



HAL
open science

Caméra CCD à compositage pour l'astronomie

Jean-Louis Prieur

► **To cite this version:**

| Jean-Louis Prieur. Caméra CCD à compositage pour l'astronomie. 1983. hal-00870646

HAL Id: hal-00870646

<https://hal.science/hal-00870646>

Submitted on 7 Oct 2013

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Ecole Nationale Supérieure de l'Aéronautique et de l'Espace

Projet de fin d'études

effectué au Laboratoire d'imagerie CCD de l'Observatoire
du Pic-du-Midi et de Toulouse

CAMERA CCD

A COMPOSITAGE POUR L'ASTRONOMIE

J. Louis PRIEUR

1983



Photo n° 1 - L'Observatoire du Pic-du-Midi (2880 m). On remarque
à gauche la tour du télescope de 2 mètres de diamètre,
le plus gros télescope installé en France

AVERTISSEMENT

Ce projet de fin d'études a été pour moi l'occasion de m'intégrer à une équipe de recherche dépendant de l'Observatoire du Pic-du-Midi et de Toulouse. Passionné par l'astronomie depuis l'âge de 12 ans, j'ai été très heureux que B. Fort me propose ce stage, et qu'il soit accepté par l'ENSAE. J'étais entré à l'ENSAE à cause du mot "Espace" qui y figure, dans le but d'avoir une formation de base qui me prépare à l'astronomie, et je compte préparer l'année prochaine un DEA d'Astrophysique. Ce sera l'aboutissement d'un rêve vieux de dix ans déjà...



Photo n°2 - Premiers essais de refroidissement du CCD -
On remarque le givre qui recouvre la tête de
chauffage du bidon d'azote liquide

REMERCIEMENTS

Je ne pourrais présenter ce rapport sans remercier tous ceux qui sont à l'origine de ce projet et tous ceux qui m'ont aidé ensuite à le mener à bien.

Je remercie ainsi Mr B. Fort qui m'a accueilli dans son équipe et qui m'a confié des responsabilités dès le départ. Mes remerciements vont aussi à l'Ecole Nationale Supérieure de l'Aéronautique et de l'Espace et plus particulièrement aux responsables de ce projet Mrs Benzaken et Pyee.

J'adresse toute ma gratitude aux membres de l'équipe CCD : à Mr J.P. Dupin pour les renseignements qu'il m'a donnés en électronique, à Mlle M. Cailloux et Mr P. Tilloles pour la partie informatique, à Mr J. P. Picat pour l'astronomie et surtout à Mr C. Lours à qui je dois beaucoup pour résoudre tous les problèmes concrets.

Je remercie aussi Mr P. Bailleul et Mlle F. Avitabile élèves-ingénieurs à l'ENSEEIH qui se sont chargés de l'étude et de la réalisation de l'électronique de commande de cette caméra, ainsi que tout le personnel de l'Observatoire de Toulouse.

Enfin, je tiens à mentionner particulièrement le dévouement de Mlle M.C. Lagère et Mme J. Jobard qui ont tapé ce rapport, en parvenant à déchiffrer mon écriture.

SOMMAIRE

	<u>Pages</u>
AVERTISSEMENT	
REMERCIEMENTS	
INTRODUCTION	1
I - INTERET D'UNE CAMERA CCD EN "MODE CINEMA" POUR L'OBSERVATION ASTRONOMIQUE	
1°) Le problème des observations astronomiques	3
2°) Origine du mode cinéma	4
3°) Les CCD et la turbulence atmosphérique	5
4°) Petite étude du compositage	7
5°) Préétude du mode cinéma avec la caméra Fairchild	9
6°) Conséquences de cette étude : définition de la "ciné-caméra" idéale	13
II - CAHIER DES CHARGES	
1°) Enoncé du cahier des charges de la caméra CCD Thomson	15
2°) Examen rapide des différentes spécifications	15
III - DESCRIPTION TECHNIQUE DE L'ENSEMBLE REALISE	
1°) Description sommaire de la caméra	17
2°) Le CCD Thomson THX 31135	17
3°) L'électronique de visualisation et de commande	20
4°) Partie optique	21
5°) Le refroidissement du CCD	23
6°) La partie mécanique et les liaisons	26

IV - ESSAIS TECHNIQUES AU PIC-DU-MIDI (MISSION DU 21 AU 23 JUIN 1983)

1°) But de la mission	28
2°) Déroulement de la mission	28
3°) Premier bilan	29
4°) Conclusion	30

V - PARTICIPATION PERSONNELLE A CE PROJET

1°) Définition précise de la caméra, pièce par pièce	31
2°) Conception et dessin des pièces mécaniques	31
3°) Approvisionnement des pièces	32
4°) Présentation du projet au séminaire sur "Le recentrage des images en Astronomie" au LAS	32
5°) La mission au Pic-du-Midi	32

VI - APPLICATIONS ASTRONOMIQUES DE CETTE CAMERA

1°) L'observation dans le domaine 800 - 1000 nm est encore peu développée	33
2°) Les CCD en mode cinéma ont une très grande dynamique qu'il faut exploiter	33
3°) Observations astrophysiques adaptées à cette caméra	34

CONCLUSION	37
------------	----

BIBLIOGRAPHIE	39
---------------	----

ANNEXE A : Introduction aux CCD

1°) Les caméras à tube	41
2°) Les CCD : Principe de fonctionnement	41
3°) Facteurs de limitation et bruits	43

ANNEXE B : Premiers essais thermiques

1°) But des essais	47
2°) Conditions de l'expérience	47
3°) Résultats expérimentaux	48
4°) Conclusion	48

ANNEXE C : Estimation de la magnitude limite	49
--	----

ANNEXE D : Documentation technique	52
------------------------------------	----

INTRODUCTION

Lorsque je suis arrivé, début avril 1983, l'équipe CCD de l'Observatoire du Pic-du-Midi et de Toulouse voulait développer un nouveau type de caméra CCD fonctionnant en mode "cinéma" au rythme de 4 images par seconde, avec stockage des images sur disque magnétique. Je devais m'intégrer dans cette équipe et finalement prendre en main la réalisation concrète de ce projet.

Le groupe Imagerie CCD est né en 1977 à l'Observatoire de Meudon avec la réalisation de la première caméra CCD refroidie en Europe. Cette caméra était construite autour d'un capteur photosensible matriciel CCD Fairchild de 100 x 100 pixels, qui était utilisé en mode intégration. Les capacités MOS constituant la matrice CCD accumulaient des photocharges pendant une longue période pouvant durer jusqu'à plusieurs heures. Ensuite, ces photocharges étaient décalées colonne par colonne puis ligne par ligne afin d'être lues par un seul registre de sortie. (Cette opération de lecture prenait environ 10 secondes). Jusqu'à présent, c'était le seul mode de fonctionnement des CCD utilisés en astronomie.

Le groupe CCD a lancé avec l'aide du CEN Saclay la fabrication de 3 exemplaires de caméras CCD fonctionnant dans ce mode intégration, avec des circuits CCD RCA plus performants que les circuits CCD Fairchild. Ces caméras ont fourni les premières images au début de l'année 1983. Les résultats sont remarquables.

Cette équipe de Meudon est venue s'installer dans les nouveaux locaux de l'Observatoire de Toulouse en septembre 1982, dans le cadre d'une décentralisation. C'est donc au cours de son installation dans ses nouveaux laboratoires que l'équipe élaborera succinctement les grandes lignes du projet de la "ciné-caméra" Thomson. Mon rôle n'était donc pas clairement défini au départ.

Ce prototype devait être réalisé par des stagiaires : Georges Bailleul et Frédérique Avitabile élèves-ingénieurs à l'ENSEIHT en option électronique, et moi-même. G. Bailleul et F. Avitabile s'occuperaient des modifications des cartes électroniques Thomson pour les adapter à ce nouveau mode de fonctionnement. Quant à moi, j'étais chargé de la coordination de l'ensemble et je devais assurer la réalisation concrète de ce projet, avant fin Juillet si possible. Ainsi donc ce projet a fait appel à de multiples disciplines :

- optique pour le réducteur de focale et le hublot (tolérances et traitement) ;

- thermique pour le refroidissement du CCD et du boîtier ;
- électronique : carte de commande du moteur, senseur optique et théorie des CCD ;
- Informatique : capacité de stockage des disques, interface avec l'ordinateur PDP ;
- Astronomie : vocation de la caméra, influence de la turbulence sur la qualité des images ;
- théorie du signal : rapport S/B en intégration, en compositage, bruit des photons ;
- Dessin industriel : cotation des ajustages, nomenclature d'un ensemble de pièces, pratique du dessin sur calque ;
- Gestion d'un projet : organisation générale, problèmes pour concilier le coût le plus bas, un délai impératif et parvenir cependant à respecter le cahier des charges.

I - INTERET D'UNE CAMERA CCD EN "MODE CINEMA"
POUR L'OBSERVATION ASTRONOMIQUE

1°) Le problème des observations astronomiques :

a) Récepteurs et détecteurs :

L'astronomie s'intéresse à des objets extrêmement lointains pour la plupart, et qui de ce fait nous envoient très peu de lumière. Pour recueillir les quelques photons par mètre carré et par minute provenant de ces astres, la première attitude adoptée par l'homme fut de construire de très grands récepteurs (jusqu'à 6 m de diamètre pour les récepteurs optiques et 300 m pour les récepteurs radio). Ensuite, lorsqu'il a commencé à buter sur des problèmes technologiques critiques limitant les dimensions des collecteurs de lumière, il a porté son attention sur les détecteurs. En effet, à quoi sert de recueillir beaucoup de lumière si ensuite le détecteur n'en utilise qu'une portion infime ?

b) Les qualités d'un bon détecteur :

Une première qualité d'un bon détecteur astronomique est donc sa sensibilité au rayonnement. La proportion de lumière utilisée, pour une certaine bande passante dépend du rendement quantique. Celui des plaques photographiques vaut de 0,1 à 3 %. Les détecteurs à effet photo-électrique ont des rendements quantiques qui atteignent 20 % dans le bleu.

Les détecteurs photoconductifs au silicium ayant des rendements qui peuvent dépasser 80 % dans le visible sont donc très attrayants pour l'astronome.

Toutefois, pour pouvoir détecter ces faibles signaux, il ne suffit pas d'avoir un grand rendement quantique, il faut aussi que le bruit produit par le détecteur soit faible devant la valeur du signal.

c) Les CCD :

Les CCD utilisés en mode intégration possèdent ces deux qualités, lorsqu'ils sont refroidis. Ils ont en plus quelques atouts supplémentaires : une grande dynamique

(près de 400 000 charges peuvent être stockées, avec un bruit du détecteur de 100), une très bonne linéarité (près de 10^{-4} , après correction du seuil), une excellente stabilité géométrique.

Ce sont les détecteurs qui s'imposent peu à peu pour de nombreuses observations en astronomie (Cf. Bibliographie). Malheureusement ces matrices CCD ont encore pour des raisons technologiques de petites dimensions. C'est ce qui limite leur domaine d'applications à des objets peu étendus (quelques minutes d'arc). Pour l'observation de champs très étendus, on utilise encore la plaque photographique ou la caméra électronique à focalisation magnétique.

2°) Origine du mode cinéma :

Le CCD en mode "cinéma" a commencé à être utilisé pour l'observation d'occultations d'étoiles ou des comètes. Ce mode particulier de fonctionnement a été imaginé et testé par l'équipe CCD en 1982. La caméra utilisée pour ces premiers essais était construite autour d'un CCD FAIRCHILD de 100 x 100 pixels, première caméra CCD à vocation astronomique construite en France.

a) Principe du "mode cinéma" :

On procède à une série de poses courtes d'un même objet (pose inférieure à une seconde), chaque image étant stockée sur disque pendant la pose suivante.

b) Intérêt de ce mode pour l'observation d'occultations :

Le récepteur CCD est alors utilisé comme un photomètre multi-ouverture. Par rapport aux photomètres classiques à un seul canal, la matrice CCD fournit des informations sur deux dimensions. On peut donc déterminer avec précision le niveau du signal provenant de l'étoile observée grâce à une bonne évaluation du "fond de ciel".

Le CCD offre aussi la possibilité d'enregistrer des signaux de niveaux très inégaux (environ 9 magnitudes d'écart). Sa grande dynamique lui permet de stocker près de 400 000 charges par pixel sans saturer.

La photométrie est facilitée par le fait que le CCD est linéaire et que les données sont numérisées directement à la sortie du détecteur, ce qui n'est pas le cas lors de l'utilisation de plaques photographiques ou électrographiques.

De plus sa bonne sensibilité aux faibles flux (bon rendement quantique en rouge lointain) et son faible bruit de lecture lorsqu'on le refroidit énergiquement rendent possible une utilisation fructueuse des CCD pour l'observation des objets faibles.

c) Amélioration de la résolution spatiale par compositage :

La technique du compositage est bien connue en photographie astronomique. C'est en utilisant cette technique que l'on obtient les meilleurs clichés des détails planétaires (depuis le sol). Il consiste à sélectionner de "bons" clichés, les recentrer, puis les ajouter.

On peut penser utiliser les images produites lors du fonctionnement de la caméra en "mode cinéma" pour améliorer la qualité des images.

3°) Les CCD et la turbulence atmosphérique :

On peut se demander d'où provient ce gain dans la qualité des images composites.

a) Agitation atmosphérique :

Lorsqu'on observe à l'oculaire d'un télescope, avec un fort grossissement, on a l'impression d'une agitation perpétuelle de l'objet observé. Ce phénomène est dû à la turbulence de l'atmosphère. Les astronomes amateurs connaissent bien le problème : les observations visuelles de la Lune ou des planètes permettent d'apercevoir beaucoup plus de détails qu'une photographie prise avec le même instrument. En effet, l'oeil qui prend environ 10 images par seconde peut suivre ces mouvements erratiques. Par contre lors d'une photographie d'une durée plus longue, toutes les positions successives de l'objet sont intégrées : il en découle un étalement de l'image et une perte des détails les plus fins.

b) Le CCD en mode intégration et l'agitation des images :

Ainsi lorsqu'on utilise un CCD en mode intégration simple on obtient des images ayant une résolution angulaire limitée aux environs de 0,8" (seconde d'arc), alors que sur des poses courtes on peut atteindre 0,5" et même 0,4". (Muller a obtenu des clichés des granules solaires à 0,25" de résolution avec le réflecteur de 50 cm de la coupole tourelle au Pic-du-Midi, mais c'est vraiment exceptionnel, et la photographie solaire n'a pas les mêmes contraintes que la photographie d'un mirage gravitationnel : abondance du flux lumineux !)

Cette limitation de la résolution est introduite essentiellement par :

- les défauts de guidage du télescope (évalués au mieux à $\pm 0,2''$)
- la scintillation atmosphérique (évaluée à $\pm 0,5''$ dans les meilleures conditions sur une longue pose).

c) Le CCD en "mode cinéma" :

Pour remédier à ces effets, B. Fort et son équipe ont développé "le mode cinéma" sur une caméra CCD Fairchild. La pose longue est remplacée par un grand nombre de poses courtes qui permettent de figer les effets de "bougé". Pour obtenir l'image finale, on additionne tous les clichés élémentaires après les avoir recentrés.

Cette technique est couramment employée dans les systèmes à comptage de photons. Par rapport à ces derniers, les CCD offrent l'avantage d'avoir une dynamique beaucoup plus grande, ce qui fait qu'une pose d'un CCD avec 50 000 charges électroniques est équivalente à 100 poses d'une caméra à comptage, qui sature avec 500 charges et qui a de gros problèmes avec le flux du fond de ciel.

Pour le compositage, le CCD a en plus 2 grands atouts :

- stabilité géométrique à cause de la rigidité mécanique
- stabilité des propriétés statistiques du bruit : distribution gaussienne, pixels peu ou non corrélés, non-uniformité du rendement quantique bien contrôlée par des tests au cours des observations. De plus, on utilise toujours le même récepteur, dont on peut bien apprécier les défauts.

Cependant, jusqu'à présent, le CCD n'a été utilisé qu'en mode intégration simple. Il est donc prudent de faire une préétude et d'en déduire le comportement

probable du CCD dans ce nouveau "mode cinéma" composité.

4°) Petite étude du compositage :

a) La turbulence atmosphérique :

On peut considérer que la turbulence affecte les images selon 3 niveaux différents :

- pour des temps d'exposition de l'ordre de 2ms au moins, c'est-à-dire pour une durée plus courte que la constante de temps atmosphérique, la pupille se décompose en un certain nombre de cellules turbulentes et l'image d'une étoile a une structure granulaire : le speckle (tavelures).
- pour un temps de pose supérieur (de 0,1 s à quelques secondes selon le site et les conditions atmosphériques) l'aspect granulaire disparaît et l'image devient une tâche continue, constituée par la superposition des speckles dont la position des tavelures les unes par rapport aux autres est aléatoire.
- enfin, pour des temps de pose plus longs, l'agitation intervient pour déplacer aléatoirement les images élémentaires, dont la superposition constitue l'image longue pose. La zone de cohérence de ces déplacements aléatoires a un diamètre de l'ordre de 15" à 40" dans un télescope de 2 m.

b) Diamètre du télescope et qualité des images :

Pour les grands télescopes, la résolution spatiale des images est limitée par l'atmosphère. Pour quantifier la turbulence on utilise le paramètre de Fried r_0 . r_0 est le diamètre d'un télescope parfait qui aurait la même résolution ρ_0 qu'un télescope limité par l'atmosphère ($\rho_0 = 1,22 \lambda/r_0$).

