

14ème Congrès de la Société Internationale de Photogrammetrie-HAMBOURG 1980

GROUPE DE TRAVAIL : V/3

Communication :

D. B I Z E

DEPARTEMENT D'ETUDES ET RECHERCHES EN OPTIQUE

O.N.E.R.A. - C.E.R.T.

2, Avenue Edouard Belin - 31055 TOULOUSE CEDEX

METROLOGIE DES BARRETTES C.C.D.

(Measurement automatic system for C.C.D. characterisations)

SUMMARY :

For the SPOT-CNES Satellite (Earth remote sensing), an optoelectronic camera is realised with C.C.D. linear sensors (Charge Coupled Devices). To know the real possibilities, we have attempted to define the characteristic parameters of these detectors and realised an automatic system for the measurement of their parameters. Results and graphs are presented for discussion on the future and the limitations of this technology.

1 - DESCRIPTION DE LA BARRETTE C.C.D.

Les détecteurs C.C.D. sont des systèmes où tous les éléments réalisant la prise de vue se trouvent intégrés sur un même support. Le principe de base consiste à stocker les électrons issus de la transformation des photons du rayonnement dans des puits de potentiel créés en surface d'un semiconducteur dopé et à transférer ces charges par paquets par translation du minimum de potentiel le long du barreau semiconducteur. Ces potentiels étant produits par application d'une tension sur les électrodes formées sur la surface isolante couvrant le semiconducteur.

Le système de détection choisi pour le satellite SPOT est la barrette 122 DC FAIRCHILD. C'est une ligne de 1728 senseurs au Silicium de 13 μm de côté, séparés par des canaux d'arrêts diffus et recouverts par une couche de SiO_2 . Les photons traversent cette couche semi transparente et sont absorbés par le Si monocristallin créant des paires d'électrons trous. La barrette C.C.D. est associée à une carte électronique comportant les circuits d'horloge et l'étage amplificateur vidéo (Fig. 1 - Bloc diagramme).

