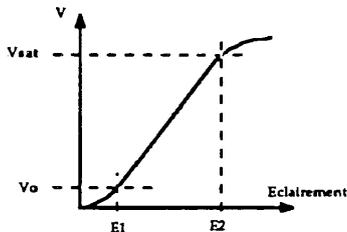
On voit que la réponse est tourmentée, c'est une caractéristique des CCD.

3.3. Linéarité

Si E est l'éclairement d'un détecteur photoélectrique et S le signal de sortie, ce détecteur sera linéaire s'il vérifie la relation de proportionnalité suivante :

$$S = k \cdot E$$

où k est une constante.



Courbe de réponse à l'éclairement d'un détecteur CCD.

On constate que la loi n'est plus vérifiée lorsque :

- on dépasse le seuil de saturation,
- l'éclairement est trop faible.

3.4. Le signal d'obscurité

Ce signal est dû aux charges engendrées dans le silicium suite à l'agitation thermique du réseau cristallin.

Les charges thermiques prennent aussi bien naissance dans les photoéléments que dans les registres de transfert (technologie identique). Leur nombre est directement proportionnel au temps d'intégration.

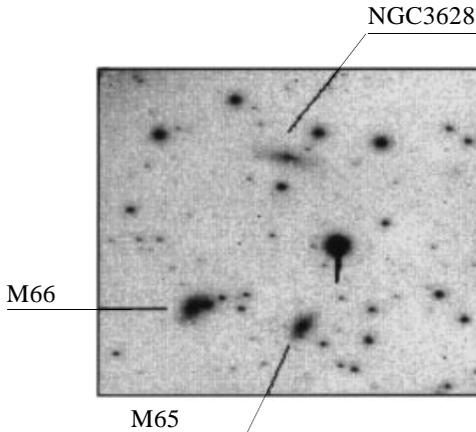
Pour une exposition durant plusieurs secondes il faudra refroidir le CCD (utilisation possible de *cellules Peltier*).

3.5. L'éblouissement

Il y a éblouissement lorsqu'on sature les pixels du CCD :

- Lors du transfert de charges une traînée peut apparaître du fait que les puits de potentiels ne peuvent être vidés en un ou plusieurs transferts. On appelle ce phénomène : le «*BLOOMING*», c'est souvent la signature d'une image CCD.

Il existe des CCD qui ont un système d'anti blooming (il suffit d'insérer un drain entre deux photoéléments pour évacuer le trop plein), c'est le cas de la matrice TH 7852.



4. L'ÉLECTRONIQUE ASSOCIÉE AU TH 7801

A titre indicatif nous présentons l'électronique associée à la Barrette TH 7801 que nous utilisons à l'OBSERVATOIRE de NARBONNE depuis 1985.

Elle comporte :

- un P.I.O. (Périphérique Interface Ordinateur) qui assure donc l'interface avec le B.U.S. de l'ordinateur sur 8 bits (8 lignes d'entrée-8 lignes de sortie-4 lignes de contrôle),
- un CONVERTISSEUR type SN 75365 (Texas Instruments), de signaux TTL délivrés par le P.I.O. en signaux M.O.S. compatibles (horloges),
- un AMPLIFICATEUR VIDÉO, HA 2620 (Harris) à forte impédance d'entrée dont le gain est réglé à 10 et monté en inverseur,
- un CONVERTISSEUR ANALOGIQUE-NUMÉRIQUE AD 570 (Analog Device) qui numérise le signal vidéo sur 8 bits (temps de conversion de 10 μ s. Le signal est envoyé sur le P.I.O. (broches P(B)) lequel réagit sur le C.A.N. (broches P(A2) et P(A3)) en donnant les ordres de début et de fin de conversion.

Un mot sur les horloges

Il est indispensable de disposer de deux horloges (phases) pour commander les diverses séquences de transfert des charges.

- *L'horloge de passage $\Phi(P)$:*

Assure le transfert en bloc des charges générées dans la ligne photosensible sur les registres latéraux.

- *L'horloge de transfert $\Phi(T)$:*

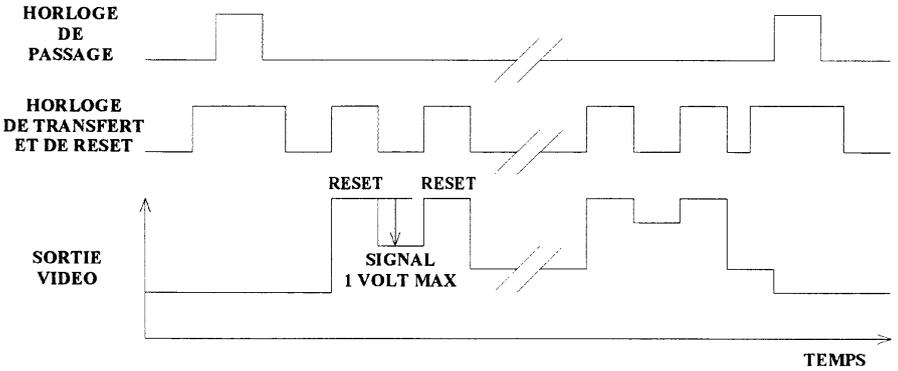
- Assure le transfert séquentiel jusqu'à l'étage de sortie. Cette horloge commande aussi la diode et sa remise au zéro après le passage de charge.

- Le front montant du signal d'horloge assure le transfert des registres de rang pair, le front descendant celui des registres de rang impair. Il y correspond donc seulement $1754/2 = 877$ tops d'horloge.

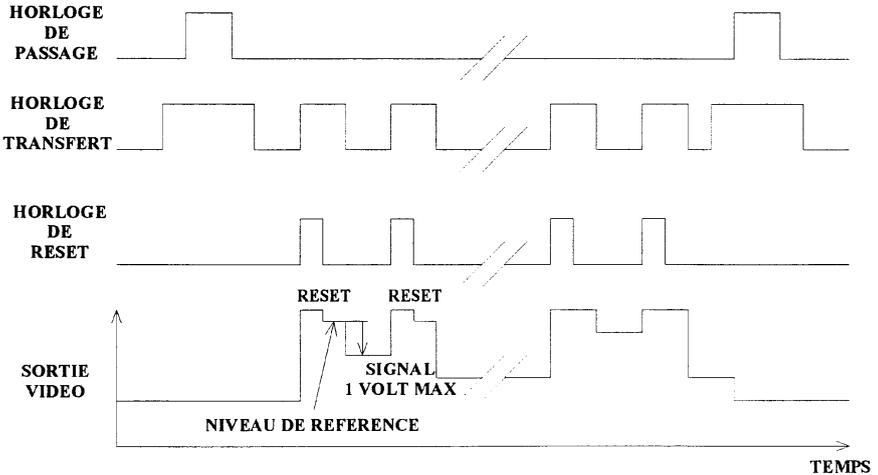
L'emploi d'un échantillonneur bloqueur

Le signal de sortie du CCD n'est pas très stable dans le temps. Si l'on numérise ce signal avec une grande précision (convertisseur

analogique numérique de 10 bits ou plus) il est nécessaire de bloquer celui-ci pendant la durée de la numérisation, grâce à un échantillonneur bloqueur. Par contre, avec un convertisseur analogique numérique de 8 bits, il est souvent possible de s'en passer. Si l'on remarque dans les images, des sauts brusques d'intensité entre deux pixels voisins, il faudra songer à en équiper sa carte de numérisation.



Chronographe de la barrette avec couplage de ΦT et ΦR .



Chronographe de la barrette sans couplage de ΦT et ΦR .