Le gain en résolution lorsqu'on augmente le diamètre du télescope pour les poses longues est représenté sur la figure n° 0 . Ainsi lorsque l'ouverture augmente, la résolution des poses longues augmente jusqu'à la valeur asymptotique ρ_0 qui est pratiquement atteinte pour $D/r_0 = 10$.

Par contre, la résolution des poses courtes croît jusqu'à une valeur ρ_m supérieure à ρ_0 , atteinte pour $\frac{D_m}{r_0} = 3,8$ puis décroît jusqu'à ρ_0 lorsque D continue à

augmenter. Pour obtenir une résolution moyenne des poses courtes supérieure à celle des poses longues, il faut donc diaphragmer le télescope à une ouverture d'environ $3,8 r_o$.

Le gain en résolution dépend de la qualité des images (i.e. de r_o) :

D/r_o	1	2	3	4	5	7	10	15	20	30
Gain en résolution pose courte/pose longue, sans sélection:	1,4	1,8	2	2	1,9	1,7	1,5	1,4	1,3	1,2
r_o correspondant pour $D = 2 \text{ m}$	2 m	1	0,7	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0,1	0,06

c) Rapport S/B de l'image compositée :

* En mode intégration, le rapport $(S/B)_1$ est égal à :

$$(S/B)_1^2 = \frac{N\tau}{1 + \frac{NEC^2}{\eta N\tau}}$$

avec : η : rendement quantique du pixel

N : nombre de photons incidents par seconde et par pixel

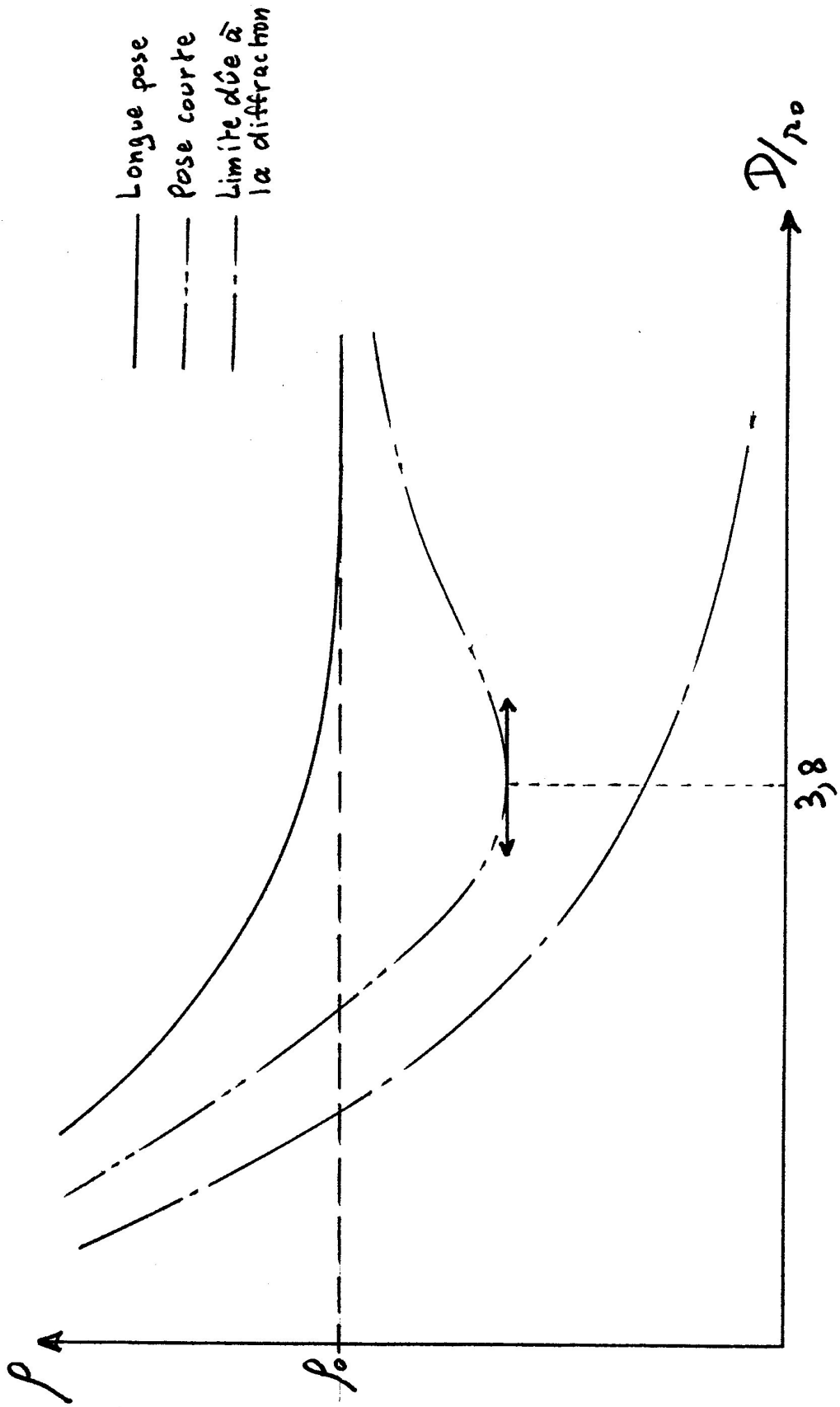
τ : temps d'intégration

NEC : bruit de lecture.

(On suppose le CCD refroidi suffisamment pour négliger le bruit du courant d'obscurité).

Quand τ croît, $(S/B)_1^2$ tend vers $N\tau$. Le détecteur tend vers un détecteur parfait, limité au seul bruit de photons.

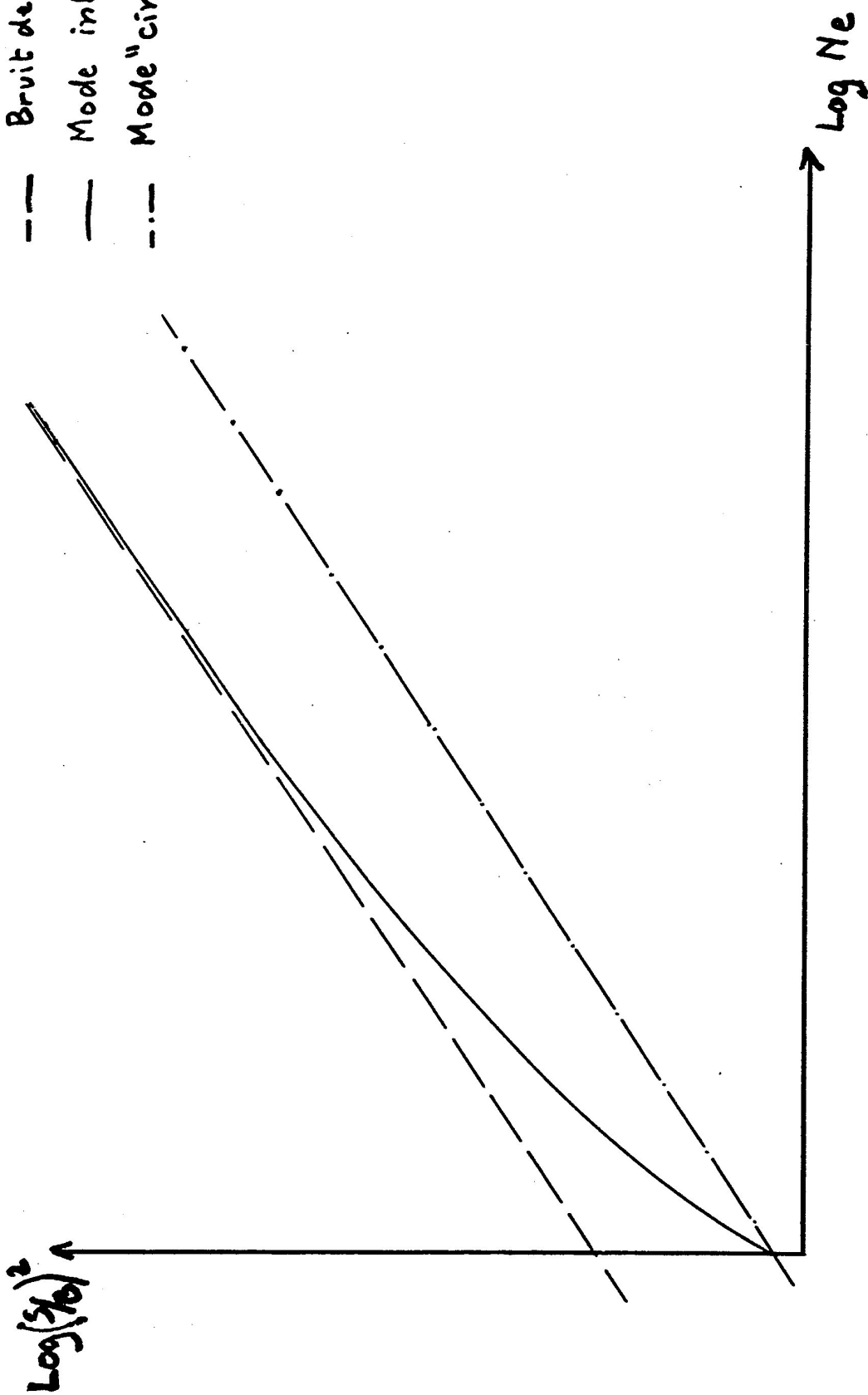
Diamètre du télescope et qualité des images



λ_0 petit : bonne résolution λ_0 grand : mauvaise résolution

FIGURE N° 0

--- Bruit de Photons
— Mode intégration
-.- Mode "cinéma"



Influence du bruit de lecture

Figure n°1

* Cas du compositage avec un CCD en vision directe :

On remplace τ par $k\tau_0$ avec k : nombre d'images élémentaires et τ_0 : temps d'exposition d'une image élémentaire. De plus NEC^2 est remplacé par $kNEC^2$

$$(S/B)_2^2 = \frac{k N \tau_0}{1 + \frac{k NEC^2}{\eta N k \tau_0}}$$

On voit que dans tous les cas $(S/B)_2 < (S/B)_1$.

Le compositage dégrade le rapport (S/B).

* Cas du compositage avec un CCD associé à un intensificateur de lumière de gain G.

L'influence du bruit de lecture est réduite, mais on introduit un autre terme de bruit : le bruit d'amplification.

$$(S/B)_3^2 = \frac{k N \tau_0}{1 + \frac{\Delta G^2}{G^2} + \frac{k NEC^2}{G^2 \eta N k \tau_0}}$$

Quand G augmente le bruit de lecture est divisé par G mais le bruit d'amplification augmente. Il faudra donc faire un compromis et ne pas trop forcer sur le gain.

La courbe comparative de ces trois cas de fonctionnement fait l'objet de la figure n° 1 .

5°) Préétude du mode cinéma avec la caméra Fairchild :

a) La caméra utilisée :

Pour tester le comportement du bruit du détecteur en "mode cinéma" et faire apparaître éventuellement des sources de bruit cachées, l'équipe de B. Fort a utilisé la caméra CCD Fairchild. Cette caméra CCD était la première à être développée en

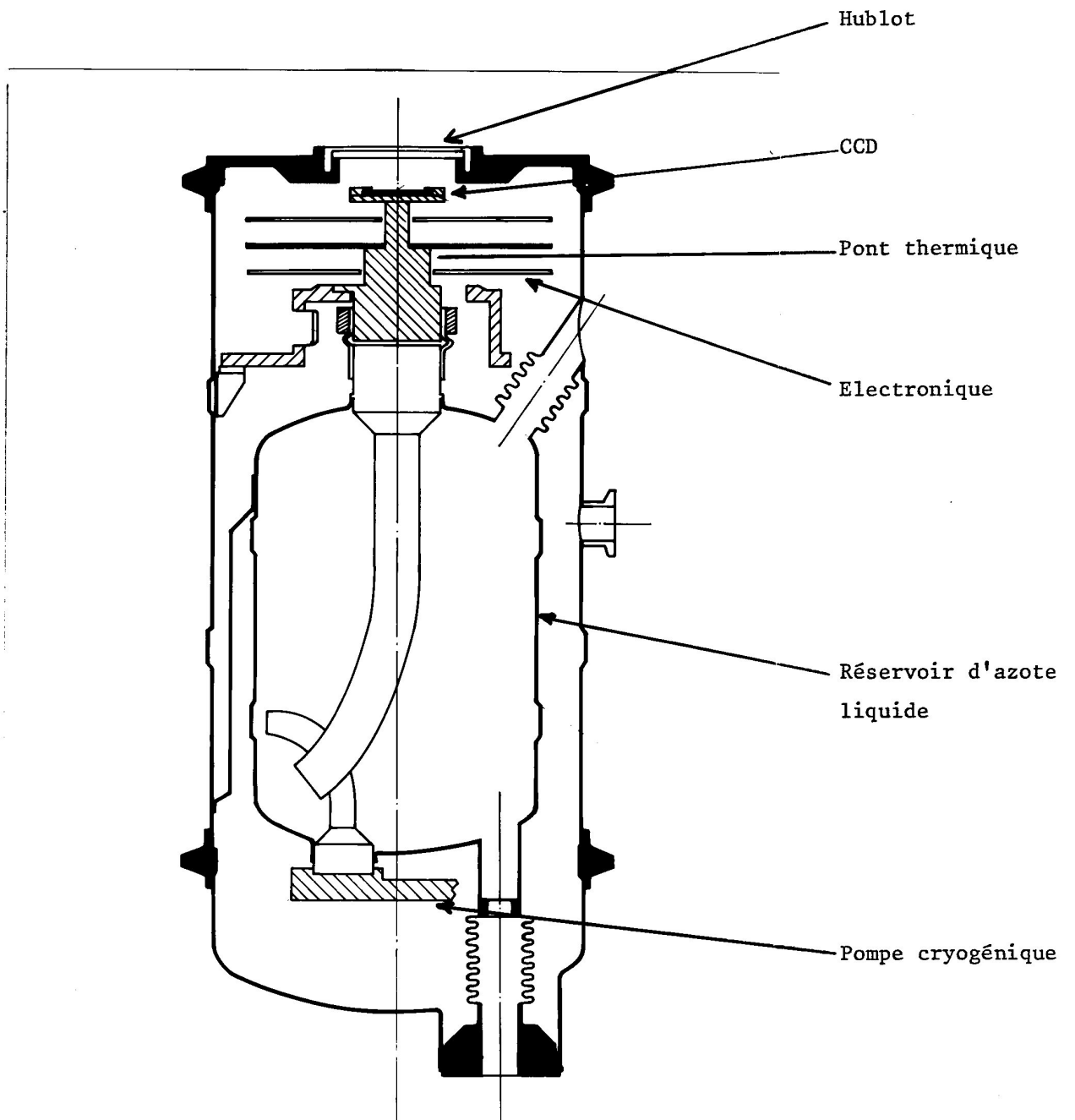


Photo n° 3 - CAMERA FAIRCHILD (1977)
Coupe schématique

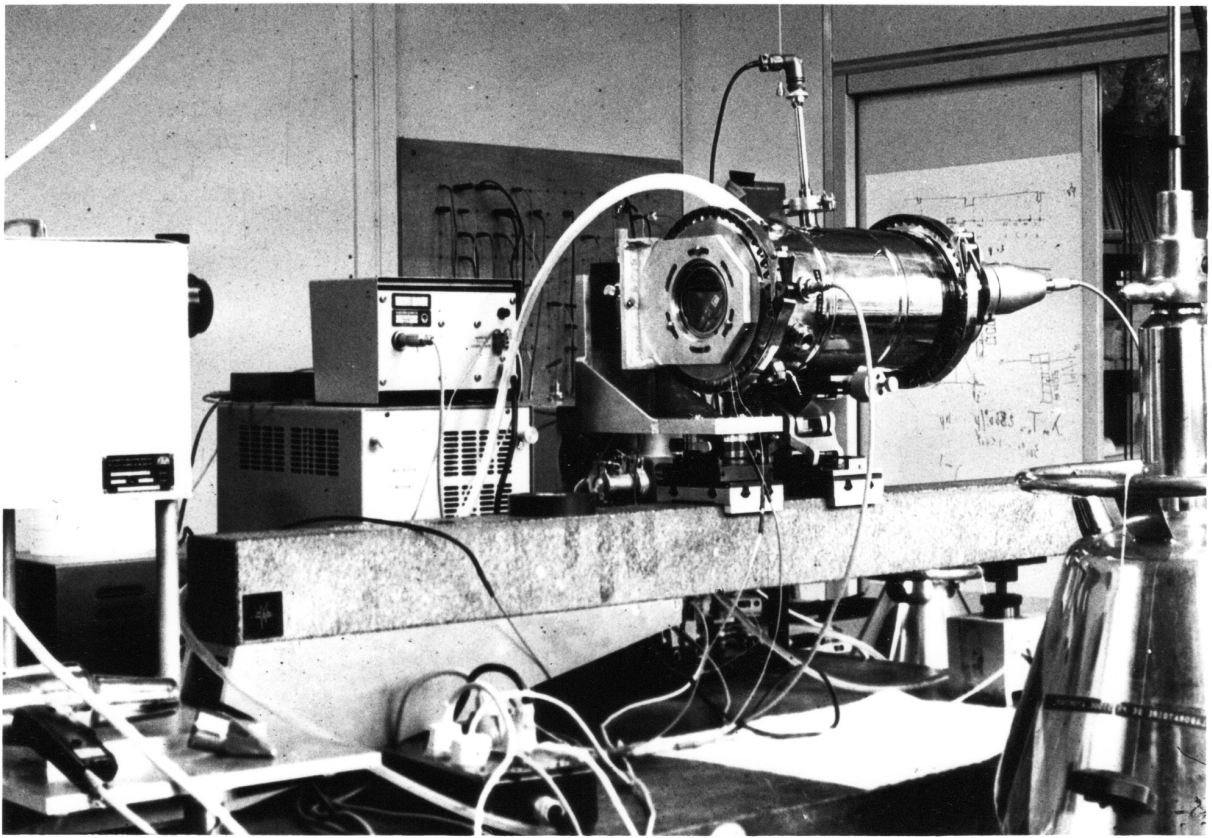


Photo n° 4 : La caméra Fairchild au laboratoire d'optique
de Meudon (1980)

France en 1977 autour d'un CCD Fairchild 100 x 100 pixels, refroidi à -100° C. Son rendement quantique était assez faible : $\eta = 10\%$ à 6000 Å.