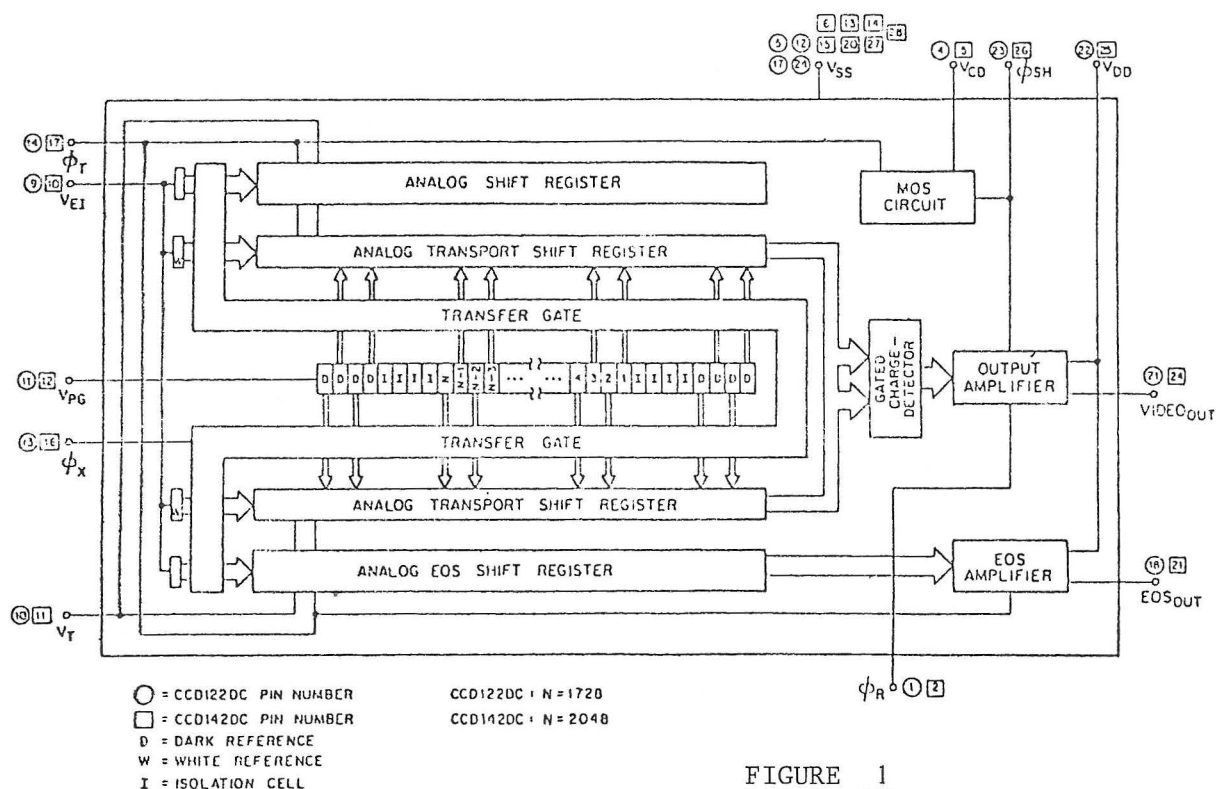


FIGURE 1

2 - DESCRIPTION DU BANC DE MESURES

Le banc d'étalonnage des barrettes C.C.D. a été élaboré de manière à pouvoir tester rapidement un grand nombre de barrettes. De ce fait, l'automatisation a été poussée au maximum. On y distingue la partie optique et la partie acquisition automatique.

2.1. - Montage optique :

Il comprend trois sources d'éclairage :

a) une sphère intégrante associée à une lampe halogène à filament de tungstène. Entre la source et la sphère peuvent être placés des filtres. Le niveau d'éclairement se règle par l'intensité d'alimentation de la lampe. L'uniformité du flux en sortie de la sphère est mieux que 0,5 %.

b) un monochromateur Jobin Yvon HR 1000.

c) une source identique à celle de la sphère mais associée à une fente de largeur réglable et à une optique de reprise, afin d'obtenir une image de l'ordre d'une dizaine de microns.

Ces trois sources sont réglées et disposées sur un long banc optique et pour les différentes mesures que l'on se propose d'effectuer, seule la platine supportant la barrette C.C.D. et son électronique est translattée en face des sources désirées.

2.2. - Acquisition automatique :

L'élément principal de la chaîne d'acquisition est un voltmètre échantillonneur qui permet l'analyse individuelle du signal vidéo de chaque élément détecteur. Ce voltmètre est piloté par un calculateur de 64 Koctets. La conversation entre le voltmètre et ce calculateur permet de choisir avec précision le photo-élément à analyser.

Ce calculateur pilote en même temps un synthétiseur de très haute stabilité, celui-ci fournissant à la carte électronique du C.C.D. la fréquence horloge. Il commande aussi par l'intermédiaire d'un microprocesseur le mouvement du réseau du monochromateur utilisé pour enregistrer la réponse spectrale.

Cette chaîne d'acquisition permet l'analyse rapide des barrettes que nous sommes chargés d'étudier. Ainsi, par exemple, l'enregistrement de la réponse des 1728 éléments d'une barrette à un éclairement uniforme ne prend que six secondes.

Le stockage de ces informations soit en mémoire centrale, soit sur bande magnétique permet ensuite d'effectuer le traitement que l'on désire (moyenne, dérive, histogramme, etc...).

Nous avons reproduit le schéma complet du banc de mesures (Fig. 2).

2.3. - Paramètres mesurés :

Cette chaîne permet l'acquisition des paramètres suivants, caractérisant les détecteurs C.C.D. :

- Tension et bruit en obscurité
- Sensibilité et bruit en éclairement
- Uniformité
- Linéarité
- Tension de saturation
- Réponse spectrale
- Résolution (F.T.M.)
- Inefficacité de transfert.

Cette énumération n'est pas bien entendu exhaustive et la souplesse du banc permet, s'il en est besoin, des modifications pour acquérir d'autres paramètres. Comme par exemple, la réponse à un éclairement bref ou l'étude du bruit en fonction de la température, etc...