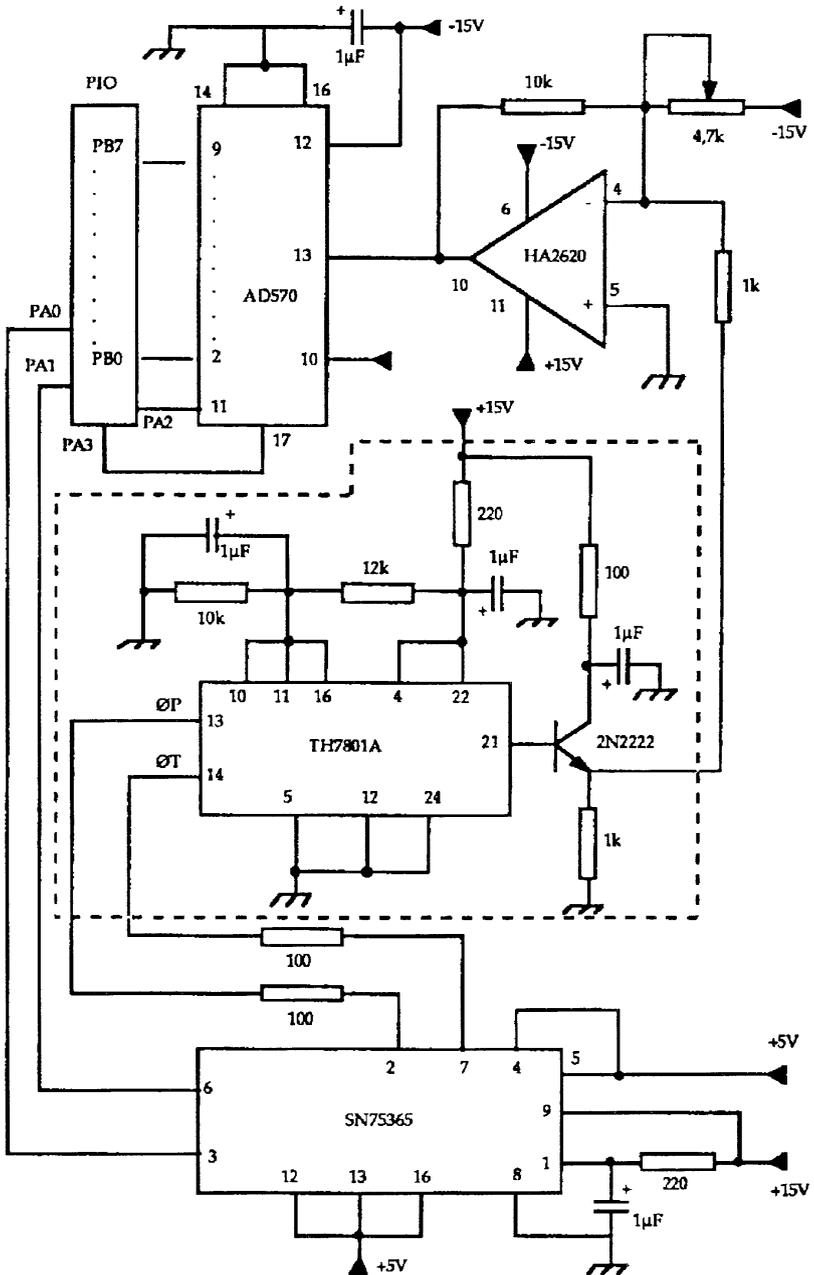


Schéma électronique.

5. LE TRAITEMENT INFORMATIQUE DES IMAGES

Les lignes ou les images prises par les CCD sont certes de grande qualité, mais lorsqu'elles sont brutes, c'est-à-dire lorsque l'on vient juste de faire leur acquisition, elles sont dégradées par la présence d'une fluctuation généralement aléatoire de faible amplitude mais de fréquence spatiale élevée. Cette fluctuation est appelée le bruit. Il trouve son origine dans tous les éléments servant à réaliser la prise de vue. Il peut donc provenir, soit de la turbulence (flou dans l'image dû aux différences de température dans l'atmosphère), soit du télescope (mauvais suivi, mauvaise mise au point), soit de la partie électronique. Le traitement des images brutes a donc pour objet principal la diminution du bruit dans les prises de vue.

Ensuite vient le traitement destiné à améliorer la qualité de l'image pour une meilleure interprétation.

La possibilité d'effectuer des traitements assez rapides des images constitue d'ailleurs une des supériorités des CCD par rapport à la photographie classique.

Les types de traitements possibles sont très variés. Ils peuvent aller de la simple soustraction jusqu'à l'utilisation d'outils mathématiques très évolués tels que la transformée de Fourier.

Nous ne traiterons dans cet article que les techniques de base du traitement d'image.

5.1. Les prétraitements de l'image

Les CCD présentent trois défauts :

- présence d'un bruit thermique (électrons d'origine thermique),
- différence de comportement de chacun des éléments photosensibles,
- défauts liés aux diverses optiques (fenêtre optique du CCD-lentilles).

Les deux premiers sont inhérents au capteur CCD, le troisième au système optique associé (Téléobjectif-télescope...). Tous peuvent être éliminés par des traitements informatiques.

- Pour éliminer le premier il suffit de réaliser, dans la nuit d'observation, des cartes d'obscurité. On les obtient en plongeant le CCD dans le noir et en l'exposant pendant un temps de pose égal à celui pratiqué sur les objets célestes. Sur ces prises de vue, la nébuleuse photographiée est absente, mais le bruit thermique est bien présent. La correction consiste donc à soustraire la carte d'obscurité à l'image de l'objet photographié.

- Pour corriger le second on fait une lecture du CCD immédiatement après son effacement en l'absence de lumière, (offset électronique). La correction consiste à soustraire cet offset de l'image brute.
- Pour éliminer le troisième on photographie une plage de lumière uniforme sur **tout** le CCD. On réalise alors une carte de sensibilité du CCD appelé **Flat Field**. Cette opération pourra être réalisée en photographiant le ciel en début ou fin de nuit sur une zone la plus uniforme possible. Pour corriger l'image on divise l'image brute par le flat field.

5.2. La visualisation des images

La baisse des prix des écrans analogiques de type VGA et SVGA permet actuellement de visualiser à l'écran des images de grande qualité sans trop de difficultés. Le nombre de niveaux de gris affiché par ces écrans est de seize en VGA et de soixante-quatre en SVGA. Il suffit de répartir ces niveaux entre les différentes intensités de l'image. Le choix de cette répartition permet de modifier le contraste et la luminosité des images.

Pour une barrette CCD, la ligne sera représentée sur un repère avec en abscisse la position du pixel et en ordonnée, son intensité.

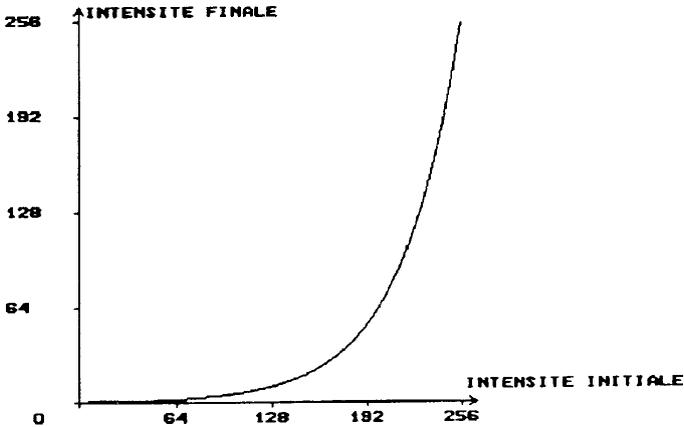
L'utilisation des ordinateurs permet d'accroître la variété des représentations possibles. On peut citer, par exemple, la représentation en trois dimensions dans l'espace, ou en courbes isophotes où sont tracées les lignes de niveau reliant les points d'égales intensités.

Pour améliorer la visualisation, il est aussi possible de programmer des zooms servant à grossir certaines parties d'une image, ainsi que des coupes photométriques permettant d'en voir le profil.