Pour l'adapter à ce nouveau mode de fonctionnement des modifications ont été effectuées en 1982 pour augmenter la vitesse d'acquisition et permettre un stockage des données plus rapide. Les caractéristiques techniques étaient les suivantes :

- format réduit à 84 x 64 pixels
- codage sur 12 bits (4000 pas codeurs)
- bruit de lecture de 1,7 pas codeur soit 80 électrons r.m.s. (1 pas codeur valait 65 électrons r.m.s.)
- temps d'exposition de l'ordre de 0,25 s avec un temps de stockage d'environ 6 secondes.
- la capacité de stockage était de 130 images sur microbande Perifile.

La caméra était pilotée par un microprocesseur Motorola 6800.

b) Etude du bruit du CCD :

La distribution du bruit d'un CCD parfait devrait être gaussienne pour chaque pixel et non corrélée d'un pixel à l'autre.

La figure n°2 montre l'allure de la fonction d'autocorrélation d'une colonne de la matrice. Elle est nulle presque partout, sauf en 0 bien sûr où elle prend la valeur $(NEC)^2$ soit près de 3 pas codeurs. Ceci confirme que le bruit n'est pas corrélé d'un pixel à l'autre.

De plus, on a vérifié que lorsqu'on ajoute n images élémentaires d'une plage uniforme de lumière, la variance tend vers $(NEC)^2/n$. Ceci montre que la valeur du bruit augmente comme la racine carrée du nombre d'images n , alors que le signal croît proportionnellement à n .

Après ces tests en laboratoire, l'équipe de B. Fort est allée en mission en octobre 1982, au télescope de 2 mètres du Pic-du-Midi, pour faire des essais avec des objets astronomiques.

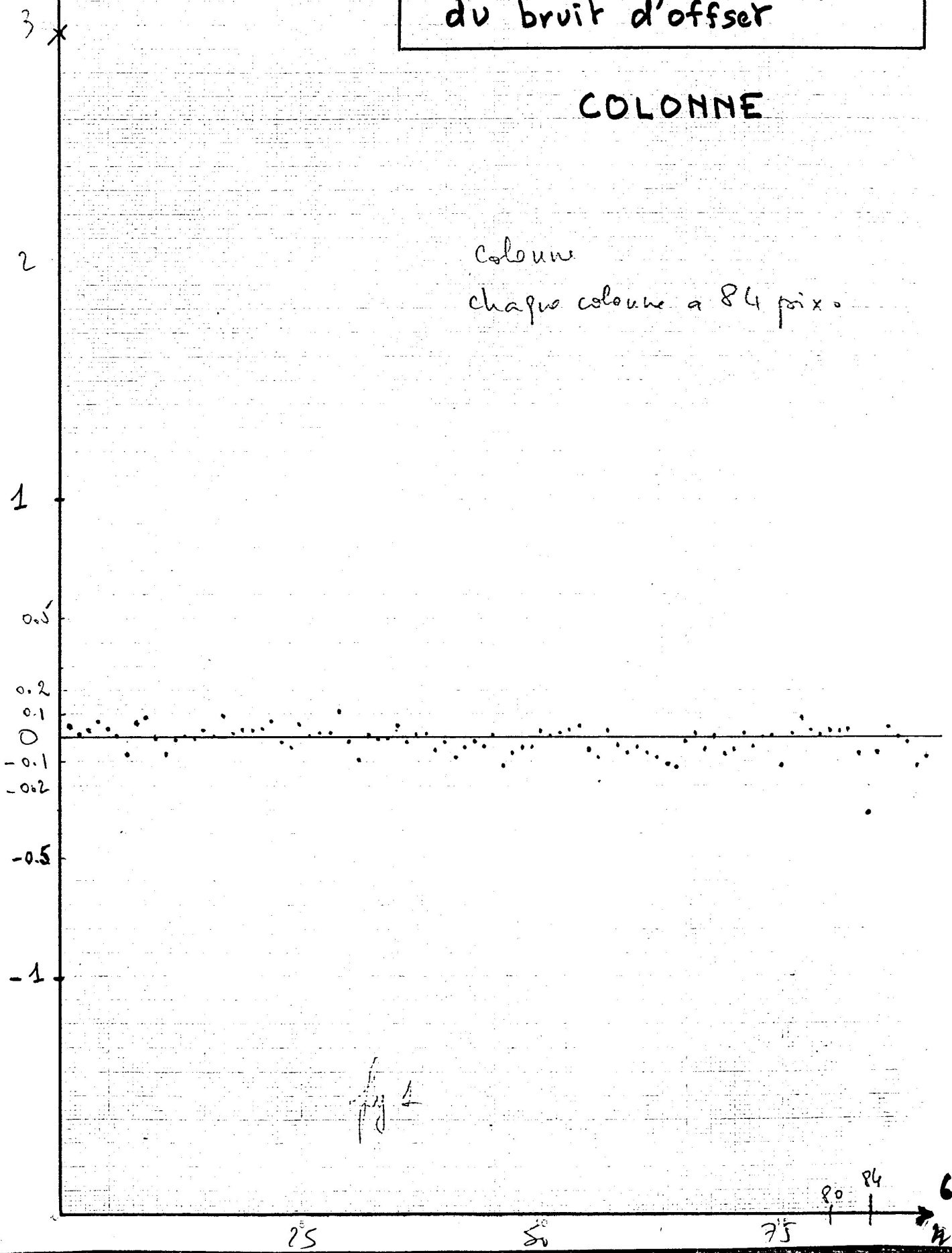
$$\frac{\sum f(x) f(x+n)}{\text{nbre de pts (en pas couleurs)}}$$

- FIG 2 -

Fonction d'autocorrelation
du bruit d'offset

COLONNE

colonne
chaque colonne a 84 pix.



c) Conditions d'observation lors de la mission au Pic-du-Midi :

La caméra était installée au foyer du télescope de 2 m avec un réducteur de focale qui donnait un rapport d'ouverture à F/12,5 et une échelle sur le CCD de 4 pixels par seconde d'arc. Le champ total faisait donc 16" x 20".

On utilisait un filtre rouge, à cause de la meilleure sensibilité du CCD dans ce domaine spectral. Malgré tout, le rendement quantique du système CCD-Télescope n'était que de 5 %.

La qualité des images était médiocre : la largeur à mi-hauteur des étoiles était comprise entre 1,5" et 2,5" (!).

d) Amélioration de la résolution spatiale :

La figure n° 3 (ADS 13148) illustre bien les caractéristiques d'une image compositée. Les isophotes de l'image de bas (compositage de 90 images élémentaires) sont très bruitées beaucoup plus que celles de l'image du mode intégration. Le rapport S/B est bien dégradé, comme on s'y attendait.

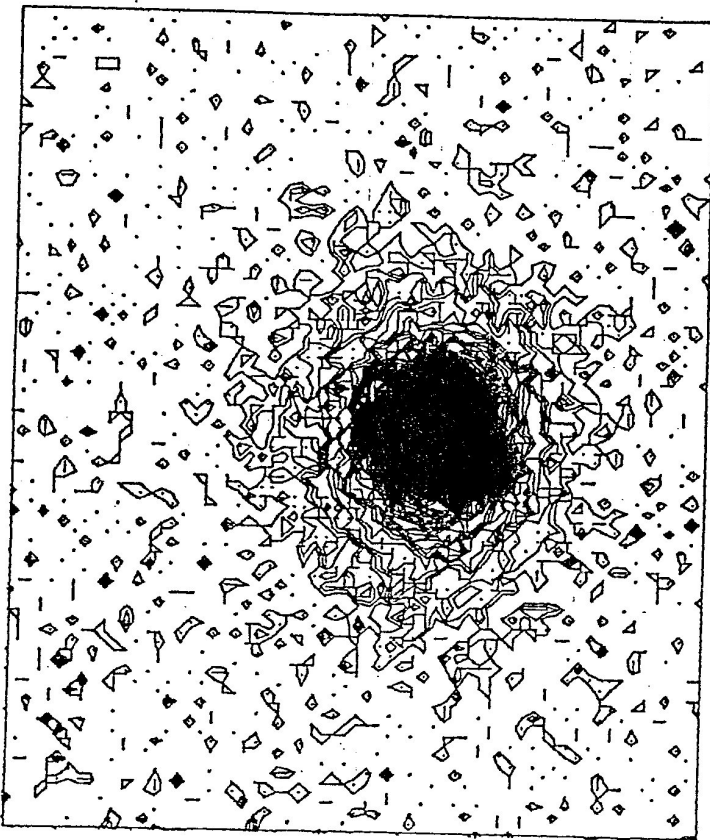
Cependant, la résolution spatiale est augmentée. Cette étoile double est mieux séparée avec le compositage qu'avec le mode intégration simple.

Cette mission a donc démontré l'intérêt du "mode cinéma" associé à un compositage des images obtenues.

e) Défectivité :

Un autre problème important était de savoir quelle était l'intensité de l'objet le plus faible que l'on pouvait détecter par cette technique.

La figure n° 4 (ADS 455) montre que l'on peut mettre en évidence des objets dont le maximum d'intensité est plus faible que la valeur moyenne du bruit de lecture. Le compagnon de cette étoile n'est pas visible sur chaque image élémentaire du type a) mais il apparaît lors du compositage de 100 images (b).



FICHER
D312.328

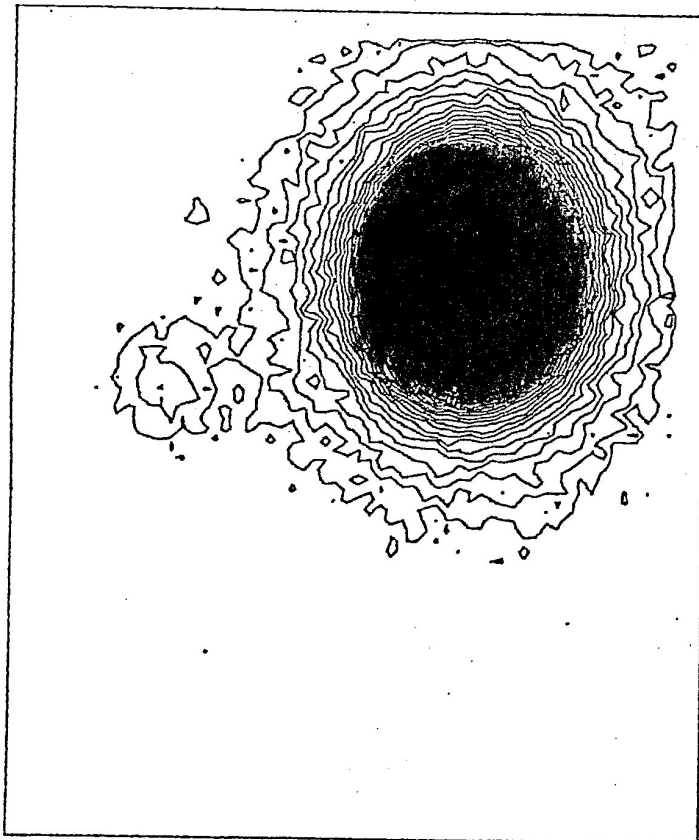
X= 1 A 64
PAS= 1

Y= 1 A 84
PAS: 1

PAS EN D: 1.000
SEUIL: 1.000

a) Pose de 0,25 A

ADS 455



FICHER
T312.DAT

X= 1 A 64
PAS= 1

Y= 1 A 84
PAS: 1

PAS EN D: 20.000
SEUIL: 40.000

b) Compositage de 85 poses

Figure 3

Ceci confirme les essais au laboratoire sur les propriétés du bruit.

On a montré en simulation qu'avec 10 000 images, on pourrait mesurer des flux aussi faibles que 0,05 NEC (5 % du bruit de lecture) avec un rapport S/B égal à 10. Cependant, pour ce genre de mesures photométriques à faible niveau, on s'est heurté à une difficulté .

f) Problème de non-linéarité à faible flux :

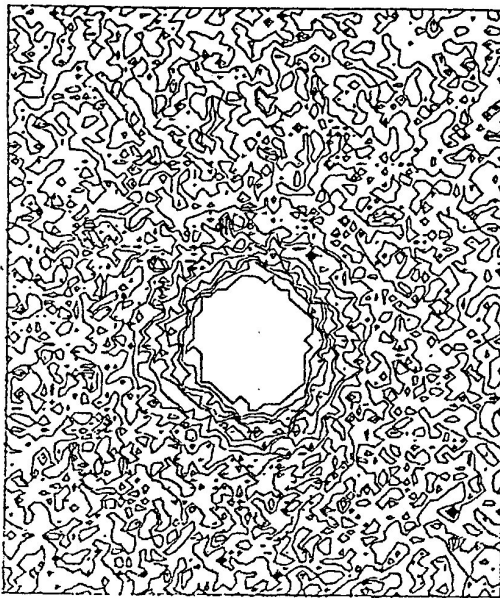
Lorsqu'on mesure la différence d'éclat entre ces deux étoiles, ADS 455 - figure n° 4, on obtient $\Delta m_R = 4,6$ ce qui correspond à une erreur par défaut de 1,3 magnitude (30 %).

En effet, le codage du signal fait "perdre" la linéarité au CCD : pour chaque pixel, lors de la lecture, la valeur de la charge électrique est codée par un convertisseur analogique digital. Ce convertisseur lui affecte un nombre entier de pas codeurs, en arrondissant à la valeur inférieure. Ainsi donc, le codage conduit à une erreur systématique comprise entre 0 et 1 pas codeur. L'erreur relative augmente quand le niveau du signal diminue.

La figure n° 6 est le résultat d'une simulation numérique. On peut voir la déformation du profil d'une étoile lorsqu'on fait varier le pas codeur entre 1 et 100 e⁻ rms.

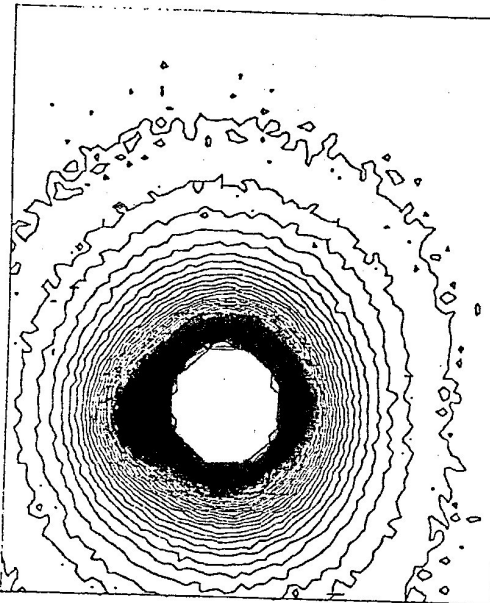
Le bruit de lecture de la caméra est supposé égal à 50 e⁻ rms et le signal a 20 e⁻ pour le pic central. (S'il n'y avait pas de bruit (de photons et de lecture) le niveau de sortie du codeur serait nul lorsque le pas codeur serait supérieur au niveau du signal).

Cette déformation est sélective et affecte les objets très faibles. L'équipe CCD a montré que pour un grand nombre d'images, cette non-linéarité peut être décrite par une courbe caractéristique qui ne dépend que des paramètres CCD et du flux (figure n° 7). Cette courbe a été obtenue par une simulation de Monte-Carlo, en modélisant le bruit de photons et le bruit de lecture.