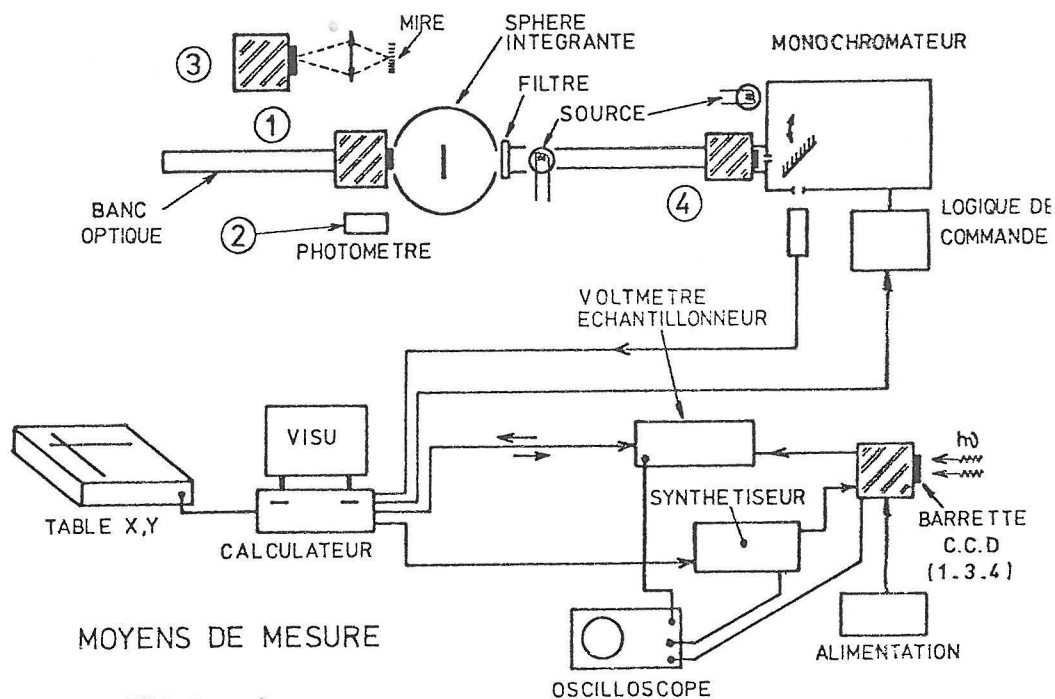


FIGURE 2

3 - METHODES DE MESURES ET RESULTATS

3.1. - Uniformité :

La barrette est placée directement en sortie de la sphère (position 1 sur le schéma - moyens de mesure). Le flux émis est réglé pour obtenir un signal vidéo voisin de la moitié de la tension de saturation. Par l'intermédiaire du voltmètre échantillonneur, le calculateur acquiert successivement le signal vidéo issu des 1728 éléments. Il trace ensuite sur une table X, Y ou sur la visu graphique, associées au calculateur, la courbe d'uniformité du signal vidéo en fonction du numéro de l'élément. Cette courbe peut être tracée par rapport au zéro ou par rapport à la valeur moyenne de la tension vidéo des 1728 éléments. Lorsque la barrette présente des défauts d'uniformité, le calculateur fournit le numéro des éléments s'écartant trop de la valeur moyenne.