5.3. Les tables de transcodage

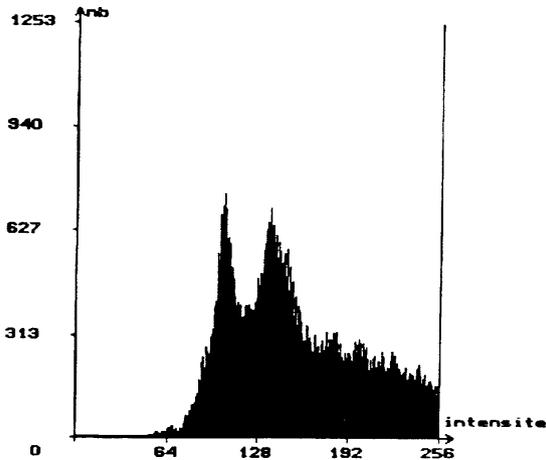
Les tables de transcodage ou LUT (Look Up Table) permettent d'améliorer la répartition lumineuse de l'image en augmentant ou diminuant l'intensité de certains pixels. Le principe de ce filtrage est d'affecter à tous les points une nouvelle intensité en fonction de celle qu'ils avaient avant le traitement. Il est possible de cette façon d'atténuer les zones trop lumineuses ou d'éclaircir les zones trop sombres. Il est courant de représenter une LUT par un graphe où sont portées en abscisse les intensités initiales et en ordonnée les intensités finales.

Par exemple voici une LUT au profil exponentiel assombrissant l'image avec un effet plus marqué pour les zones sombres :



5.4. L'histogramme

C'est un outil permettant d'avoir une version globale de la répartition lumineuse des pixels de l'image. Il se présente sous la forme d'un graphe où sont portées en abscisse toutes les intensités lumineuses possibles, et en ordonnée, le nombre de pixels possédant cette intensité. Cet outil est très utile pour améliorer la luminosité et le contraste d'une image car il permet de faire un choix de répartition des niveaux de gris. Il peut aussi guider notre choix pour l'application d'une table de transcodage adéquate. En voici un exemple :



Cet histogramme provient d'une photographie de la Lune. Les premiers points sur la gauche sont ceux du fond du ciel. Le pic isolé sur la droite correspond aux pixels saturés. Ici on pourra améliorer la luminosité et le contraste de l'image en répartissant les niveaux de gris entre les valeurs 74 et 254.

5.5. Les méthodes de filtrage par convolution

Les filtres utilisant la technique de convolution permettent de réaliser plusieurs types d'opérations telles que le filtrage passe-haut ou le filtrage passe-bas.

La convolution est, en fait une moyenne pondérée des pixels voisins d'une image. On utilise une matrice de convolution carrée de trois pixels de côté. Par exemple :

$$\begin{array}{ccc} 2 & 5 & 2 \\ 5 & 10 & 5 \\ 2 & 5 & 2 \end{array}$$

Cette matrice est déplacée sur tous les points de l'image. Par exemple à un instant donné la matrice est placée sur les points dont les intensités sont les suivantes :

$$\begin{array}{ccc} i1 & i2 & i3 \\ i4 & i5 & i6 \\ i7 & i8 & i9 \end{array}$$

On calcule, alors la nouvelle intensité du pixel central $i5$ en faisant la moyenne des neuf points pondérée par le coefficient correspondant de la matrice :

$$i5 = \frac{2 \times i1 + 5 \times i2 + 2 \times i3 + 5 \times i4 + 10 \times i5 + 5 \times i6 + 2 \times i7 + 5 \times i8 + 2 \times i9}{38}$$

Le traitement est identique pour les lignes CCD en provenance d'une barrette, mais en utilisant une matrice de taille 3×1 .

Voici un exemple de matrice pour un filtrage passe-bas :

$$\begin{array}{ccc} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 16 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{array}$$

Et une matrice pour un filtrage passe-haut :

$$\begin{array}{ccc} 0 & -1 & 0 \\ -1 & 20 & -1 \\ 0 & -1 & 0 \end{array}$$

Les filtres passe-bas enlèvent les hautes fréquences spatiales et par conséquent le bruit d'une image, mais ils ont tendance à en enlever les fins détails.

Les filtres passe-haut permettent de révéler les fins détails d'une image planétaire, mais ils ont le défaut d'en augmenter le bruit.

Il est parfois nécessaire de réaliser des convolutions avec des matrices de grandes dimensions. Malheureusement les temps de calcul deviennent vite prohibitifs. Une solution possible est de réaliser le filtrage en deux temps avec une matrice unidimensionnelle (dimensions $1 \times N$). Ceci n'est possible qu'avec des matrices ayant le même effet suivant les deux axes. Il est alors possible de réaliser le filtrage suivant l'axe des abscisses, puis suivant l'axe des ordonnées. Par exemple, la convolution grâce à une surface gaussienne, s'adapte parfaitement à ce genre de traitement. De plus ces effets sont remarquables en traitement d'image. En choisissant une largeur de matrice assez grande, l'image se trouve très fortement lissée. Le profil de la matrice se calcule grâce à la formule suivante, où σ représente la largeur de la fonction à mi hauteur :

$$z = \exp\left(\frac{-X^2}{2\sigma}\right)$$

5.6. Le filtrage statistique

Le principe de ce filtre est de comparer tous les pixels de l'image, ou de la ligne CCD avec ses voisins immédiats. Par exemple si les intensités sont les suivantes :

$$\begin{array}{ccc} 0 & 233 & 152 \\ 11 & 85 & 41 \\ 1 & 255 & 21 \end{array}$$

On trie les intensités par ordre croissant :

$$0 \quad 1 \quad 11 \quad 21 \quad 41 \quad 85 \quad 152 \quad 233 \quad 255$$

Puis selon le type de filtre, le pixel central prendra la valeur de l'une des positions dans ce classement.

Pour un filtre médian il prendra la valeur du milieu, soit 41. Ce filtre a pour effet d'éliminer les pixels ayant des valeurs anormales par rapport à leurs voisins immédiats. Il peut donc être utilisé pour atténuer le bruit d'une image.

Pour le filtre d'érosion le point central prendra la valeur la plus basse, soit ici 0. Ce filtre a pour effet d'éliminer lui aussi le bruit de façon efficace, mais il amincit les objets photographiés. Pour corriger cet effet secondaire un filtre de dilatation est utilisé. Pour ce filtre l'intensité la plus forte du classement est choisie, soit ici 255. Les objets retrouvent alors leur forme originale.

Le domaine du traitement d'image est très vaste et assez ardu à un certain niveau, mais si vous aimez l'astronomie et la programmation, il est très riche en enseignements et procure beaucoup de plaisir. Sa seule limite est l'imagination du programmeur.

6. LES CCD AU LYCÉE

Les dispositifs à transfert de charges (D.T.C.) ou CCD représentent actuellement le capteur photoélectrique le mieux adapté aux travaux mettant en jeu des photons destinés à constituer une image et à la traiter.

Notre équipe au Lycée Diderot (Narbonne), les utilise depuis 1985 date à laquelle nous avons déposé un projet d'action éducative destiné à construire une caméra CCD devant équiper notre télescope de 318 mm. Nous devons d'avoir réussi ce P.A.E. à Christian BUIL qui le premier en France comprit et résolut tous les problèmes liés à la commande des DTC. Il continue à encourager nos travaux actuels et c'est à lui que nous nous sommes récemment adressés afin de concrétiser au mieux cette volonté d'introduire ce type de capteur dans notre enseignement tant au niveau du cours que des travaux pratiques.

Deux types de capteurs sont disponibles sur le marché :

– *La barrette CCD (type TH 7801)*

dont la géométrie linéaire est particulièrement bien adaptée à l'analyse spectrale par exemple ou bien à la mise en forme de la lumière diffractée

sur un bord d'écran ou par les fentes de Young. La carte qui l'accompagne est relativement simple à construire (nous l'avons fait) et le logiciel simple d'emploi compte tenu du nombre peu important de pixels mis en jeu. Dans notre montage 140 des 1 728 pixels (donc seulement le centre de la barrette) sont utilisés pour réduire le temps d'acquisition. La barrette exige de réaliser un balayage de détecteur si l'on souhaite construire une image bidimensionnelle.

– *Le matrice CCD (type TH 7851)*

offre une surface collectrice permettant l'acquisition d'une image en temps réel avec un programme de gestion bien sûr plus complexe. Associée à un dispositif de refroidissement par cellule PELTIER elle permet des applications nécessitant des temps de pose plus importants. L'effet Peltier peut à son tour constituer un exemple intéressant de travaux pratiques sur le refroidissement d'éléments électroniques en vue de réduire le bruit de fond thermique. C'est la grandeur de la surface collectrice utile, liée au nombre de pixels concernés, qui conditionne la complexité des circuits annexes et du logiciel d'acquisition et de traitement.