FICHER T314.122 one elementary picture
 Star ADS 13148
 X= 1 A 64
 PAS= 1
 Y= 1 A 84
 PAS: 1
 PAS EN D: 100.000
 SEUIL MIN: 0.000
 SEUIL MAX: 1000.000

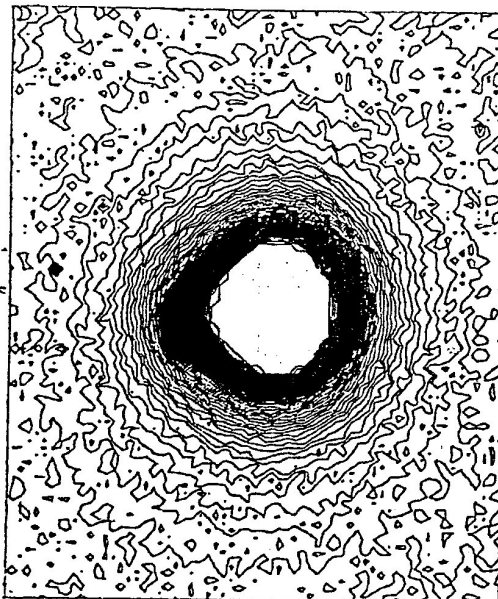
a) Pose elementaire (0,25s)



FICHER DTF317.003 Star ADS 13148
 Long exposure time: 10s
 X= 1 A 64
 PAS= 1
 Y= 1 A 84
 PAS: 1
 PAS EN D: 20.000
 SEUIL MIN: 0.000
 SEUIL MAX: 1000.000

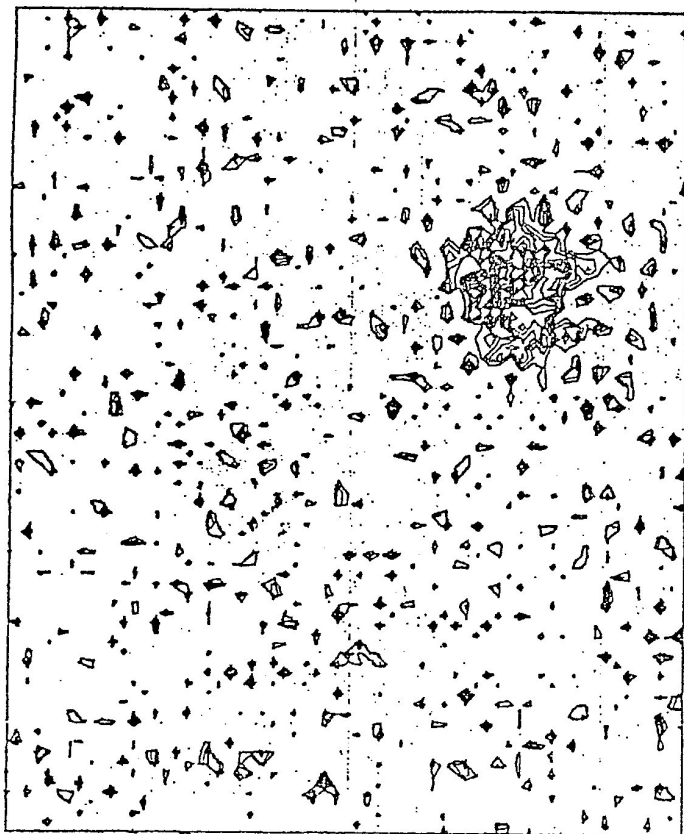
b) Longue pose (10s)

ADS 13148



FICHER VISUT.TRF Star ADS 13148
 90 pictures
 centered and added
 X= 1 A 64
 PAS= 1
 Y= 1 A 84
 PAS: 1
 PAS EN D: 20.000
 SEUIL MIN: 0.000
 SEUIL MAX: 1000.000

c) compositage de 90 poses



FICHER :
D311.223

X= 1 A 64
PAS= 1

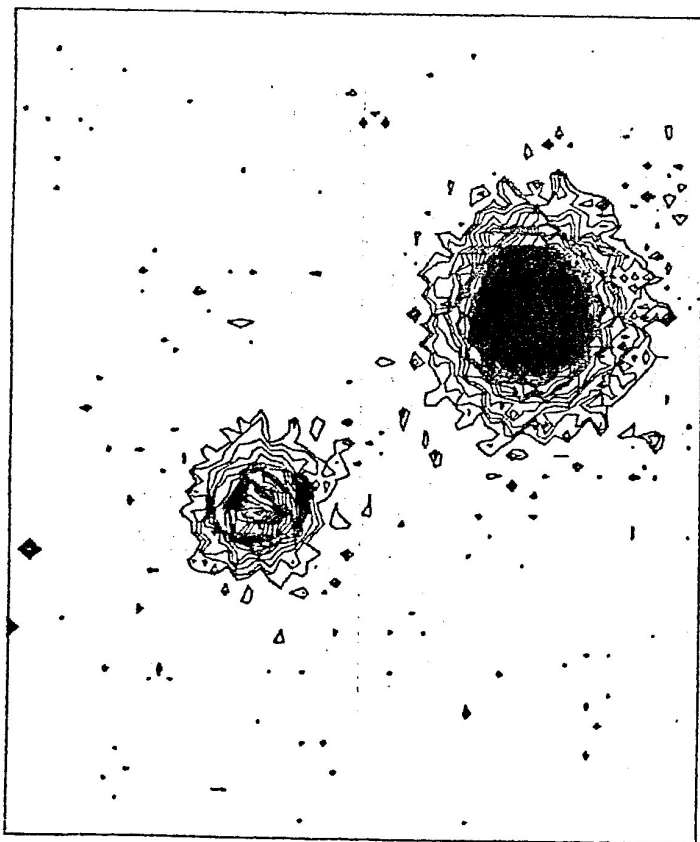
Y= 1 A 84
PAS: 1

PAS EN D: 50.000

SEUIL: 100.000

a) Pose élémentaire (0,25s)

ADS 16519



FICHER
DOR311.DAT

X= 1 A 64
PAS= 1

Y= 1 A 84
PAS: 1

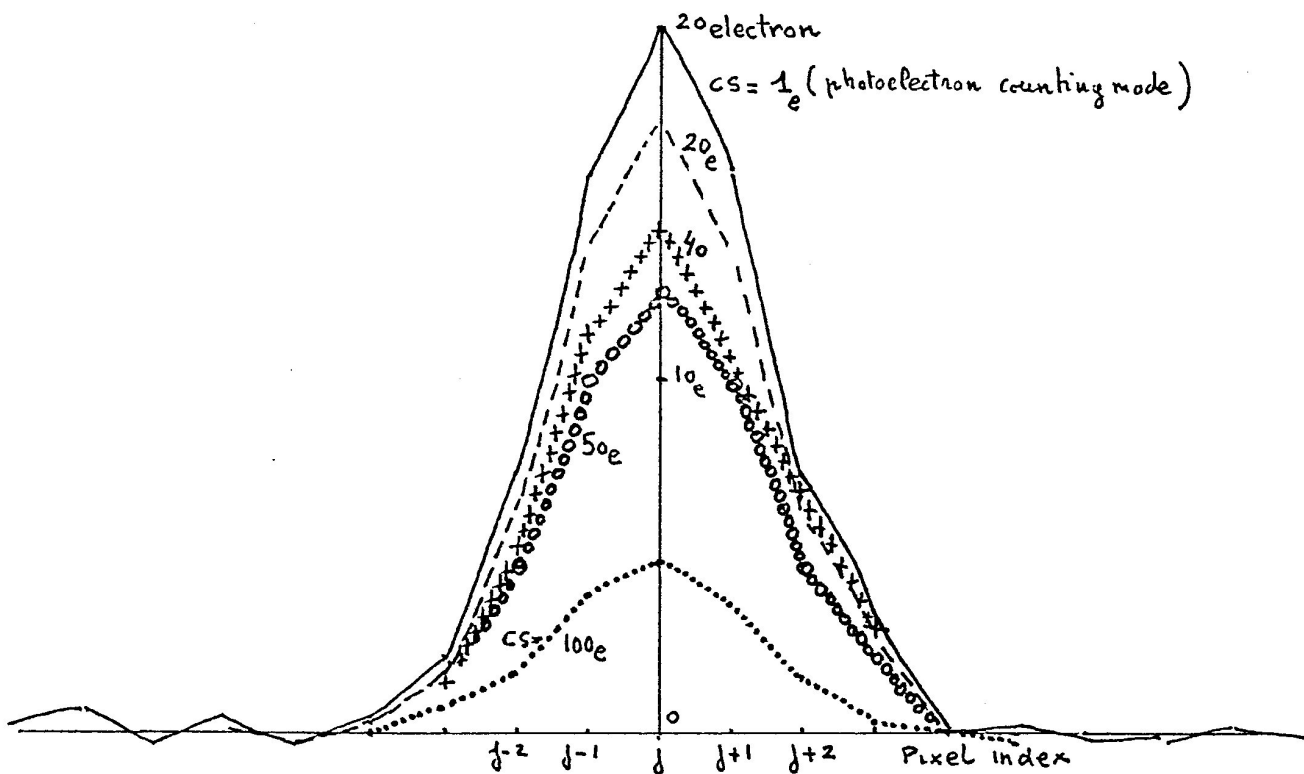
PAS EN D: 10.000

SEUIL: 30.000

b) Compositage de 100 images

Figure 5

Erreur d'arrondi lors du compositage à faible flux



Output read-out when adding 10.000 exposures for various coding step cs - Peak intensity of the star equal to $20e$ - Read-out noise $\Delta\eta_{ij} = 50$ electrons rms.

FIGURE NO 6

Photométrie faible flux

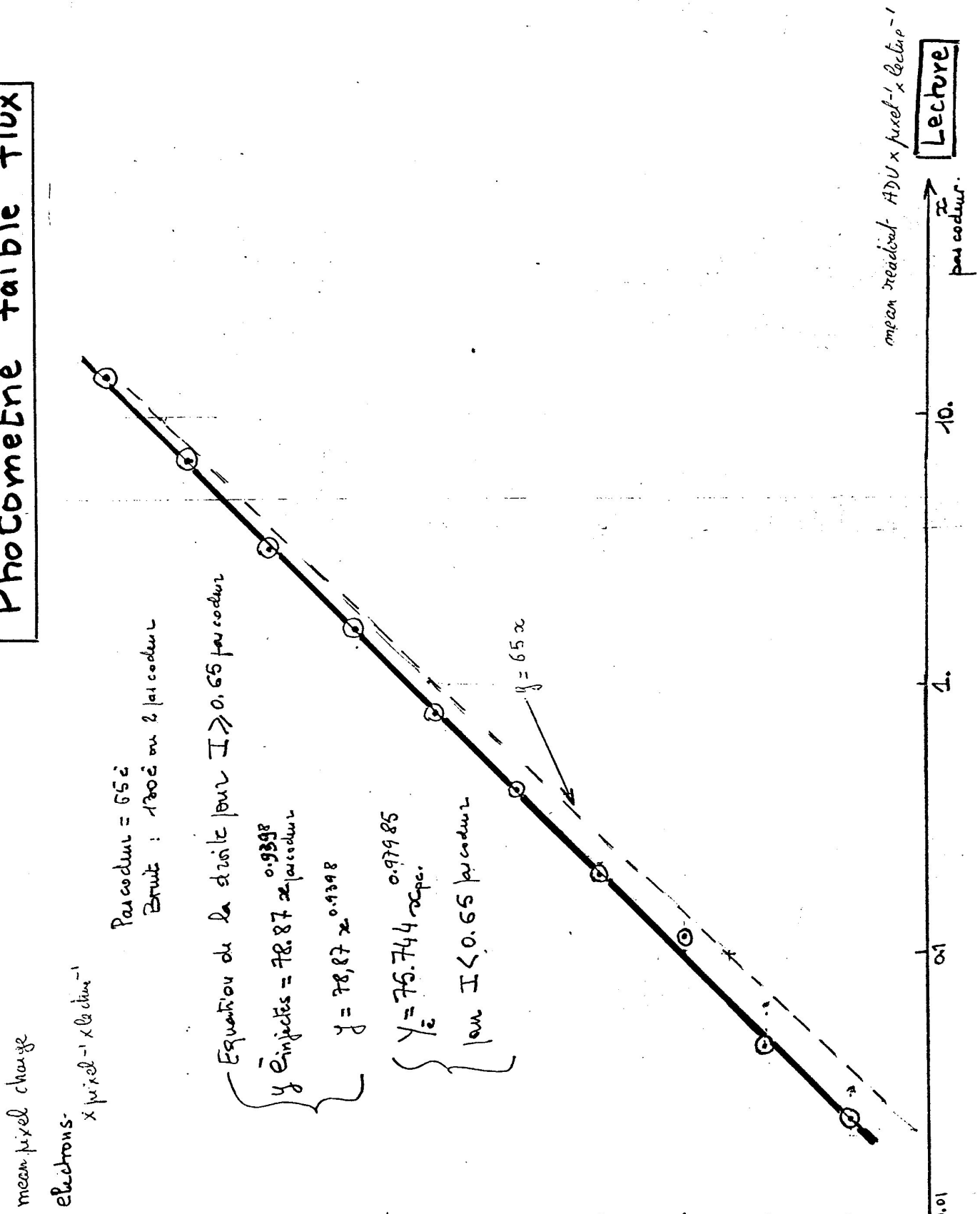


FIGURE N°7

On peut ainsi, à partir de la valeur moyenne lue après compositage en déduire la valeur de la charge des photoélectrons, que l'on aurait mesurée s'il n'y avait pas eu d'erreur d'arrondi.

Tout ceci n'a été possible que parcequ'on connaissait le comportement du bruit du CCD. Ainsi en utilisant ces corrections on a pu faire de la photométrie à faible niveau, même avec des signaux initialement noyés dans le bruit.

g) Méthodes de compositage utilisées :

Ces techniques consistent à "empiler" n clichés du même champ d'observation après les avoir recentrés. Il existe deux méthodes de recentrage : la méthode du centre de gravité et la méthode de corrélation par masques flous.

- la méthode du centre de gravité est la plus simple et la plus rapide, mais elle n'est applicable que si le champ observé contient un objet brillant ; on recentre alors tous les clichés par rapport à cet objet.
- la méthode de corrélation s'applique quand la méthode du centre de gravité est inutilisable, c'est-à-dire quand il n'y a aucun objet brillant dans le champ. Elle consiste à corréler chaque cliché du mode cinéma à un "masque flou", c'est-à-dire un cliché obtenu en intégration. Cette méthode est très performante mais beaucoup plus coûteuse en temps de calcul.

A titre d'exemple, la méthode du centre de gravité appliquée à 100 images avec le PDP 1134 demande 30 mn de temps de calcul, alors que la méthode de corrélation limitée à des translations en X et Y avec recherche du gradient maximal prend environ 5 heures (!).

6°) Conséquences de cette étude : définition de la "ciné-caméra" idéale :

- La caméra travaillera en prenant une série de poses assez courtes pour pouvoir figer les mouvements du centre de gravité des tavelures, c'est-à-dire avec des temps de poses que l'on ajustera, en fonction de l'agitation atmosphérique, entre 0,1 et quelques secondes.

- Le champ utile du CCD sera limité à la zone de cohérence spatiale de l'agitation atmosphérique, soit une valeur comprise entre 20" et 40".
- On aura intérêt à observer dans le proche infra-rouge. En effet, ~~_____~~ ρ_0 varie proportionnellement à $\lambda^{1,2}$. Donc ρ est proportionnel à $1/\lambda^{1,2}$. Quand on passe de $\lambda = 0,5 \mu\text{m}$ à $\lambda = 1 \mu\text{m}$ on obtient donc un gain de **2,3** sur la qualité des images.
- Pour réduire les effets non-linéaires du codage, on devra coder le signal analogique avec le plus grand nombre de bits possibles. Si on ne peut pas suréchantillonner le bruit de lecture tout en gardant la dynamique initiale du CCD, il faudra sacrifier celle-ci pour un meilleur codage des faibles niveaux, les seuls qui nous intéressent pour les applications prévues.
- La capacité de stockage des images devra être la plus grande possible afin de mettre en évidence des objets très faibles.
- Pour l'application à l'observation d'occultations (Cf. paragraphe **I.2°**) il serait bon d'utiliser un intensificateur de lumière, car dans ce cas, on a affaire à des objets dont la position relative varie avec le temps et on ne peut pas faire de recentrage.

II - CAHIER DES CHARGES

1°) Enoncé du cahier des charges de la caméra CCD Thomson :

La caméra devra répondre aux spécifications suivantes :

- 1 - Utilisation possible en 2 versions : CCD en vision directe ou CCD avec intensificateur de lumière ;
- 2 - Champ utile de 100 x 100 pixels stockées sur disque magnétique ;
- 3 - Cadence des poses variable entre 1 et 4 images par seconde mais à augmenter au maximum ;
- 4 - Pas codeur ajustable avec possibilité de sur-échantillonner le bruit de lecture ;
- 5 - Visualisation des images en temps réel ;
- 6 - Refroidissement du CCD vers 0° C ou moins, sans givrage du hublot ;
- 7 - Adaptation prévue pour le télescope T2M du Pic-du-Midi muni d'un PDP 1134 ;
- 8 - Délai de réalisation minimal avec état de marche souhaitable pour septembre 1983, (mission du groupe "Planètes" de l'Observatoire de Meudon qui participe financièrement à ce projet) ;
- 9 - Coût minimal.