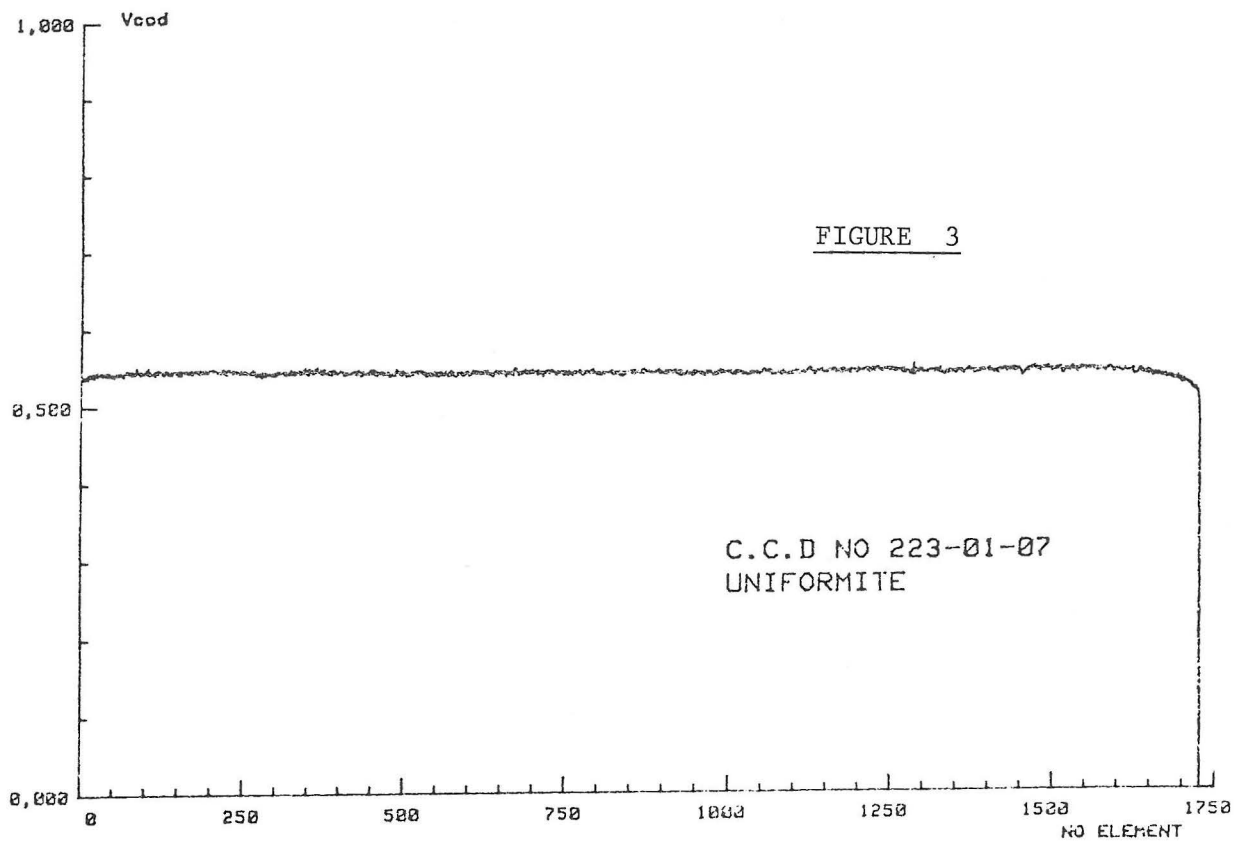
En fait, ce cas se présente rarement car le type de C.C.D. que nous testons actuellement, présente une excellente uniformité (< 7 %).

3.2. - Sensibilité :

La barrette est toujours placée en sortie de la sphère, dont l'éclairement E a été réglé auparavant à l'aide d'un détecteur étalon placé dans le même plan que la barrette (position 2).

La sensibilité se mesure sur un seul élément dont la réponse se situe dans la moyenne des 1728.

Le calculateur acquiert successivement un grand nombre de fois le signal vidéo de ce même élément (250 fois) puis il calcule la moyenne et l'écart type.



3.3. - Linéarité :

Théoriquement le signal vidéo lorsqu'il se situe en-dessous de la saturation est proportionnel à l'éclairement. Pour vérifier cette loi, deux possibilités se présentent.