Dans notre domaine de travail extra-scolaire (astronomie) nous utilisons les deux types de capteurs selon la manipulation en cours. Nous venons d'équiper récemment notre observatoire d'une CAMÉRA LYNX PC, importée des U.S.A., avec laquelle nous constituons un catalogue d'objets (objets de Messier-NGC-IC). Nous sommes agréablement surpris par les performances de la caméra et par sa simplicité d'utilisation. Elle nous permet une excellente initiation aux méthodes modernes sur l'imagerie numérique utilisées dans les grands observatoires professionnels.

Nous sommes convaincus que l'utilisation des capteurs CCD, avec toutes les qualités qui leurs sont associées (sensibilité - dynamique-bande spectrale - rapidité de la réponse - linéarité - pouvoir de résolution) offrira des possibilités nouvelles, plus actuelles, à notre enseignement des Sciences.

7. EXEMPLES DE TRAVAUX PRATIQUES À PARTIR D'UNE BARRETTE CCD

Le banc d'optique

Nous opérons sur un banc d'optique constitué d'un profilé d'Aluminium récupéré chez un concessionnaire «menuiserie aluminium». Il est équipé d'une glissière en queue d'aronde particulièrement

bien adaptée à l'alignement optique des divers dispositifs. On peut aussi se faire offrir par la même occasion des éléments correspondants à ces glissières : ils seront destinés à fixer le matériel nécessaire. Une vis de blocage à six pans creux permet d'assurer un excellent blocage en translation des différents éléments.

La source de lumière

Ce sera bien sûr un laser. Le laser Jeulin convient parfaitement bien. Il sera monté sur le rail et deux équerres latérales permettront de disposer de deux vis pour l'alignement fin du faisceau.

Le support de l'objet diffractant

Les objets diffractants sont les diapositives commercialisées par Jeulin (Simples fentes - Doubles fentes - Trous - Réseaux - Trames...). Il est indispensable de leur offrir un support stable et réglable micrométriquement en translation.

Nous avons utilisé un palmer offert par mes collègues de l'Atelier du L.E.P. modifié en conséquence afin qu'il puisse remplir la fonction. Un support en P.V.C a été fixé sur la mâchoire mobile du palmer. La mâchoire fixe étant solidaire du banc. La vis micrométrique assurant le positionnement rigoureux de l'objet diffractant.

La sensibilité du CCD exige une telle précision si l'on souhaite visualiser des figures de diffraction et d'interférences conformes aux calculs.

Le capteur CCD

Monté dans un boîtier avec son préamplificateur il doit être parfaitement aligné lui aussi sur la figure de diffraction. Les deux rangées de pixels de $2 \times 13 \mu\text{m}$ ne laissent pas trop le choix. Nous avons sacrifié un boîtier reflex (Olympus OM 10) afin d'exploiter le miroir mobile. Le réglage de la barrette est sérieusement facilité ! Il exige quelques talents de bricolage malgré tout. L'ensemble y gagne aussi en esthétique.

L'interface

Dans l'ordinateur (PC), sur un slot d'extension 8 bits. Elle exige quelques connaissances en électronique pour être conçue et réalisée dans un lycée (gravure double face).

Le logiciel de pilotage

Il a été conçu par un ancien élève de Terminale E (Philippe MARTINOLE) dans le cadre du Club Astro M11, ainsi que les différentes fonctions de traitement du signal.

Les résultats

Ils se présentent sous forme d'enregistrements issus des divers pixels (2×877) dont l'intensité fournie est directement proportionnelle à l'éclairement incident reçu.

Les dimensions du pixel $13 * 13 \mu\text{m}$ permettent une mesure aisée de l'interfrange i et d'en déduire par exemple la longueur d'onde correspondante du laser à condition de connaître D (distance des fentes au capteur CCD) et a (la distance entre axe des fentes).

Connaissant λ on peut en déduire aussi la largeur des fentes si elle est inconnue !

Les fonctions de lissage sont alors bien pratiques pour le repérage des maxima d'intensité (voir : applications § 8.1.).

– Des lumières ambiantes trop fortes vont bien sûr nuire à la qualité des enregistrements.

Groupes en T.P.

Le dispositif décrit ci-dessus peut être réalisable pour huit groupes de T.P. pour une dépense d'environ 2 500 F. par groupe à condition que le laboratoire prenne en charge quelques travaux de bricolage.

Il peut permettre la mise en place de deux T.P. sur l'optique ondulatoire en classe de Première S et doit permettre d'illustrer aussi certaines options de physique et de chimie (spectrométrie par exemple : avec la capture d'un spectre et son étalonnage à partir d'un spectre de référence).

Les capteurs CCD peuvent aussi être destinés à la photométrie et à la photographie (en entraînant en translation le capteur par un petit moteur de tournebroche), et en réalisant l'acquisition ligne par ligne de l'image). On peut imaginer travailler sur les anneaux de Newton non plus sur une section, mais sur une surface !

Nous avons ainsi réalisé de jolis clichés lunaires. Pour le fond de ciel la matrice CCD refroidie est beaucoup plus performante.

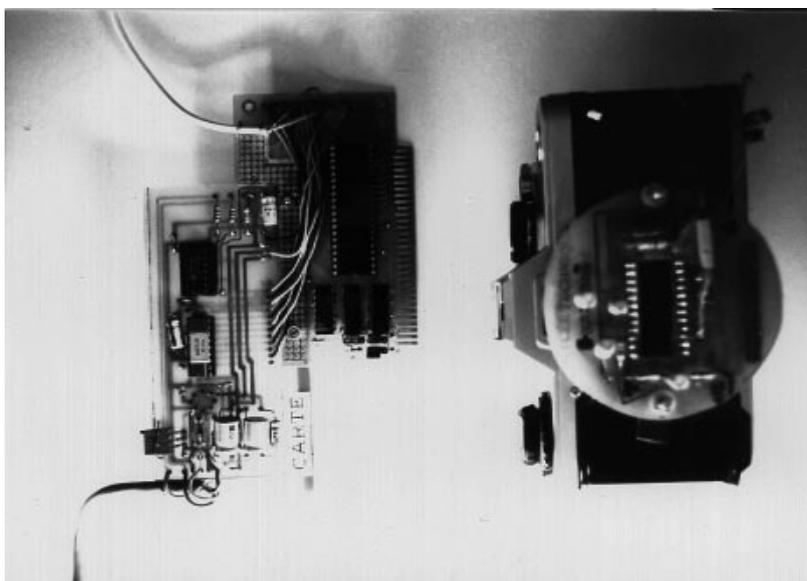
Concrètement

Un récent entretien avec Patrick MARTINEZ nous permet d'envisager la construction en petite série d'un ensemble équipé d'une barrette

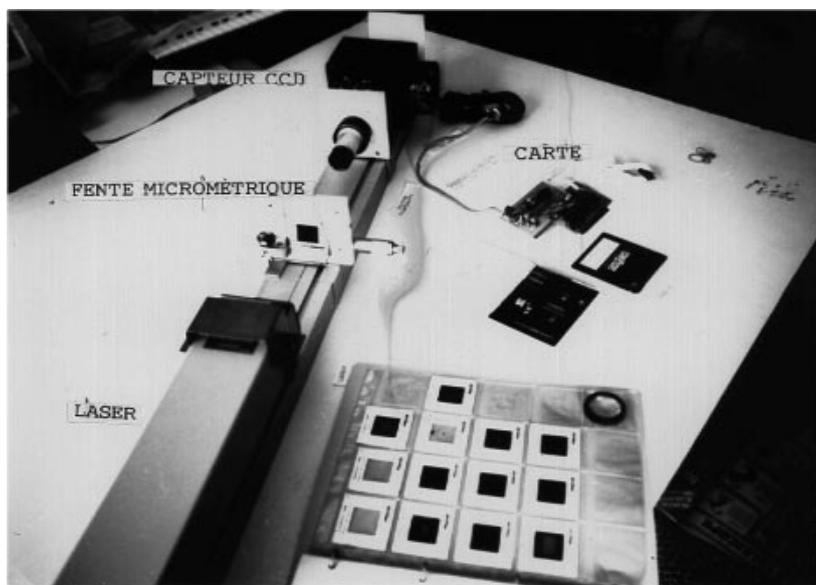
CCD et de sa carte de numérisation. Il travaille sur deux propositions qui semblent correspondre à notre attente.