2°) Examen rapide des différentes spécifications :

- 1 - Lorsque la caméra sera utilisée pour observer des occultations stellaires il sera intéressant d'amplifier le signal lumineux afin de réduire l'importance relative du bruit de lecture du CCD. Cela devrait permettre d'étendre ce type d'observation à des étoiles 100 fois moins brillantes. Pour d'autres applications, on conservera le CCD seul afin de pouvoir bénéficier d'une bonne sensibilité dans le proche infra-rouge (Cf. bandes du méthane pour les observations de Saturne, Uranus,...).

- 2 - Le CCD THX 31135 comporte 288 x 208 pixels. Pour des problèmes de stockage sur disque, on réduit la partie utilisée à 100 x 100 pixels. Le codage se fait sur 7 bits (cartes Thomson). Ainsi il faut 10 k octets par image. Un disque RKO : ayant une capacité de 20 M octets, on aura donc une autonomie de 2000 images, soit 30 mn avec 1 image par seconde.
- 3 - La cadence des poses sera limitée par la vitesse de stockage sur disque, mais on pense atteindre 40 k \emptyset par seconde.
- 4 - Les problèmes de non linéarité à faible flux, dûs au codage numérique développés dans le paragraphe 1.5, nous imposent de suréchantillonner le bruit de lecture.
- 5 - Une visualisation en temps réel est nécessaire pour la mise au point optique, un contrôle de la qualité des images et du centrage du télescope. Avec la coupole du télescope de 2 m, l'opérateur ne voit pas l'état du ciel à moins de sortir à l'extérieur sur une passerelle. Cette visualisation est donc très utile en cas de temps incertain avec des passages de nuages (atténuation sporadique du signal).
- 6 - Le refroidissement du CCD réduit la valeur du bruit, du courant d'obscurité. Par contre, le givrage du hublot d'entrée de la lumière serait catastrophique, pour des raisons évidentes.
- 7 - Ceci impose une distance frontale (distance de la face d'entrée au plan du CCD) de 180 mm et de nombreuses contraintes pour le câblage.
- 8 - Réaliser un ensemble qui marche au bout de 3 mois est une entreprise hasardeuse, quand beaucoup de fournisseurs vous demandent 1 à 2 mois de délai, parfois même 4 mois. Il faut téléphoner très souvent pour maintenir le contact et accélérer la procédure.
- 9 - Pour cela, il faut adopter des solutions simples et consulter le plus grand nombre possible de fournisseurs.

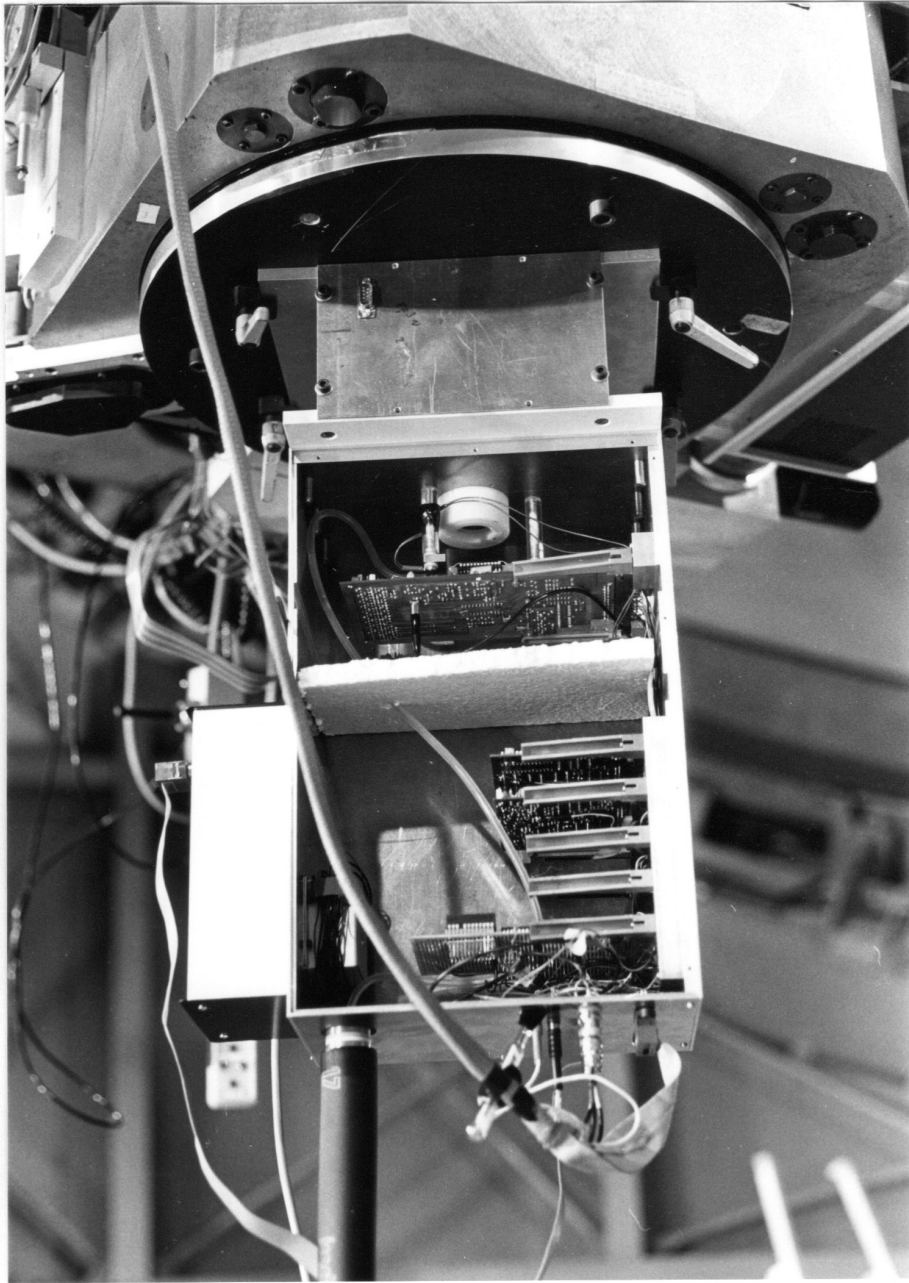


Photo n° 5 - Vue d'ensemble de la caméra - Mission au
Pic-du-Midi du 21 au 23 Juin 1983

III - DESCRIPTION TECHNIQUE
DE L'ENSEMBLE REALISE

1°) Description sommaire de la caméra :

Elle correspond au synoptique de la figure n° 8 .

La caméra comprend :

- un interfaçage optique pour le télescope de deux mètres du Pic-du-Midi,
- un composant CCD ou un dispositif CCD intensifié par galette de micro-canaux de gain 10000,
- un obturateur synchronisé,
- un dispositif de refroidissement par circulation d'azote liquide pour réduire le courant d'obscurité (température voisine de 0°C),
- une électronique de commande,
- un interface pour ordinateur PDP 1134, que l'on réalisera en Juillet.

La photographie n° montre l'ensemble de la configuration testée au Pic-du-Midi lors de la mission du 21 au 23 juin. On peut y voir le boîtier de la caméra, les alimentations, le réservoir d'azote liquide et un moniteur vidéo sur lequel on visualisait les images.

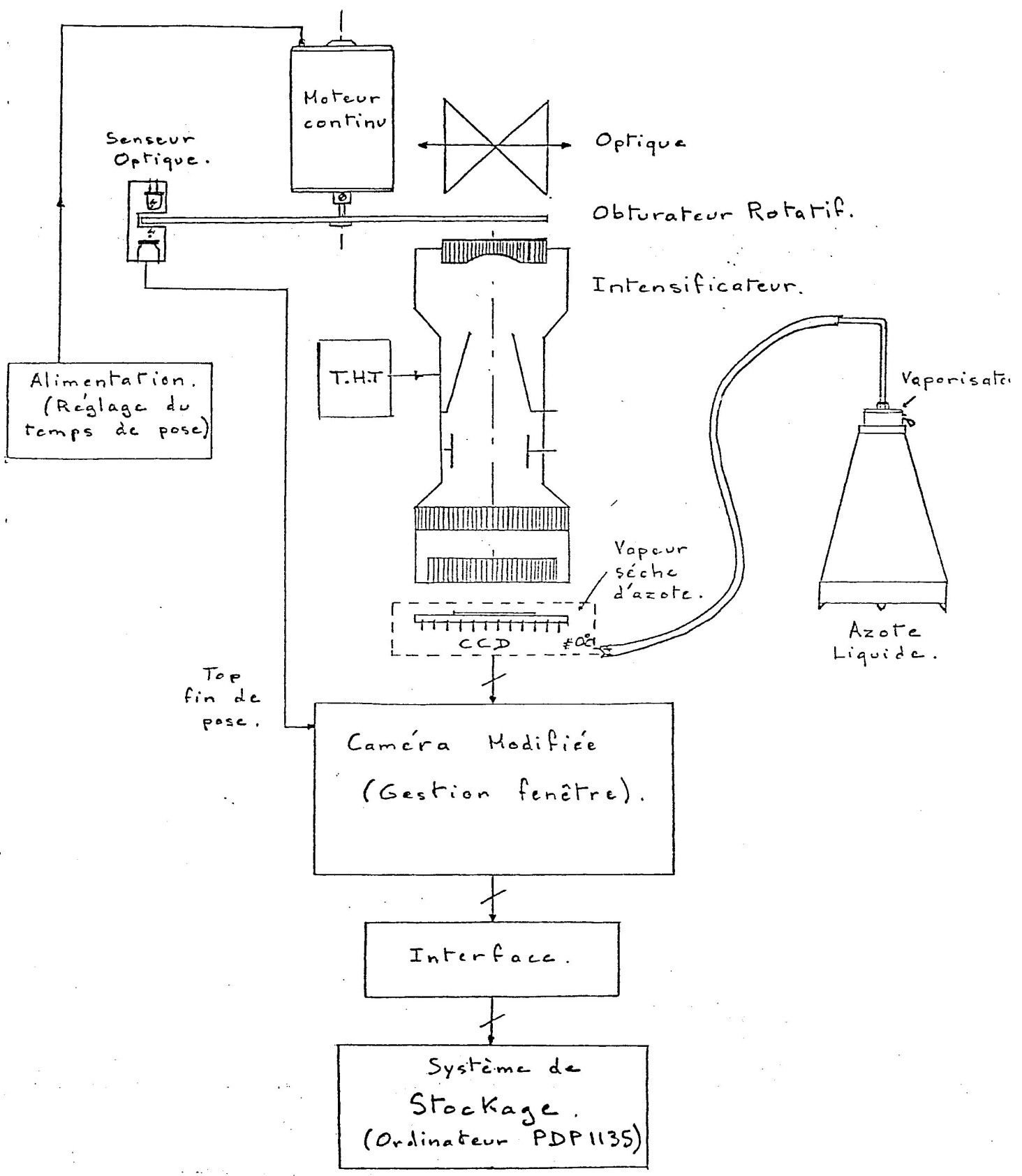
Les planches n° 9 et 9bis ainsi que la photographie n° 5 montrent l'emplacement des divers composants à l'intérieur du boîtier de la caméra.

2°) Le CCD Thomson THX 31135 :

a) Mécanisme des transferts :

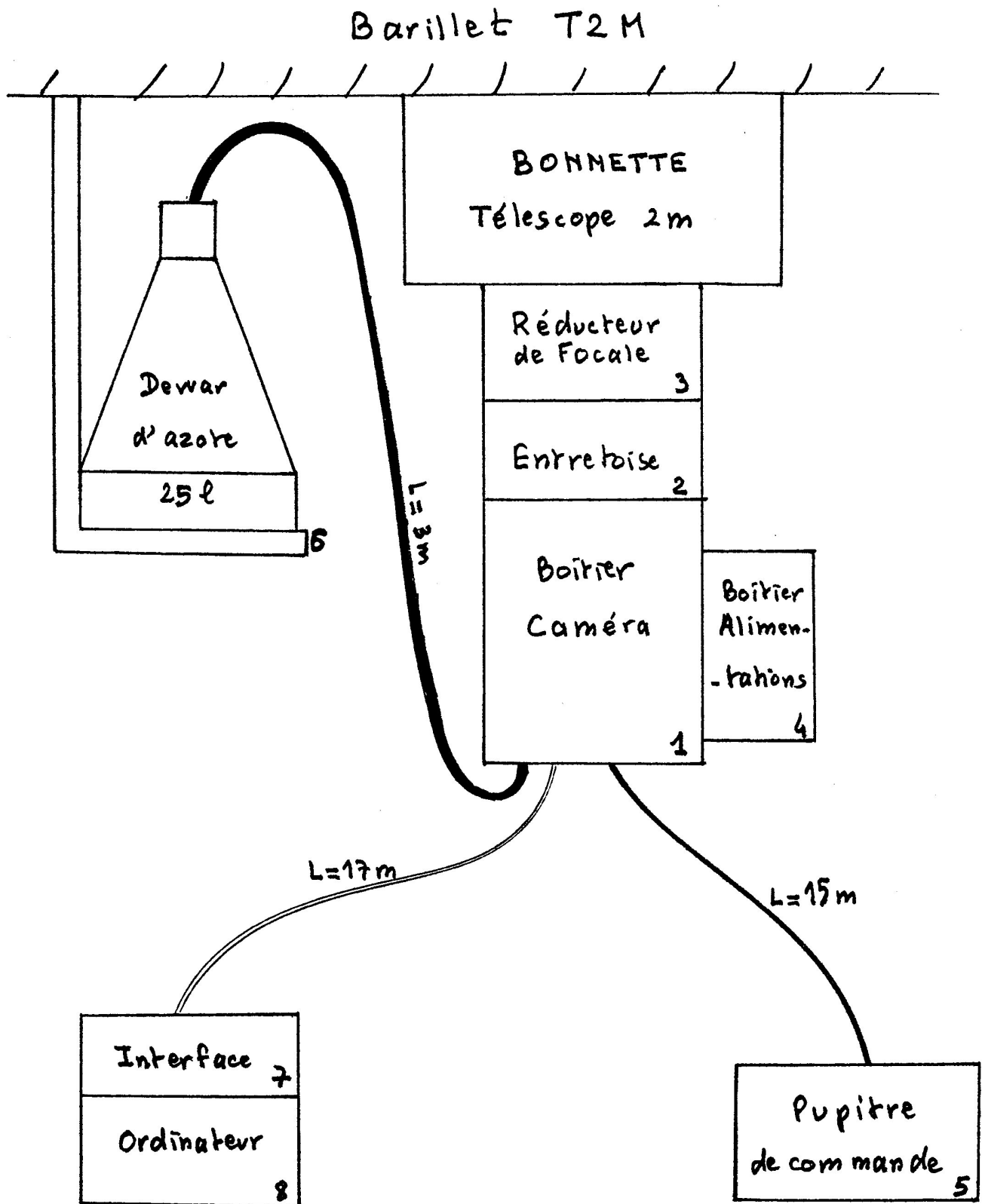
Il comprend deux zones de travail : la zone image où s'effectue l'intégration des photocharges et la zone mémoire* qui constitue une sorte de mémoire-tampon. Le transfert de la zone image en zone mémoire est de l'ordre de 0,6 ms. Lorsque la zone image est

* On doit masquer la zone mémoire par un cache opaque à la lumière pour que le CCD fonctionne dans ce mode.