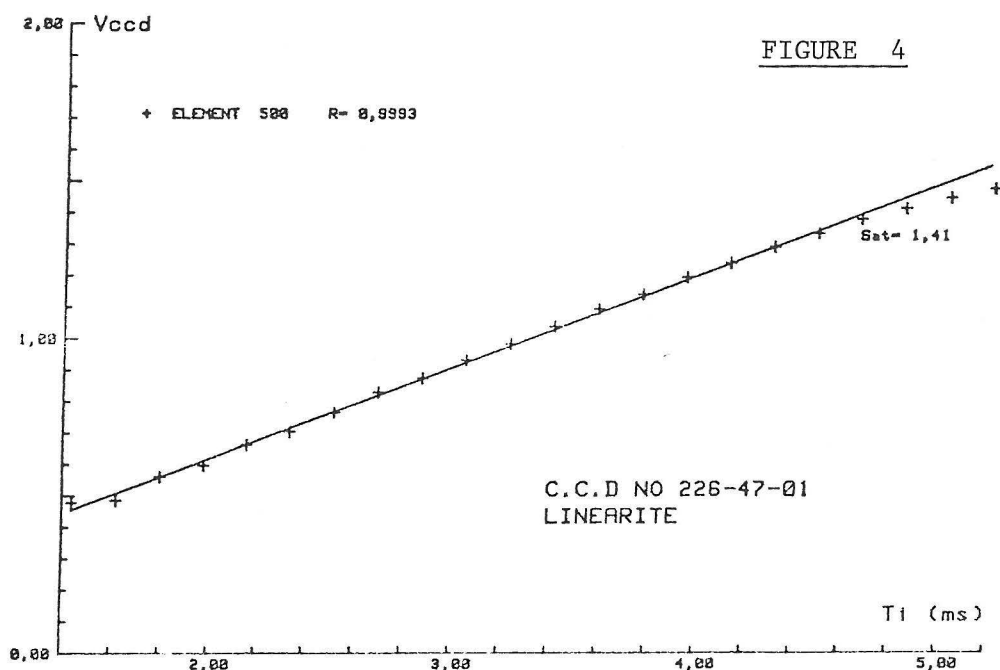
- a) choisir un temps d'intégration donné et faire varier le niveau d'éclairement,
- b) choisir un éclairement, le garder constant et faire varier le temps d'intégration.

C'est cette seconde possibilité que nous avons choisie car il est plus facile de mesurer avec précision un temps d'intégration (fréquence-mètre) qu'un éclairement.

La barrette reste placée devant la sphère, son temps d'intégration est choisi par le calculateur qui pilote le synthétiseur associé à la carte électronique du C.C.D.

L'éclairement de la sphère est choisi afin d'obtenir la saturation des senseurs pour le temps d'intégration le plus élevé.

Lors de notre mesure nous faisons varier le temps d'intégration T_i de 1,4 ms à 5,2 ms. Le calculateur trace la courbe $V = f(T_i)$. A partir des valeurs acquises et à l'aide d'un programme de régression polynomiale, le calculateur trace la meilleure droite passant par les points situés en deçà de la saturation. A partir de ces enregistrements la tension de saturation est déduite (Fig. 4).



3.4. - Réponse spectrale :

Le dépôt d'une électrode semi-transparente sur les senseurs entraîne une modification quant à la réponse spectrale de ces senseurs. La réponse spectrale caractéristique des détecteurs au silicium se trouve dégradée par des phénomènes interférentiels qui varient en fonction de l'épaisseur du dépôt. La réponse spectrale peut varier d'une barrette à l'autre et même d'une portion de barrette à l'autre.

Pour enregistrer cette réponse spectrale, nous plaçons la ligne des détecteurs en face de la fente de sortie d'un monochromateur (position 4). Ce monochromateur est lui aussi piloté par le calculateur. Après pondération du flux issu du monochromateur à l'aide d'une diode étalon placée en face de la sortie latérale du monochromateur, la courbe de la réponse spectrale est tracée pour trois éléments situés en début, milieu et fin de barrette. (fig. 5).

3.5. - Fonction de transfert de modulation (F.T.M.) :

La nature discrète de ce type de détecteurs, ainsi que les phénomènes tels que la diffusion latérale des charges entraînent une dégradation de la fonction de transfert de modulation.

3.5.1. - Montage expérimental.

La mesure de la F.T.M. consiste à évaluer le taux de contraste lorsque l'on envoie sur la barrette l'image d'une mire et que le pas de cette mire diminue jusqu'à atteindre une valeur inférieure aux dimensions des éléments détecteurs.