– une caméra CCD à barrette avec sa carte et son logiciel d'acquisition et de traitement particulièrement adaptée à toutes nos expériences d'optique (diffraction - interférences - spectrométrie - photométrie...) nous a été proposée pour un prix approximatif de 2 500 F. nous permettant d'envisager huit groupes de T.P.,

– une caméra CCD à matrice avec sa carte et son logiciel permettant de travailler directement sur des images 2D, pourrait être aussi envisagée mais avec prix de revient plus élevé et non communiqué (il dépend des options que nous souhaiterons y inclure).



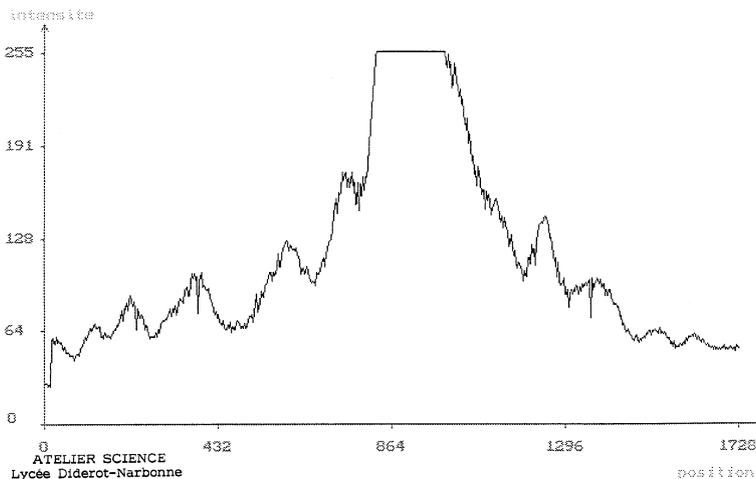
Dispositif expérimental réalisé à l'Observatoire de Narbonne-Club Astro M11 Lycée Diderot : Carte de numérisation-Barrette CCD 7801 montée sur boîtier photographique. Le banc d'optique et accessoires.



8. EXEMPLES D'APPLICATION

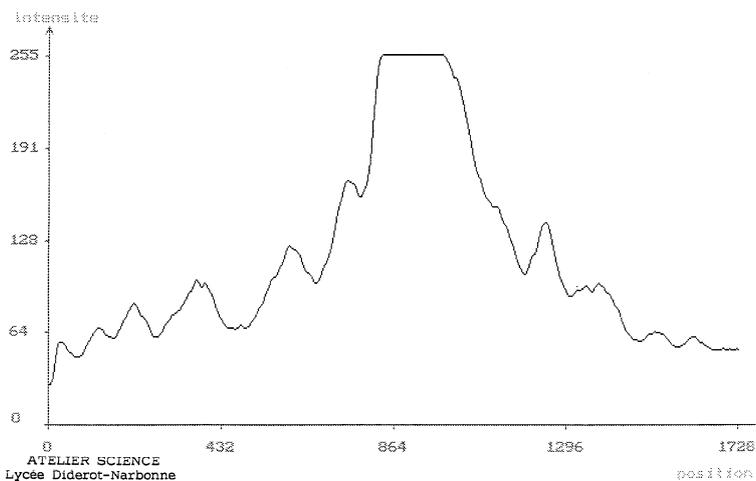
8.1. Interférences et diffraction

Exemples de résultats acquis avec le matériel décrit au § 7.



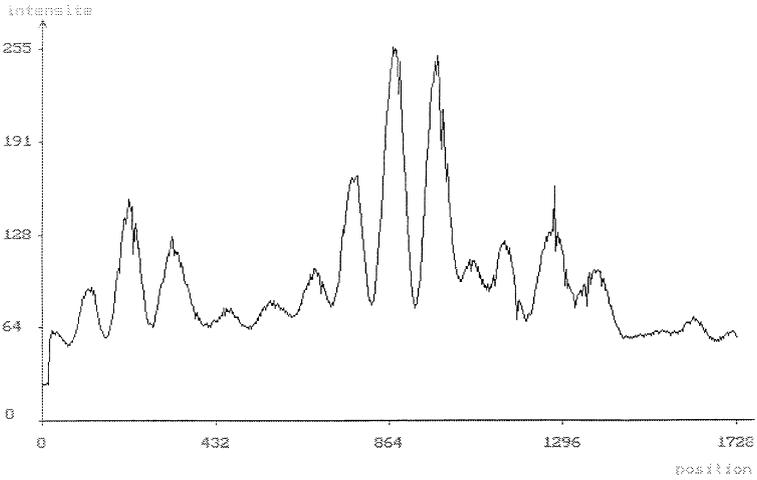
Diffraction par une fente [1]

Image brute avec pic central saturé pour faire mieux apparaître les maxima secondaires.



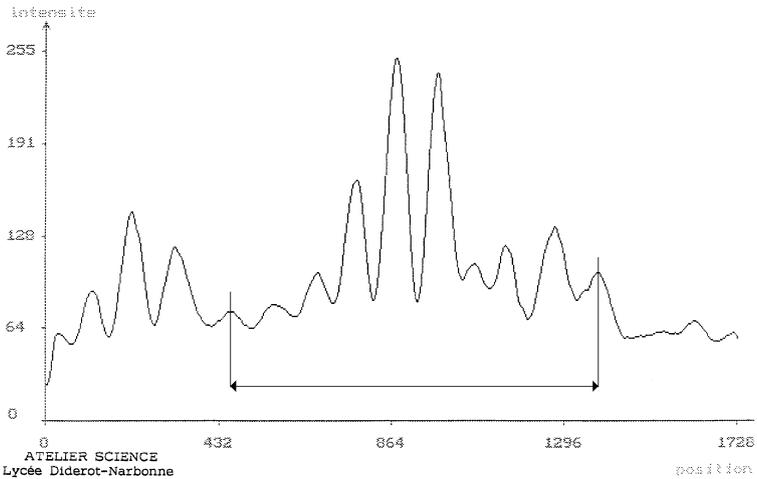
Diffraction par une fente [3]

Suite de sept traitements de lissage gaussiens (filtre passe-bas).



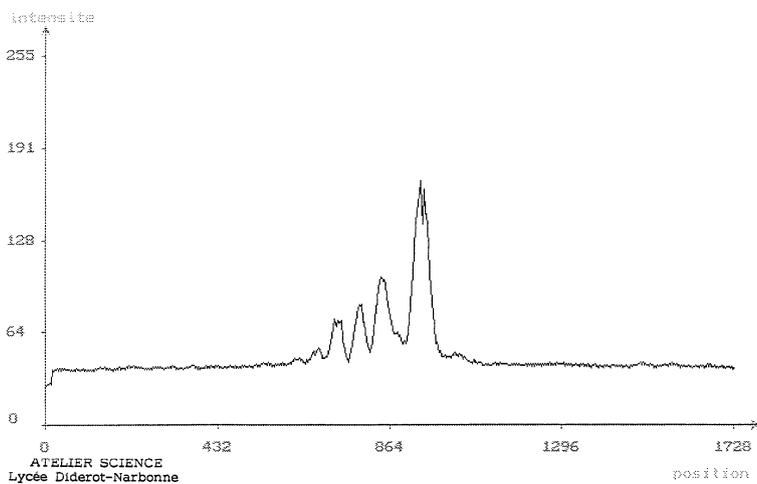
Fentes de Young : Interférences [1]

Image brute de saisie : la modulation par la diffraction des deux fentes est bien visible.