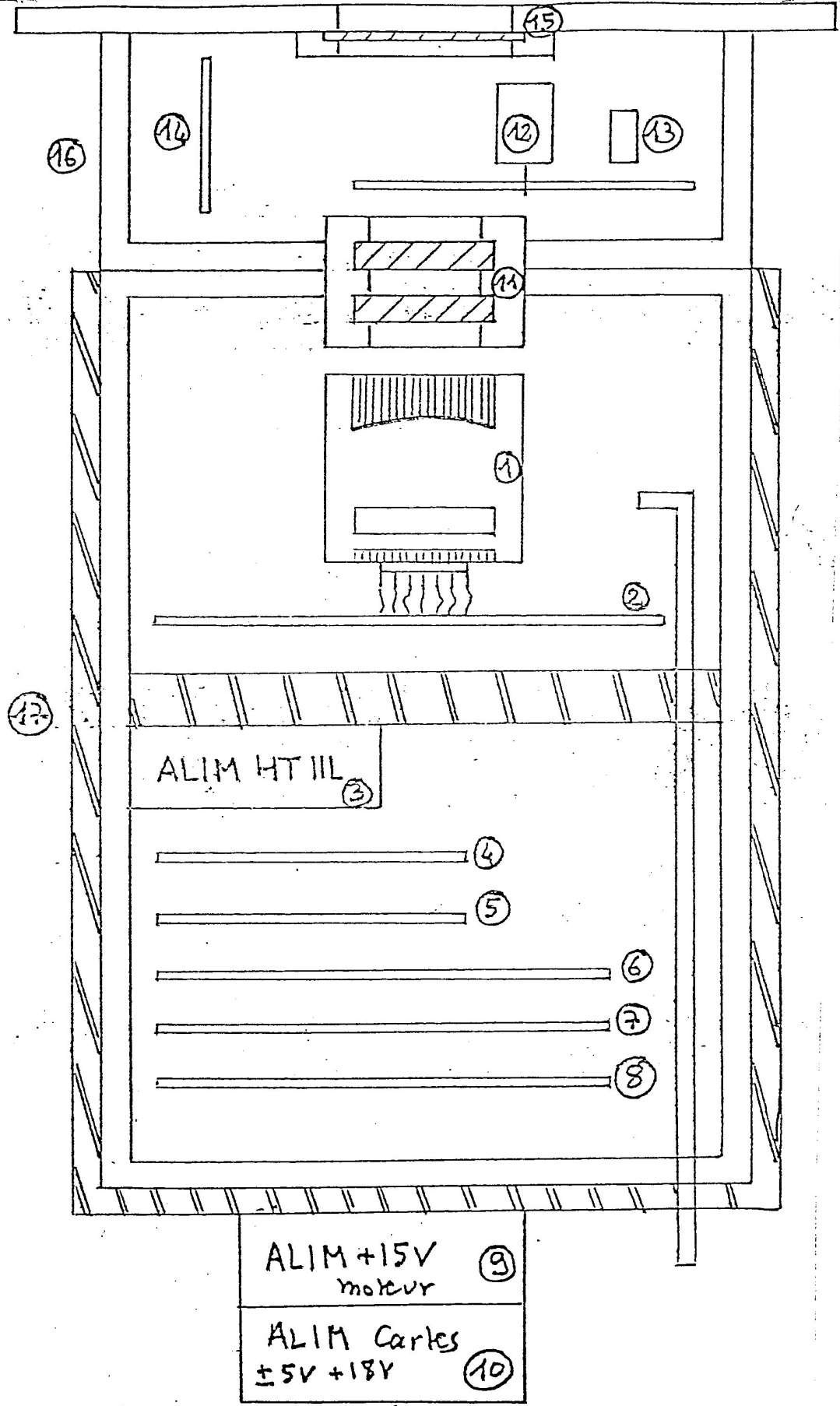


Synoptique de l'ensemble caméra

FIGURE N° 8



Sous-ensembles et liaisons
Figure n° 8 bis



Vue d'ensemble de la caméra
 (voir légende ci-contre)

FIGURE N° 9

1. Intensificateur + CCD: THX 31135 Thomson
2. Carte THX 1038 Thomson: Interface TTL/MOS, préampli CCD
3. Alimentation Haute Tension pour l'intensificateur: THX 1057 Thomson
4. Carte THX 5002 Thomson: génération des signaux de commande
5. Carte THX 5003 Thomson: traitement vidéo, conversion analogique-numérique
- 6-7. Cartes de gestion de la fenêtre 100 par 100 pixels
8. Carte de visualisation sur oscilloscope
9. Alimentation +15 V, 250 mA pour le moteur (12)
10. Alimentations +5 V, -5 V, +10 V, +18 V
11. Hublot double traité anti reflet
12. Moteur et réducteur
13. Senseur optique
14. Carte senseur optique et commande moteur
15. Tiroir à filtres avec bague microcontrôle
16. Entretoise caméra
17. Boîtier caméra

Légende de la figure n° 9

vidée de son information, elle revient à la phase d'intégration pour stocker les charges de la pose suivante. Pendant cette nouvelle intégration, l'information de la pose précédente est transférée ligne à ligne dans le registre de lecture. Ensuite, chaque charge est transférée séquentiellement vers un circuit de sortie unique. Ce circuit assure la conversion charges-tension du signal. La capacité C de l'étage de sortie vaut typiquement 0,22 pF. Le gain G du préampli intégré dans le circuit vaut 0,72. On a donc en sortie du CCD, une tension U telle que :

$$U = N \times G \times q/C$$

soit $U = N \times 5,2 \times 10^{-7}$ Volt

(avec N : nombre de photocharges lues).

b) Format utilisé :

La zone image est rectangulaire : 4,32 mm dans le sens vertical (V) sur 5,82 mm dans le sens horizontal (H). Elle comprend 144 x 208 points élémentaires (pixels). Chaque pixel fait 30 μ m (V) x 28 μ m (H) (figure n°10).

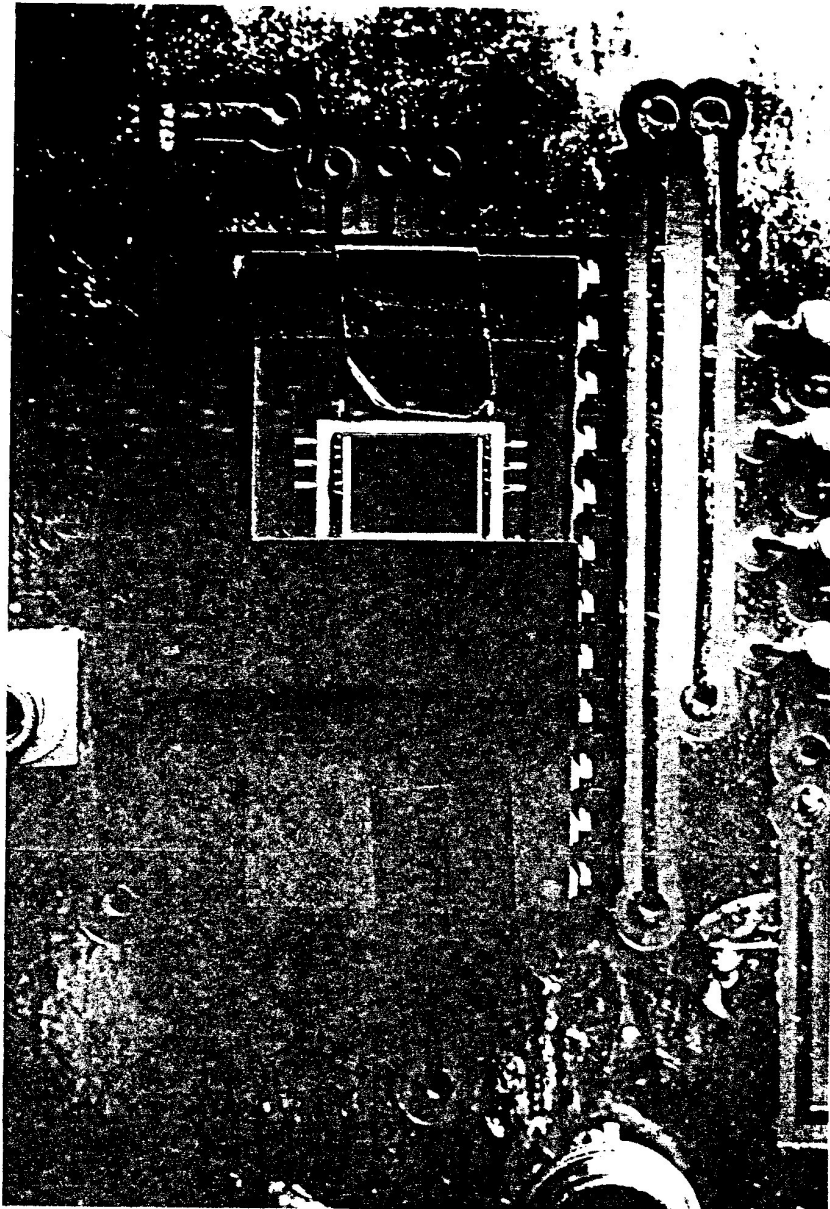
* Fonctionnement entrelacé : Pour limiter le moirage (dans le sens vertical) les zones de collection sont décalées une trame sur deux d'un demi-pixel dans le sens vertical (figure n°11).

* Fenêtre 100 x 100 : Pour des raisons développées dans le paragraphe , on n'utilise qu'un format de 100 pixels X 100 pixels. Ainsi donc la zone utile du CCD fait 3 mm x 2,8 mm, d'où un champ de :

- 12,4" x 11,5" au foyer F/25 du télescope de 2 m soit une échelle de 8 pixels par seconde d'arc
- et 24,8" x 23" avec le réducteur de focale, soit 4 pixels par seconde d'arc.

L'échelle de 8 pixels pour une seconde d'arc est gênante lorsqu'on observe des objets faibles, et qu'on ne peut pas faire de compositage (cas des observations d'occultations). Aussi, il est nécessaire d'équiper cette caméra d'un réducteur de focale*. Une réduction de la focale d'un facteur 2 amènera une diminution du temps de pose d'un facteur 4.

* en construction actuellement



Le CCD Thomson

ORGANISATION - FONCTIONNEMENT

L'organisation du TH X31135 est schématisée sur la figure 2. La désignation des signaux de commande est donnée dans le Tableau I. Le brochage est donné sur la figure 7.

Nota : Toutes les broches doivent être connectées.

TABLEAU I - Désignation des signaux de commande

Φ_{1P}, Φ_{2P}	Phases de commande de la zone image
Φ_{1M}, Φ_{2M}	Phases de commande de la zone mémoire
Φ_{1L}, Φ_{2L}	Phases de commande du registre de lecture
Φ_R	Phase de remise à niveau
VDD	Tension drain de l'étage de sortie
VDR	Tension de remise à niveau
VSS	Tension substrat
V _e	Tension d'entrée d'image
VDe	Tension de la diode d'entrée du registre
VGe	Tension de la grille d'entrée du registre
VGS	Tension de la grille de sortie du registre
V _s	Tension source de l'étage de sortie
S	Sortie vidéo
T	Point test

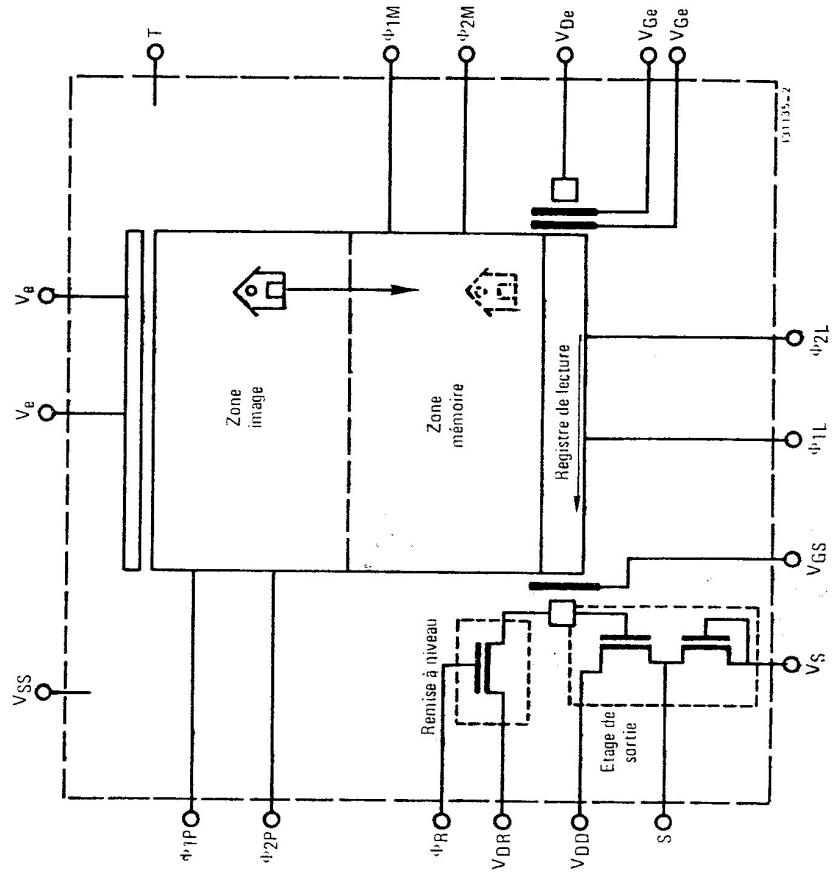


Figure 2 - Organisation du TH X31135

Pas du pel (figure 1) : $30 \mu\text{m}$ (V) x $28 \mu\text{m}$ (H).
 Dimensions de la zone image : $4,32 \text{ mm}$ (V) x $5,824 \text{ mm}$ (H).
 Dimensions du circuit : $9,6 \text{ mm}$ (V) x $7,2 \text{ mm}$ (H).

Une image est constituée de deux trames de 144 lignes. Chaque trame comporte une ligne supplémentaire (145 au total), lue pendant la suppression trame.

Chaque ligne comporte 8 points optiquement masqués suivis de 208 points image puis de 2 points masqués (218 au total). Les points masqués sont lus pendant la suppression ligne ; les points 5 et 6 sont représentatifs du niveau d'obscurité.

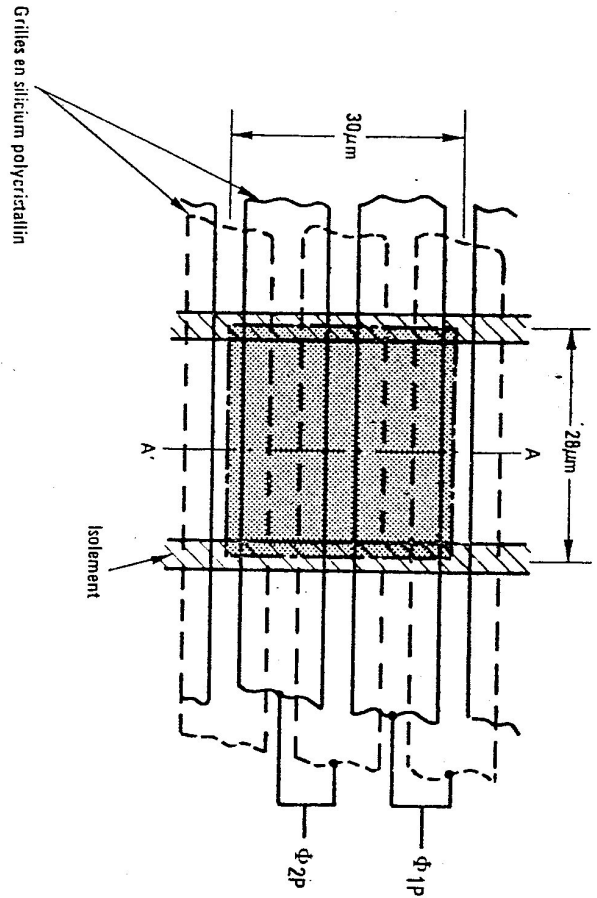


Figure 1a - Vue en plan d'un photoélément

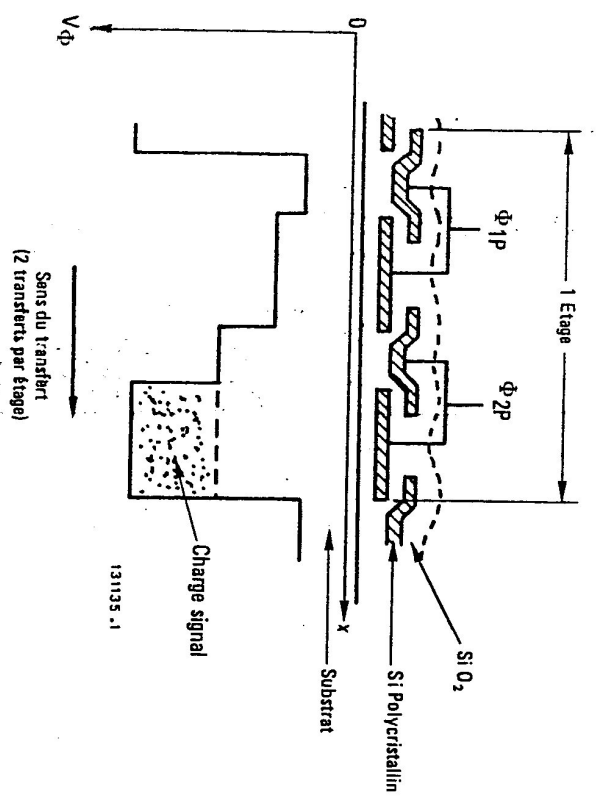


Figure 1b - Vue en coupe (A-A') d'un photoélément et profile des potentiels

Figure 1 - Définition géométrique d'un photoélément

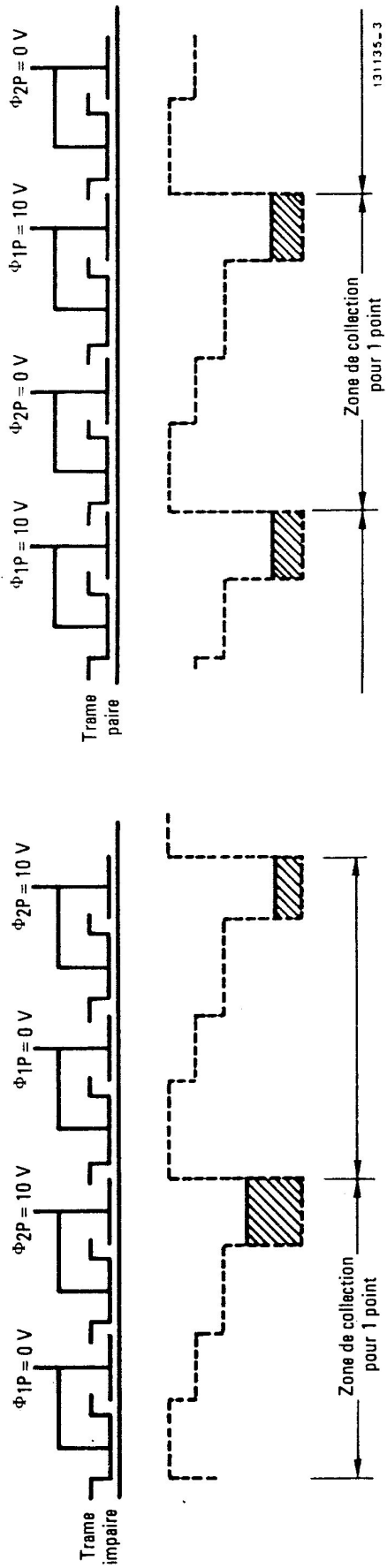


Figure 3 - Principe de l'entrelaçage

c) Nécessité d'un "chopper" (obturateur tournant) :

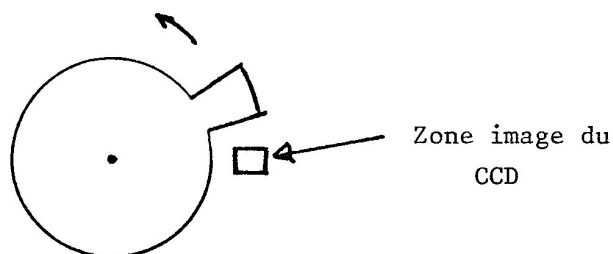
Lors du transfert des charges de la zone image à la zone mémoire, il peut se produire un "traînage" des images d'objets brillants. En effet, bien que ce temps de transfert soit d'environ 0,6 ms, une étoile brillante placée dans le champ d'observation continue à déverser des centaines de photons dans les cases qui lui correspondent. Ces photocharges perturbent ainsi le transfert des charges placées en amont.