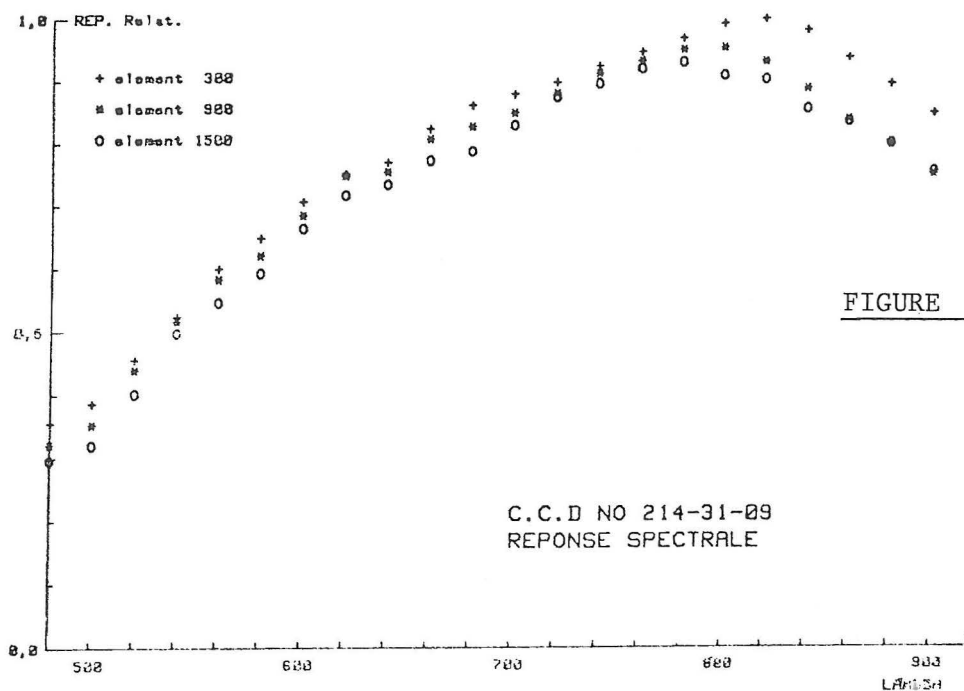


FIGURE 5

Pour cette mesure la barrette C.C.D. est toujours éclairée par le flux issu de la sphère intégrante mais entre ces deux éléments, sont interposés :

- une mire carrée à pas variable : c'est une lame métallique de fine épaisseur (30 μm) comportant des fentes et des parties pleines de même largeur ℓ (pas de la mire : $1/2 \ell$ en paires de lignes par millimètres).

- un objectif de microscope refocalisant l'image de la mire sur les senseurs (position 3). Le grandissement de cet objectif est tel qu'il permet d'obtenir pour le plus petit pas de la mire une image inférieure aux dimensions des détecteurs.

- on translate cette mire en face de la ligne des senseurs et l'on relève sur un même élément, les tensions vidéo maximum et minimum (V_M et V_m) pour un pas de mire donné, correspondant au passage devant ce détecteur d'une fente et d'une partie pleine.

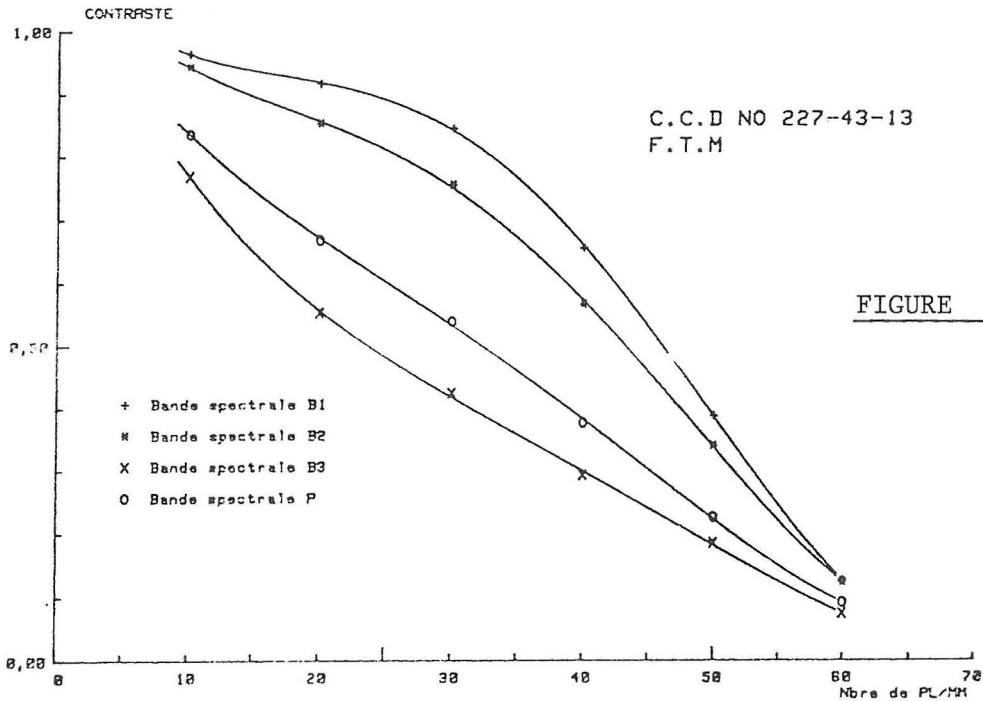
Ces valeurs V_M et V_m permettent de calculer le contraste que l'on associe à la F.T.M. à un facteur $4/\pi$ près.