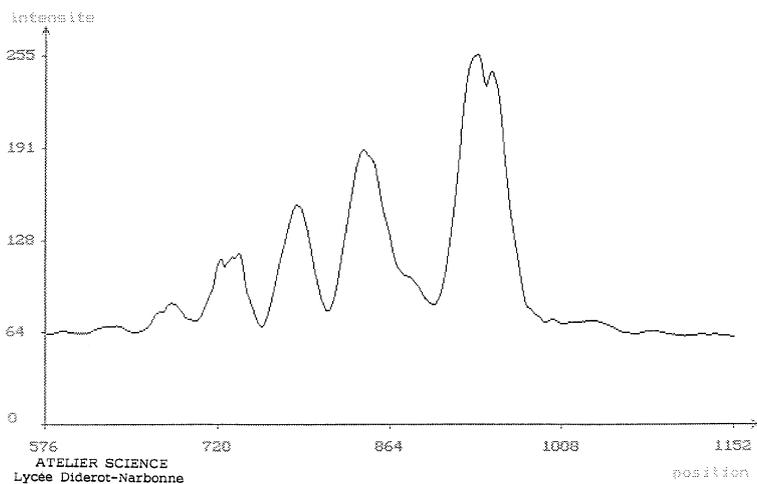
Fentes de Young : Interférences [2]

Traitement par un lissage gaussien (filtre passe-bas).



Diffraction par un bord d'écran [1]

Résultat global sur l'ensemble des 1 728 pixels.



Diffraction par un bord d'écran [3]

Utilisation d'une fonction de lissage (fonction Gauss - filtre passe-bas).

8.2. Exemple d'application quantitative

Mesure de la longueur d'onde émise par le laser Jeulin.

8.2.1. Mesure de la distance : (a) entre deux fentes (diapositives Jeulin)

Par projection de l'image des deux fentes sur un écran la mesure de p et p' puis de a' image de a sur l'écran on déduit (la distance a' étant mesurée axe à axe pour chacune des images des fentes avec une simple règle millimétrique collée sur l'écran par exemple :

$$a = a' \cdot p/p$$

Fente 1	$a = 0,24$ mm
Fente 2	$a = 0,32$ mm
Fente 3	$a = 0,44$ mm
Fente 4	$a = 0,48$ mm

8.2.2. Mesure de l'interfrange d'interférence : (i)

La fente utilisée pour le T.P. est la fente n° 4 qui donne interfrange $i = \lambda D/a$ la plus petit.

Le support des fentes est disposé à $D = 1$ mètre du plan de la barrette CCD qui joue le rôle d'écran de projection des franges d'interférence.

On mesure par exemple sur l'enregistrement fourni, neuf franges consécutives «propres» (on remarquera que les franges d'interférence équidistantes sont modulées par des franges de diffraction).

Un curseur sur le logiciel permet le repérage des maxima, sinon un simple double décimètre permet aux élèves le calcul de i :

$$1728 \text{ pixels} \rightarrow 126 \text{ mm (sur enregistrement à l'échelle 1)}$$

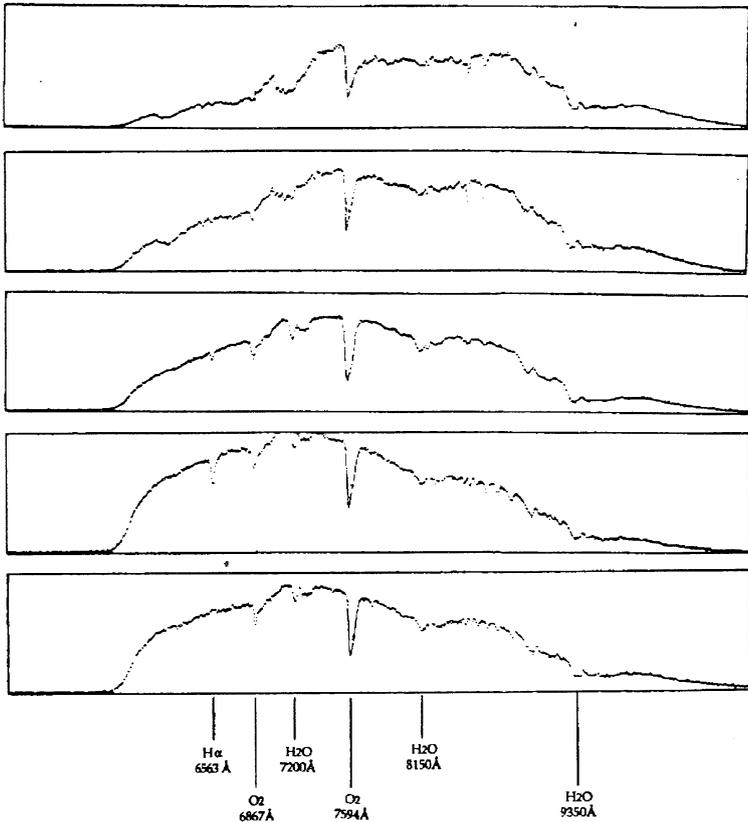
$$9 i = x \text{ pixels} \rightarrow 68 \text{ mm} \rightarrow x = 1728 \times 68 / 126 = 911 \text{ pixels de } 13 \mu\text{m} = 11,84 \text{ mm}$$

$$d'où \text{ l'interfrange : } i = 11,84 / 9 = 1,32 \text{ mm}$$

$$\text{et la longueur d'onde : } \lambda = i \cdot a/D = 1,32 \times 0,48 = 0,6338 \text{ mm} = \mathbf{633,8 \mu\text{m}}$$

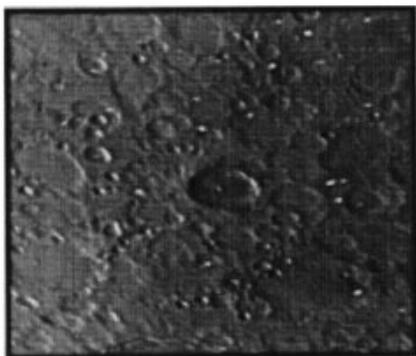
*** Valeur donnée par le constructeur : $\lambda = 632,8 \mu\text{m}$ soit moins de 1 % d'erreur !**

8.3. Spectrométrie stellaire (Christian BUIL)

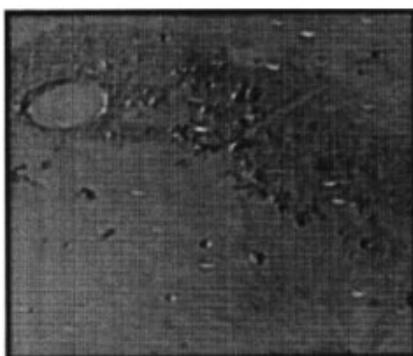


Région infrarouge de quelques spectres d'étoiles.

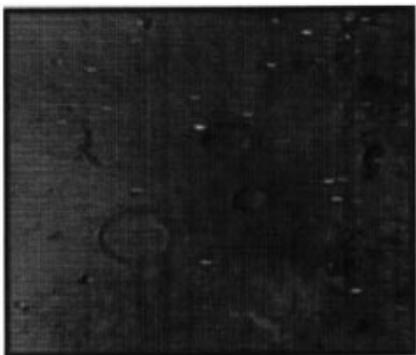
De haut en bas : Bételgeuse (type M2), Aldébaran (type K5), le Soleil ou plus précisément, mais ça revient presque au même, la Lune (type G2), Altaïr (type A7) et Rigel (type B8). Les échancrures les plus marquées dans ces spectres sont provoquées par des constituants de l'atmosphère terrestre (H $_2$ O et O $_2$ pour l'essentiel). On enregistre la présence de la série de Paschen (hydrogène) à partir de 8 500 Å dans le spectre des étoiles de type A et B. Ces spectres ne sont pas corrigés radiométriquement (spectres bruts).