Calculons l'influence de cette perturbation : le temps de transfert des 144 lignes d'une trame dure 0,6 ms. Donc le temps moyen de "passage" d'une photocharge dans un site donné est de 4,17 μ s. Si l'on compare cette valeur au temps d'exposition global de 250 ms (cadence de 4 images par seconde) on obtient $16,7 \times 10^{-6}$, ce qui exprimé en magnitudes ($-2,5 \log \frac{E1}{E2}$) donne $\Delta m = 11,9$ magnitudes.

Ainsi, donc la perturbation causée par un objet A de magnitude 6 pendant le transfert de 0,6 ms est équivalente au signal émis par un objet B de magnitude 18, intégré pendant 250 ms. Mais cet objet A perturberait aussi de façon notable d'autres objets 10 fois moins brillants que B (magnitude 15,5).

Pour éviter cela, on utilise un obturateur tournant, qui pour chaque transfert, cache la zone Image du CCD. Le temps de dégagement et d'engagement du chopper entraîne une perte du temps d'intégration disponible de 4 % (c'est pour diminuer ces pertes, que ce chopper est dissymétrique, et a dû être équilibré par une masselotte).

C'est un photosenseur qui synchronise le transfert image-mémoire. Un autre avantage important du chopper est de pouvoir, en changeant le masque, diminuer le temps d'exposition du CCD tout en maintenant la cadence de stockage à la valeur maximale (environ 4 images par seconde). Ceci est utile lorsqu'on observe des objets brillants (ou avec l'intensificateur de lumière) et que l'agitation atmosphérique a une constante de temps plus faible que 0,25 s.



LES CARTES THOMSON

Synoptique de la caméra en mode vidéo.

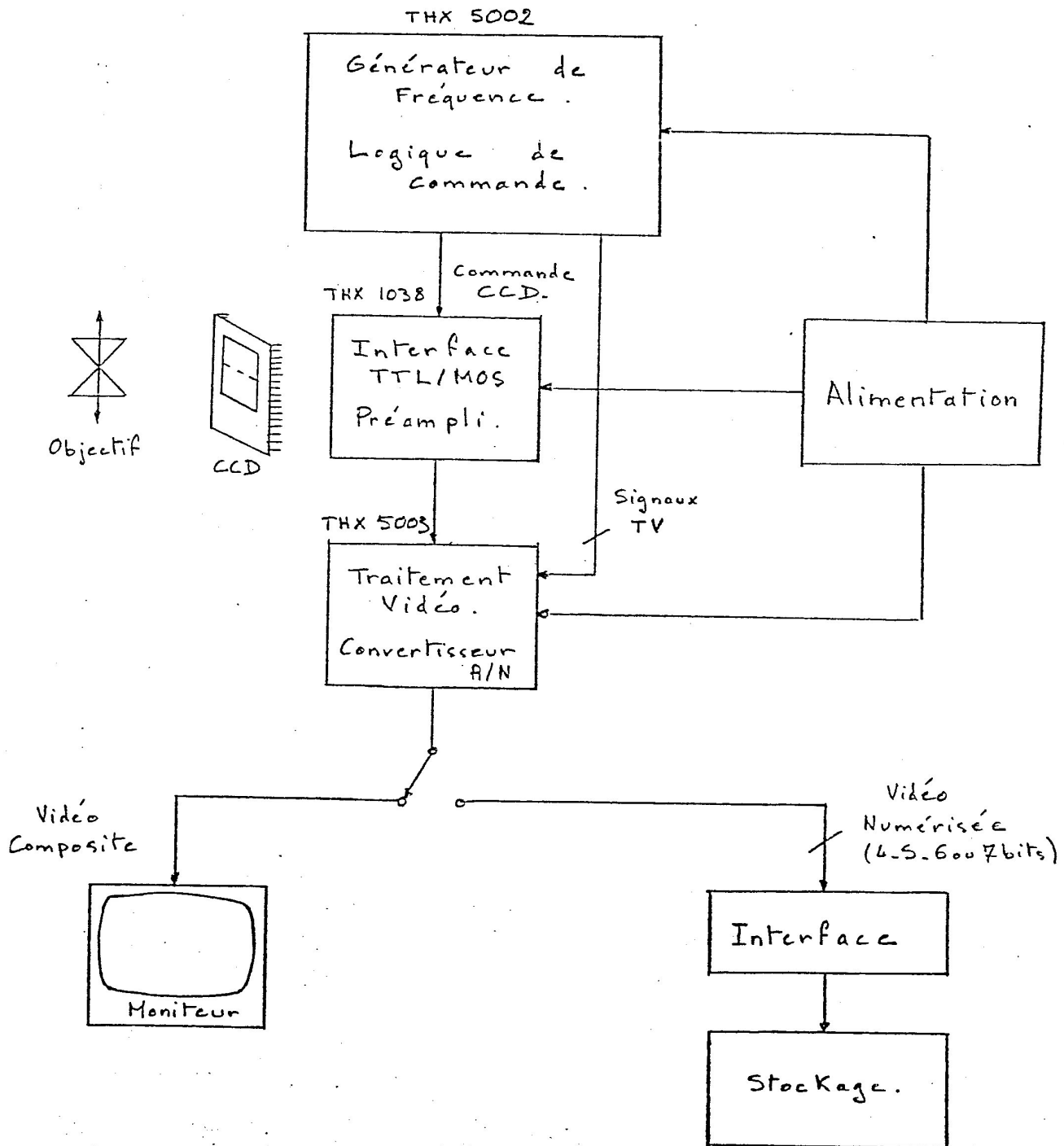


FIGURE N° 12

Remarque : A la place du chopper, nous aurions pu utiliser un obturateur électromécanique rapide (jusqu'à 4 obturations par seconde) mais des impératifs de coût, de délai et de fiabilité nous ont amené à choisir la solution de l'obturateur tournant.

3°) L'électronique de visualisation et de commande :

Le CCD peut fonctionner actuellement dans deux modes :

- mode vidéo
- mode "oscilloscope".

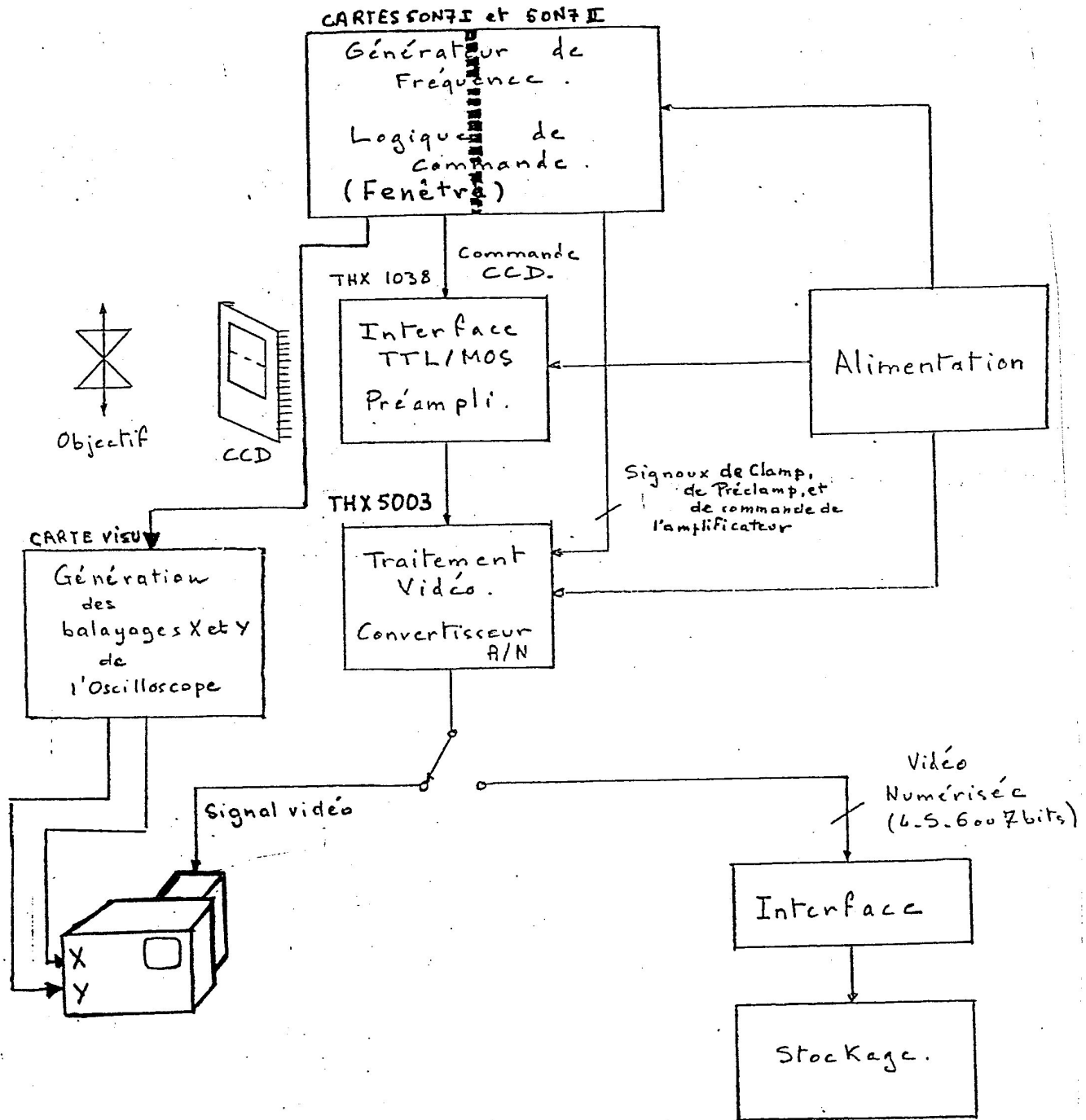
a) Mode vidéo (figure n°12) :

Le mode vidéo utilise la totalité de la zone image : 144 x 208 pixels avec une cadence de 25 images par seconde. Ce mode fonctionne avec les 3 cartes Thomson fournies avec le CCD :

- la THX 1038, qui est liée au CCD, comprend le préampli vidéo (gain voisin de 10) et les circuits d'interface TTL/MOS qui permettent de commander toutes les phases d'Horloge du CCD
- la THX 5002 : génère les fréquences de base et les signaux de commande du CCD, en TTL
- la THX 5003 assure la compatibilité des signaux de sortie avec les standards "vidéo". De plus, elle contient un convertisseur Analogique/Digital rapide, mais qui ne permet un codage que sur 7 bits.

b) Mode "oscilloscope" (figure n°13) :

Le fait de visualiser une fenêtre 100 x 100 à partir d'un format supérieur rend inutilisable le standard vidéo. Pour les tests, G. Bailleul et F. Avitabile ont réalisé une carte permettant la visualisation sur un oscilloscope. Mais dans la configuration définitive les cartes de génération de la fenêtre 100 x 100 (50 N7I et 50 N7II) seront associées au "mode cinéma" et les signaux codés seront stockés sur disque via un interface Digital et l'ordinateur PDP 1134.



Synoptique de la caméra modifiée

On remplace la carte THX 5002 par les cartes 50N7I et 50N7II et on ajoute la carte de génération des balayages X et Y

FIGURE N° 13

Les cartes 50 N71 et 50 N7II contiennent la logique de commande de la fenêtre 100 x 100, elles ont pour but de mettre le registre de sortie à zéro sans tenir compte du niveau du signal pour tous les pixels situés hors de la fenêtre 100 x 100.

La visualisation sur oscilloscope se fait grâce à une carte qui génère le balayage en XY de l'oscilloscope synchrone avec le signal vidéo. L'image obtenue en appliquant ce signal sur la Whenelt de l'oscilloscope (ainsi le signal vidéo module l'intensité du faisceau électronique de l'oscilloscope).

c) Visualisation TV :

Une visualisation plus performante de la fenêtre 100 x 100 sur un moniteur TV est en cours de réalisation.

d) Variation du gain de l'ampli vidéo :

Compte tenu des problèmes photométriques à faible flux (Cf. paragraphe 15), il faudra ajuster le gain de l'amplificateur vidéo.

e) Commande de la cadence de prise de vues :

Elle se fait par l'intermédiaire du moteur entraînant le chopper. Un senseur optique est couplé avec l'obturateur tournant, et génère les tops de transfert image-mémoire. On peut donc commander la cadence des prises de vues en agissant sur la tension d'alimentation du moteur à courant continu. (avec une tension de 12 V, on obtient 5 images par seconde).

4°) Partie optique (figure n°14) :

a) Distance frontale :

La caméra montée doit avoir une distance frontale de 200 mm. On utilise deux hublots en verre d'épaisseur $e = 8$ mm, ce qui "recule" le plan focal de $x = 2e(n-1)$ soit avec $n = 1,5$: $x = 8$ mm. La distance géométrique de la face avant de la caméra au plan image du CCD est donc égale à 208 mm.

b) Le réducteur (figure n° 14 b) :

J'ai utilisé des optiques disponibles dans le laboratoire : deux objectifs Clairaut de focale 230 mm et 70 mm. L'entretoise mécanique (200 mm de hauteur hors tout) est actuellement en construction à l'atelier du Pic-du-Midi.

c) Tolérances pour le hublot :

C'est un hublot composé de deux lames à faces parallèles (MTO). Chaque lame fait 8 mm d'épaisseur avec un diamètre standard de 31 mm. Les tolérances sont elles-aussi standards : $\lambda/4$ sur une face, $\lambda/8$ sur l'autre. Ainsi la combinaison des deux donne un écart maximum de $3\lambda/4$ sur 31 mm, soit $\lambda/10$ sur la pupille qui fait 4 mm à F/12,5 (cas d'observations avec le réducteur de focale). Cette valeur de $\lambda/10$ sert de base au calcul des optiques de bonne qualité pour l'astronomie, ainsi donc la présence de ce hublot n'affectera pas la qualité des images observées.

d) Traitement du hublot :

Le coefficient de transmission d'une surface air/verre est de l'ordre de 95 %. Pour ce hublot on a 4 surfaces à traverser, soit un coefficient global de $(0,95)^4 = 0,82$. Sans traitement on aurait donc une perte de 18 % par réflexion.

Avec un traitement anti-reflets 400-700 nm on réduit les pertes à 0,5 % par surface, soit 2 % pour le hublot complet.