$$C = \frac{V_M - V_m}{V_M + V_m}$$

3.5.2. - Résultats expérimentaux.

La mesure de la F.T.M. pour une barrette C.C.D. FAIRCHILD type 122 DC a été faite pour plusieurs longueurs d'onde dans le visible et le proche infrarouge, ainsi qu'en lumière panchromatique. On constate que, pour des longueurs d'ondes élevées, la F.T.M. se dégrade. Ceci est dû au fait que, pour les longueurs d'onde voisines du rouge, la création des charges s'ef-

fectue dans des zones plus profondes du semiconducteur où la diffusion latérale de ces charges est plus importante. Ces charges peuvent être ainsi piégées dans les puits de potentiel des éléments voisins (Fig. 6).



3.6. - Inefficacité de transfert :

C'est un paramètre propre à ces dispositifs à transfert de charges. Une mauvaise efficacité de transfert, c'est-à-dire un nombre important de charges retardées ou perdues lors d'un transfert entraîne une atténuation du signal et une dégradation de la résolution spatiale (F.T.M.).

Si l'on examine le mouvement des charges lors du transfert, on remarque qu'une partie des charges créées est transférée rapidement tandis qu'une faible densité (une fraction f du maximum) l'est plus lentement avec une évolution exponentielle dans le temps. Soit τ la constante de temps du transfert, l'efficacité η peut s'écrire :

$$\eta = 1 - f e^{-t/\tau}$$

Ce phénomène est dû à la création de charges d'espace au voisinage des électrodes de transfert.

Pour mesurer un tel paramètre nous avons réalisé un montage optique permettant d'éclairer un seul élément (soit une image de $13 \mu\text{m}$). Le calculateur acquiert l'information du point éclairé (V_1) et celle du point voisin (V_2) (le signal vidéo issu de ce dernier élément est constitué par son

courant d'obscurité et par les charges résiduelles provenant du point voisin éclairé et récupérés lors du transfert). Il calcule ensuite l'inefficacité du transfert ε

$$\varepsilon = \frac{V_2}{N V_1}$$

(N : numéro de l'élément ou nombre de transfert entre ce dernier et la sortie vers l'amplificateur vidéo).

4 - CONCLUSION

Notre banc de mesure n'est pas figé quant à son utilisation. Ainsi, il peut facilement être modifié pour tester des barrettes provenant d'autres constructeurs ou pour mesurer, non plus les barrettes linéaires mais des mosaïques C.C.D. C'est d'ailleurs une modification qui sera prochainement réalisée.

Il est possible aussi, en s'attachant à un paramètre, de suivre son évolution lorsque divers facteurs optoélectroniques (temps d'intégration, éclairage pulsé, etc..) ou extérieurs (température) varient en même temps. Actuellement, ce banc automatique de mesure répond parfaitement au but que nous nous étions fixé. A savoir : l'enregistrement de la réponse individuelle d'un élément du détecteur ou la mesure rapide de l'ensemble des paramètres optoélectroniques caractérisant la barrette.

Dans le cadre du projet HRV* du satellite "SPOT", nous avons testé un grand nombre de barrettes avant, pendant et après des tests de vieillissement en ambiance spatiale.

Actuellement, nous préparons le banc afin de trier et de mesurer les barrettes choisies pour être montées sur le modèle de vol.

* HRV : Camera Haute Résolution dans le Visible.