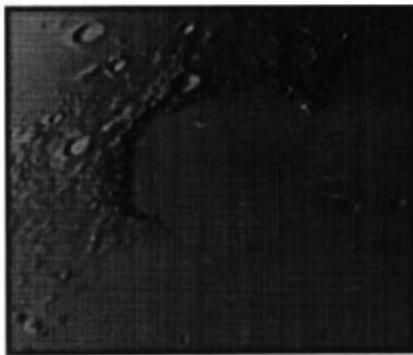
TYCHO



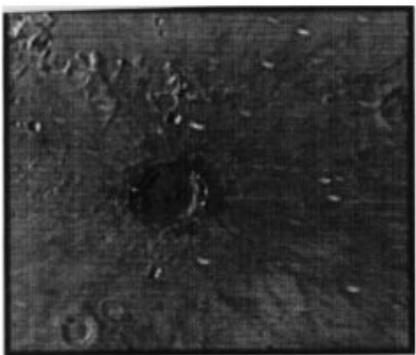
PLATON



ARCHIMEDE



BAIE DES SINUS

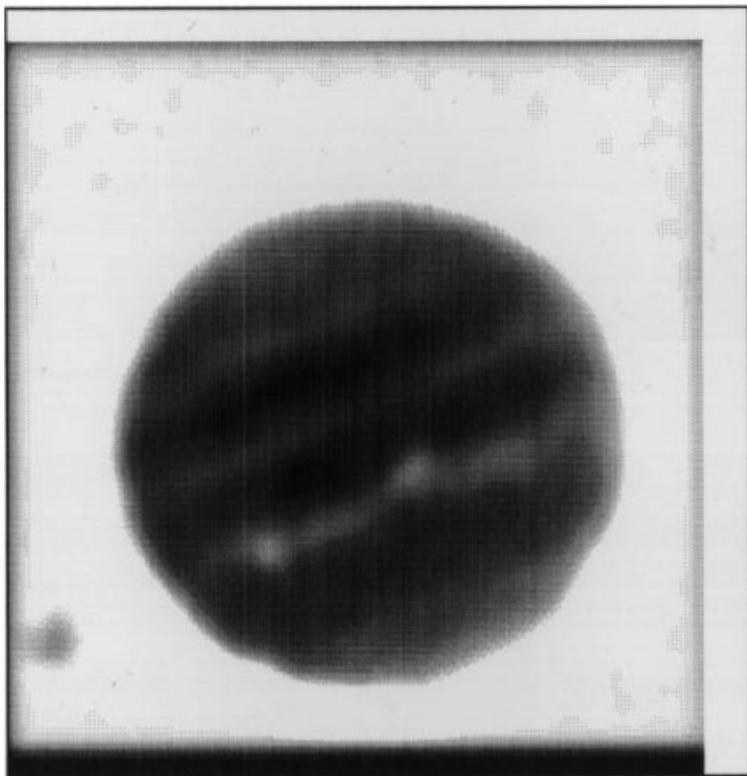


COPERNIC



THYCO

FOYER DU C8



Jupiter au foyer du Meade

F=2500 F/D=10

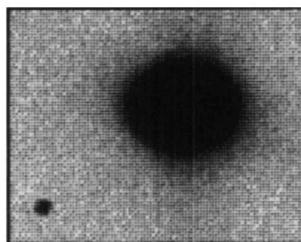
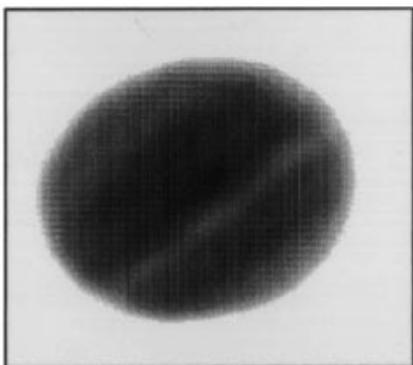
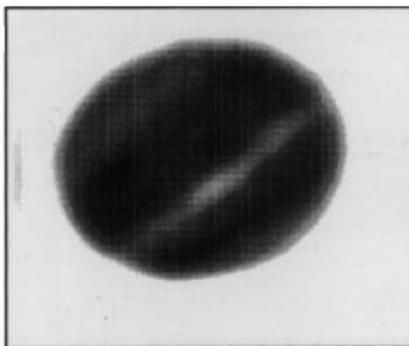
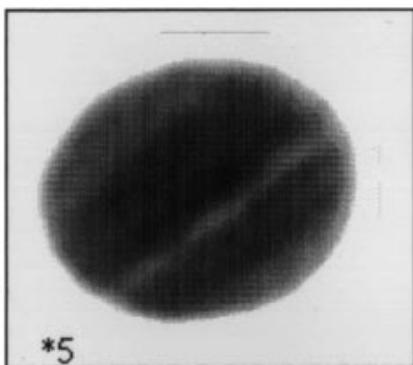
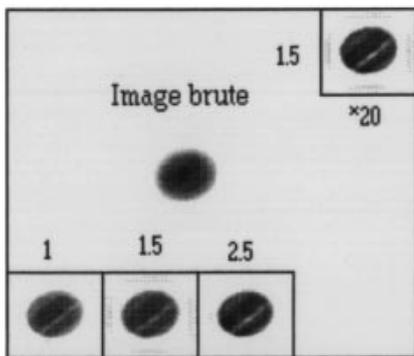


Image brute Mult 1000



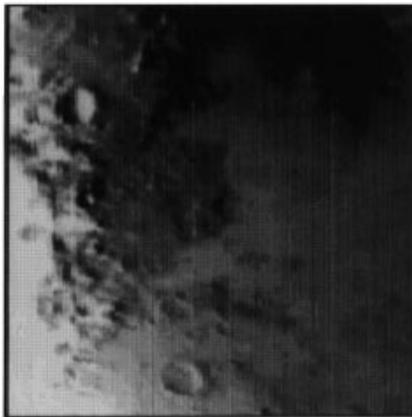
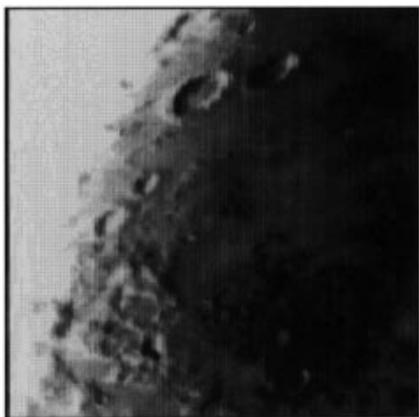
MASQUE FLOU *10

JUPITER

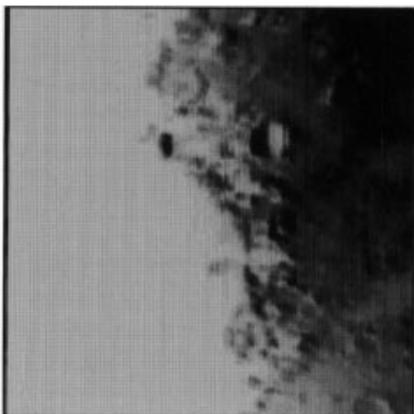
CAMERA CCD LYNXX 192*165

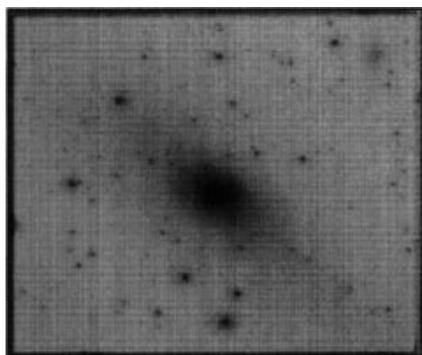
318 F/D6

0.01s + occultation

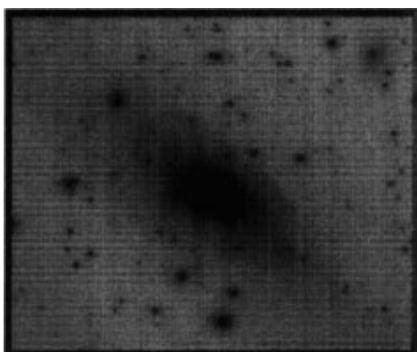


Barette CCD TH7801 PH. MARTINOLE Observatoire de Narbonne 1993

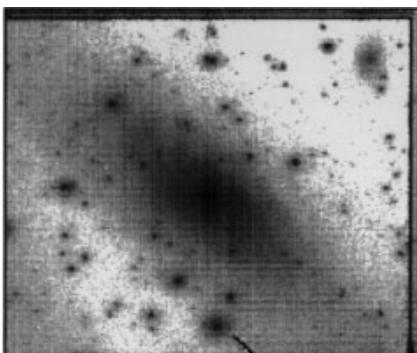
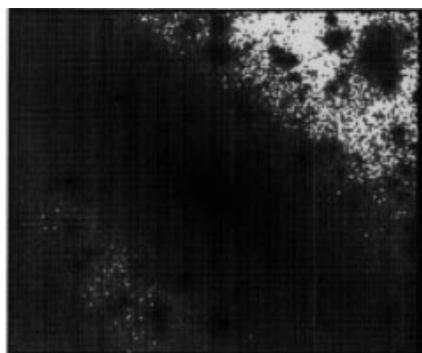
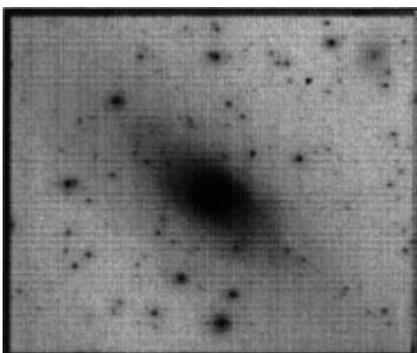
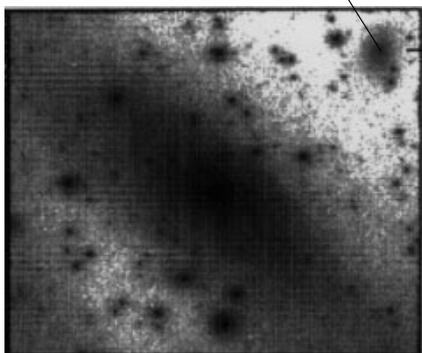




M110



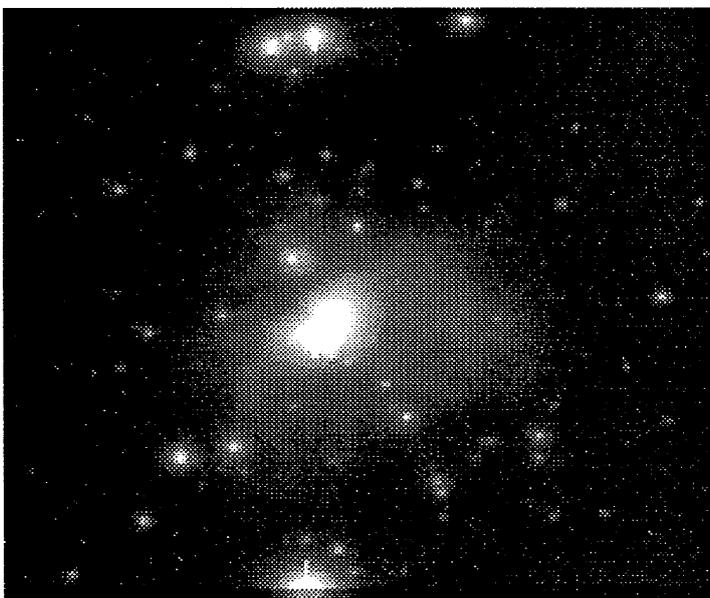
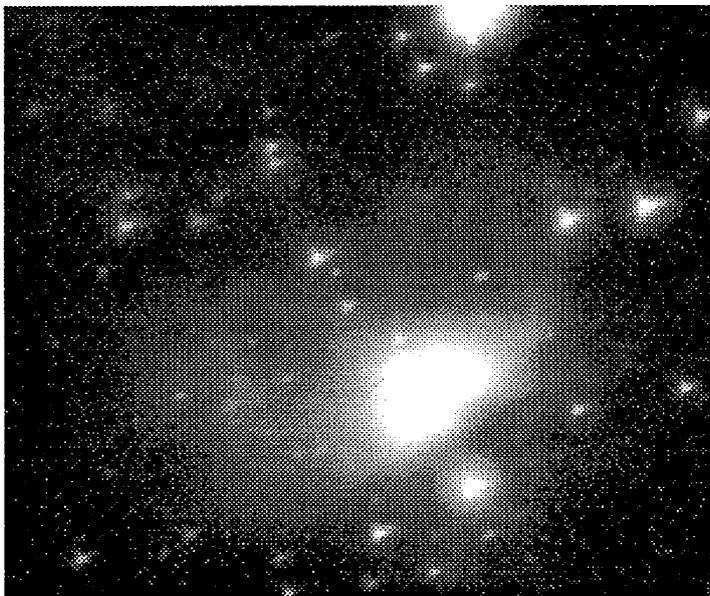
M31



M32

CAMERA CCD LYNXX
Pose de 100s + 40s avec un objectif de 135mm

8.4. Imagerie numérique



BIBLIOGRAPHIE

- [1] Christian BUIL - Astronomie CCD, Société Astronomie Populaire, Avenue Camille Flammarion - 31500 Toulouse.
- [2] MM. BERGER, BLAMOUTIER, COUTURE et DESCURE - Les dispositifs à transfert de charges, Revue Technique, Thomson C.S.F.
- [3] MM. KRISTIAN et BLOUKE - Pour la Science, décembre 1982, Les DTC en Astronomie.
- [4] M. SANTINELLI - Électronique applications, (n° 33 et 34) les DTC.
- [5] M. SYBEX - Le traitement d'image, 1989.

INTERVENANTS**L'observatoire de Narbonne** (voir B.U.P. n° 746)

Il fut créé en 1981 en parallèle avec le Club Astro M11 du Lycée Diderot de Narbonne et actuellement avec son ATELIER SCIENCE, s'est donné pour objectif d'initier les jeunes à la Recherche et aux techniques modernes de l'astrophysique. Les CCD ont donc constitué un excellent terrain d'entraînement et trouvent aujourd'hui des applications fort variées mais exigent quelques compétences en électronique et informatique. Nous proposons quelques travaux permettant de les faire entrer dans notre enseignement en Première et Terminale.

REMERCIEMENTS

Les travaux présentés, ainsi que le présent article, ont été réalisés avec la collaboration de trois anciens élèves de Terminale E du Lycée Diderot (Promotion 88/89) actuellement membres actifs du Club Astro M11, de l'Atelier Science et de l'Observatoire Astronomique de Narbonne :

Messieurs Pascal AYMERIC (Trésorier de l'A.N.A.P.), Philippe MARTINOLE (Président A.N.A.P. 91/92) et Yves MORAND (membre A.N.A.P.).

Qu'ils soient tous trois remerciés et félicités pour leurs compétences et leur dévouement au développement de notre Observatoire astronomique amateur.

Christian BUIL : *ingénieur opticien* au C.N.E.S. (Toulouse).

Astronome amateur s'est spécialisé dans l'observation des météores puis dans les caméras CCD ; il restera à jamais celui qui les a mis à la disposition des astronomes amateurs il y a une dizaine d'années. Après avoir fait ses premiers essais sur les barrettes, il maîtrise parfaitement le pilotage des matrices avec lesquelles il est le découvreur de quatre supermonae. Il est le coauteur d'un logiciel de traitement d'images MIPS particulièrement performant. Il est enfin l'organisateur de stages de formation sur les CCD, et auteur d'un ouvrage, hélas épuisé, «astronomie CCD» qui fait référence en la matière à ce jour.

Patrick MARTINEZ : *ingénieur* titulaire d'un DEA d'astrophysique.

Directeur de la Formation et de la Recherche à Sup Aéro et professeur d'électronique. Astronome amateur d'abord passionné d'astrophotographie il se lance dans la conception de caméras CCD et de logiciels de traitements d'images (PRISM). Redécouvreur au niveau amateur de la comète HALLEY en 1986 il est l'auteur de trois ouvrages de référence en astronomie. Son quatrième «Guide Pratique de l'Astronomie CCD» vient de paraître. Il conçoit actuellement un matériel destiné aux travaux pratiques.

Les collègues intéressés par ce type de matériel pourront contacter
J. CAZENOVE - Lycée Diderot - 2, rue Jean Moulin - 11100 NARBONNE.