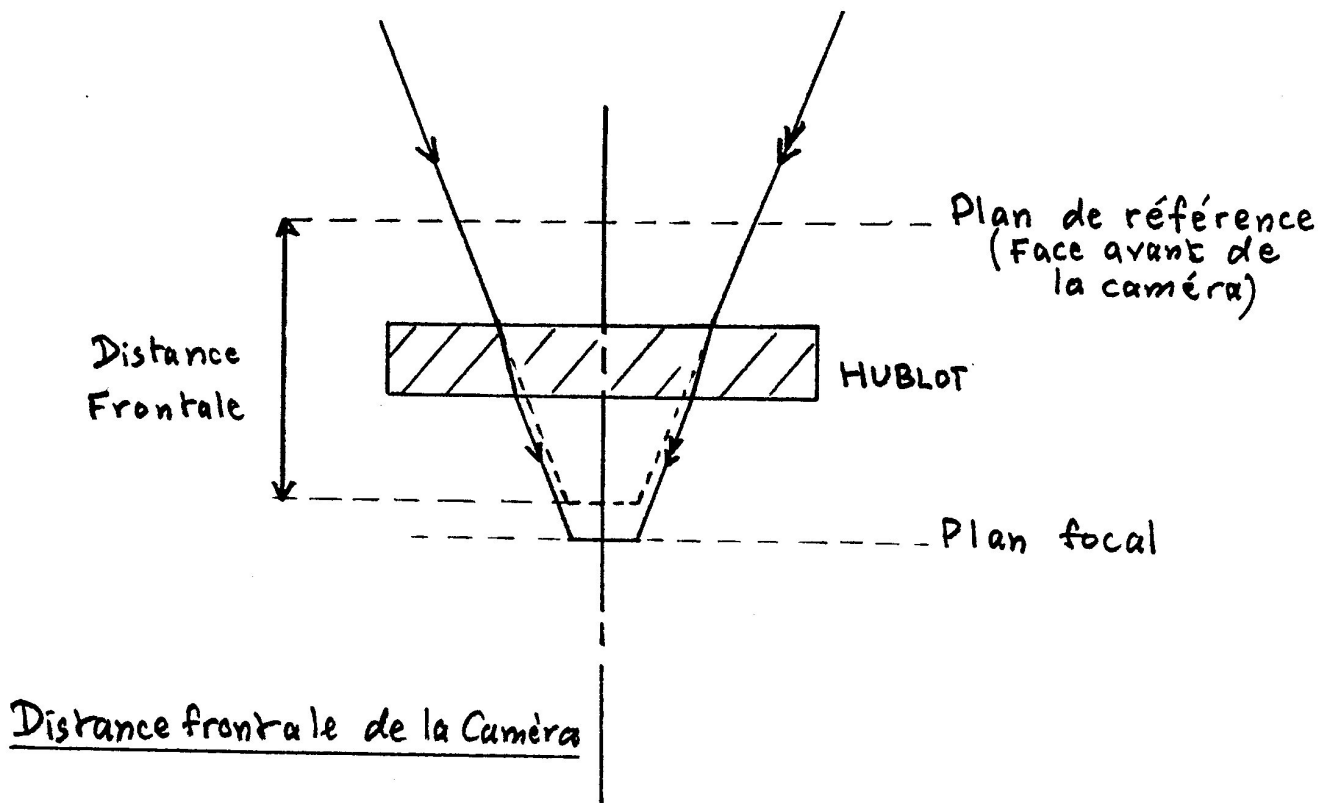
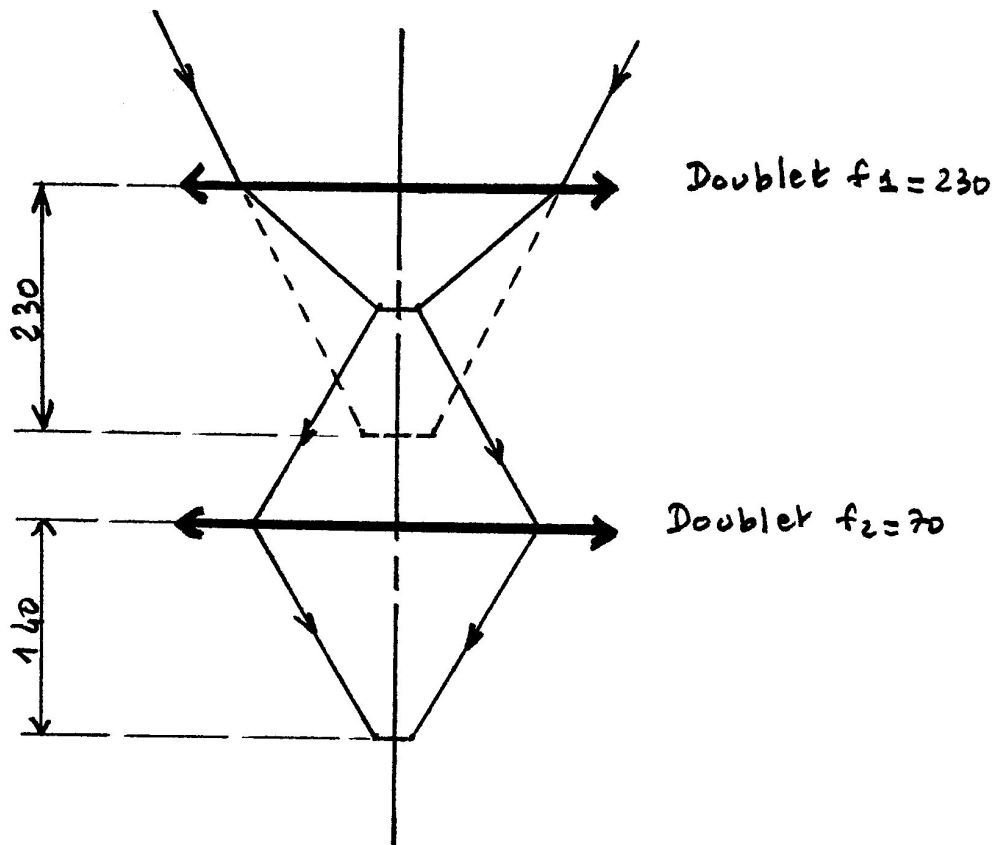


Figure n° 14a



Réducteur de focale

Figure n° 14b

5°) Le refroidissement du CCD :

a) Le problème :

Pour réduire le courant d'obscurité du C.C.D., qui sature en quelques secondes d'intégration à 20°C, il faut refroidir le circuit intégré. Une solution classique utilisée en astronomie est décrite par la photo n° 3 . Le circuit est refroidi par une tresse plongeant dans un cryostat d'azote liquide. Pour éviter les condensations de givre et améliorer l'isolation thermique, on crée un vide dans l'enceinte du C.C.D. cependant pour éviter le givrage du hublot d'entrée, il faut parfois le réchauffer, lorsque le dispositif optique n'autorise que quelques millimètres de distance frontale entre la puce et la hublot.

Ce système est bien adapté aux caméras C.C.D. utilisées en mode intégration simple où la puce est refroidie à - 100°C environ. Cependant c'est une solution coûteuse (cryostat évalué à 30 000 F et tête C.C.D. à 20 000 F) qui ne paraît pas bien justifiée pour un modeste refroidissement aux alentours de 0°C. De plus les ensembles étudiés par le laboratoire sont très compacts et ne permettent pas de faire facilement les modifications nécessaires à la mise au point d'un prototype.

Il fallait plutôt trouver une solution simple, peu coûteuse et qui puisse être mise en oeuvre rapidement : un refroidissement par circulation d'azote sec gazeux et froid.

b) Premier avantage d'une circulation d'azote gazeux :

Pour éviter le givrage sur le circuit et les cartes électroniques, il n'y a que deux solutions simples : soit faire le vide, soit créer une atmosphère sèche, avec de l'azote par exemple. Le vide pose des problèmes d'étanchéité, qui rejouent sur le coût final. On choisit donc la solution d'une atmosphère d'azote en légère surpression par rapport à l'air ambiant, cet azote étant l'agent réfrigérant lui-même.

c) Le système de refroidissement :

On peut penser aussi à utiliser un système à effet Peltier. C'est une solution qui semble élégante mais qui est onéreuse, assez délicate et longue à mettre au point. Il faudrait de toute façon générer une atmosphère d'azote pour éviter le givrage. On a donc choisi le refroidissement

par circulation d'azote gazeux, qui ne nécessitait aucun investissement pour le laboratoire déjà équipé de ce genre de matériel. Pour générer cet azote on peut utiliser un dewar contenant de l'azote liquide (réserve importante de frigories).

A cause de la faible capacité calorifique du gaz il faudra optimiser le rendement des transferts de frigories et notamment étudier un radiateur assurant le refroidissement du circuit C.C.D.. Il se pose le problème d'une liaison dewar-caméra avec un courant d'azote très froid, du fait de la fragilité des tuyaux souples aux très basses températures.

d) Le radiateur :

Pour refroidir efficacement le CCD, on le plaque sur un radiateur en cuivre, à l'intérieur duquel on fait passer le courant d'azote gazeux.

Pour obtenir un transfert efficace des frigories du gaz dans le radiateur porte-CCD on réalise une circulation de gaz très turbulente dans le radiateur. Pour cela, on a usiné une série de chicanes à partir du perçage d'une série de trous contigus dans une plaque de cuivre qui définissent finalement le chemin de circulation du gaz (schéma n°15).

La surface extérieure a été réduite au minimum pour limiter les pertes avec le milieu ambiant.

Le radiateur assure aussi le rôle de support mécanique pour le C.C.D.

e) Conception générale (Schéma n° 9) :

L'azote gazeux provient d'un bidon dewar de 25 l équipé d'une résistance chauffante (11Ω ; $P_{max} = 200 \text{ W}$). Ce bidon est relié à la caméra par un tuyau Rodhorsil de 3 m de long, qui reste souple jusqu'à $- 50^\circ \text{ C}$. L'autonomie est d'environ 20 heures d'utilisation avec une puissance de chauffage de 50 W et de 9 heures avec 120 W. Ces puissances de fonctionnement, permettront comme nous le verrons par la suite, de satisfaire très largement aux exigences du cahier des charges : autonomie d'une nuit d'observation et température du CCD inférieure ou égale à 0° C .

La conception mécanique de la caméra (figure n° 9) s'articule essentiellement autour de trois niveaux de température différente :

- le radiateur qui permet au C.C.D. d'être le point le plus froid ($T < 0^\circ \text{ C}$)

- un premier compartiment contenant le CCD et la carte de préamplification des signaux de sortie du CCD (On avait intérêt à réduire ce compartiment à des dimensions minimales afin de faciliter le refroidissement, mais il fallait cependant utiliser des fils de liaison aussi courts que possible entre le CCD et le préampli, c'est ce qui a imposé la présence de la carte de préamplification).

- le second compartiment avec le complément des cartes de traitement et l'alimentation H.T. pour le tube amplificateur (le câble d'alimentation étant limité en longueur pour éviter des pertes). Ce compartiment est séparé du premier par une cloison en polystyrène de 20 mm d'épaisseur.

Les alimentations basse tension sont placées à l'extérieur du boîtier pour éviter un échauffement gênant.

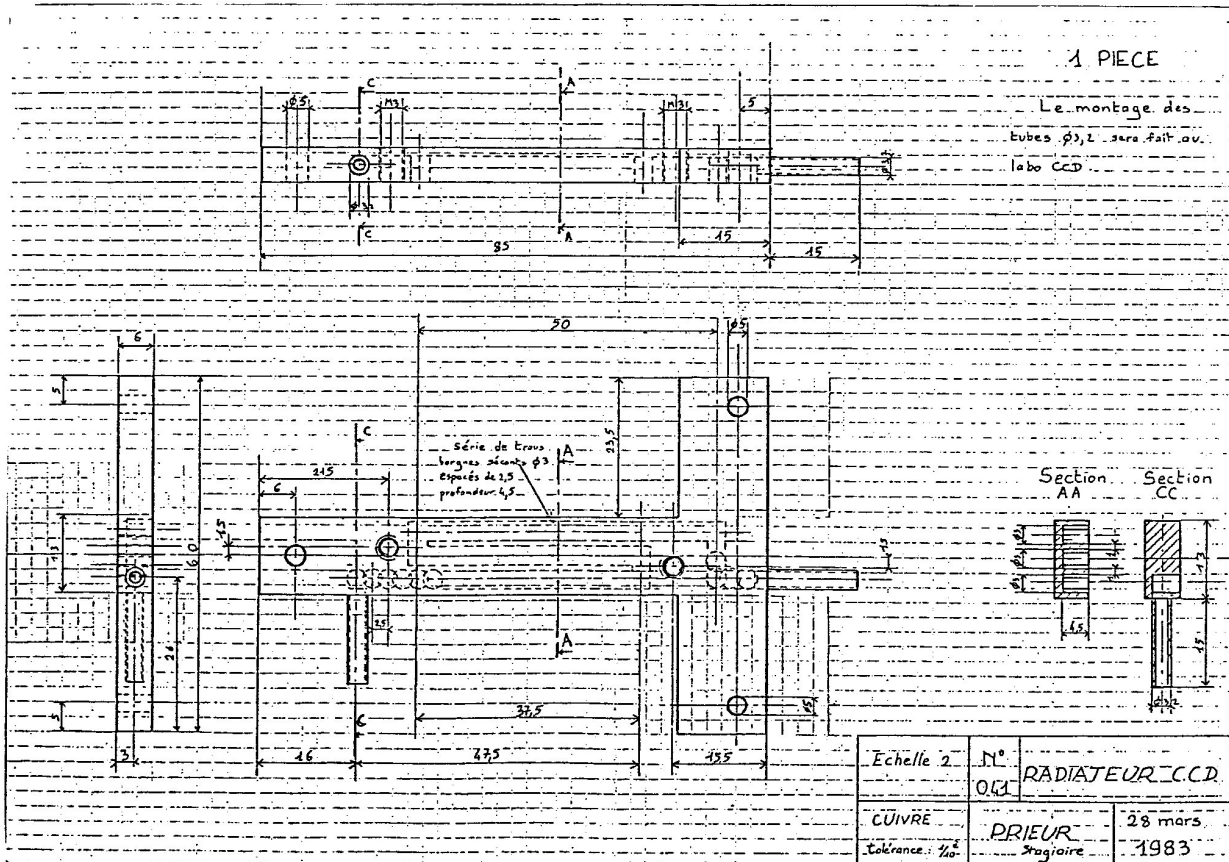


Schéma n° 15

6°) La partie mécanique et les liaisons :

Vue de l'extérieur, la caméra comporte plusieurs sous-ensembles (schéma n°813):

- 1 - Le boîtier de la caméra qui contient le CCD et les cartes électroniques. Il isole le CCD de la lumière parasite et possède une isolation thermique pour faciliter le refroidissement du CCD.
- 2 - L'entretoise fixée sur le boîtier et centrée sur l'axe optique de la caméra, sert d'interface mécanique et optique avec le télescope de 2 m du Pic-du-Midi. Elle contient un tiroir porte-filtres et un obturateur tournant (Cf. II 2 c).
- 3 - Le réducteur de focale peut être monté sur l'entretoise. Il permet d'augmenter l'ouverture relative du faisceau optique (Cf. II 4b). Dans cette configuration, il faut placer le doublet de 230 mm de focale sur la bride de 20 mm d'épaisseur fixée sur le barillet, et le doublet complémentaire de 70 mm de focale dans le tiroir à filtres de l'entretoise. Son introduction ne modifie pas la distance frontale optique de la caméra.
- 4 - Le boîtier des alimentations en courant continu pour l'électronique est fixé sur le dos du boîtier de la caméra.
- 5 - Le pupitre de commande est relié au boîtier de la caméra par un ensemble de câbles réunis dans une gaine de 15 m de longueur. Il permet de commander la cadence des poses, d'ajuster le gain de l'amplificateur vidéo et de l'intensificateur de lumière. De plus, il affiche en permanence la température du CCD.
- 6 - Le support du réservoir d'azote sera étudié pendant le mois de Juillet. La rigidification du tuyau d'arrivée d'azote (3 m de longueur) par le froid impose la fixation du réservoir Dewar d'azote liquide sur le barillet du télescope.

- 7 - L'interface avec l'ordinateur sera réalisé en Juillet et en Août prochain.
Un câble de 17 m reliera directement la caméra à une carte d'interface DIGITAL, placée à proximité immédiate de l'ordinateur PDP 1134 (situé à l'étage en-dessous du plancher de la coupole du télescope).

IV - ESSAIS TECHNIQUES AU PIC DU MIDI

(Mission au Pic du Midi du 21 au 23 Juin 1983)

1°) But de la mission :

Je voulais me placer dans des conditions réelles d'observations afin de voir s'il n'y avait pas de problèmes auxquels on n'avait pas pensé. Pour cela, j'ai utilisé quelques jours de pleine lune où le télescope pouvait être disponible.

La mission comprenait deux étapes : essais de mise au point optique sur le simulateur du télescope ; essais sur le télescope lui-même pour aborder les problèmes de refroidissement de la caméra et de la connectique. Aucune observation astronomique de nuit n'avait été programmée pour cette mission préliminaire.

2°) Déroulement de la mission :

a) Les préparatifs

Saisir une disponibilité du télescope de 2 mètres du Pic du Midi et partir au Pic du Midi avec la caméra le 21 était un pari que je voulais tenir. Je n'avais reçu le boîtier mécanique des alimentations que le Lundi 20 à 11 h du matin. J'ai donc dû travailler jusqu'à 1 h du mardi matin. Pour la première fois le boîtier était assemblé et la caméra fonctionnait en mode vidéo. Il fut cependant impossible d'avoir la visualisation de la fenêtre de 100 x 100 pixel, ce qui en principe n'était pas utile pour cette mission. Six heures plus tard, je partais pour le Pic du Midi.

J'étais déjà venu deux fois au Pic du Midi. Le dernier séjour avait eu lieu, du 15 au 30 Septembre 82, au télescope de 2 m. Mais c'était la première fois que je montais seul, pour une mission qui m'était propre. Pour l'astronome amateur que je suis, ce fut un instant émouvant d'avoir à sa disposition le plus gros télescope situé sur le territoire national.

b) Essais sur la station d'altitude (2850m)

Une première journée a été utilisée pour les tests optiques au simulateur situé près du télescope (niveau -1). Après quelques petits ennuis, on a obtenu

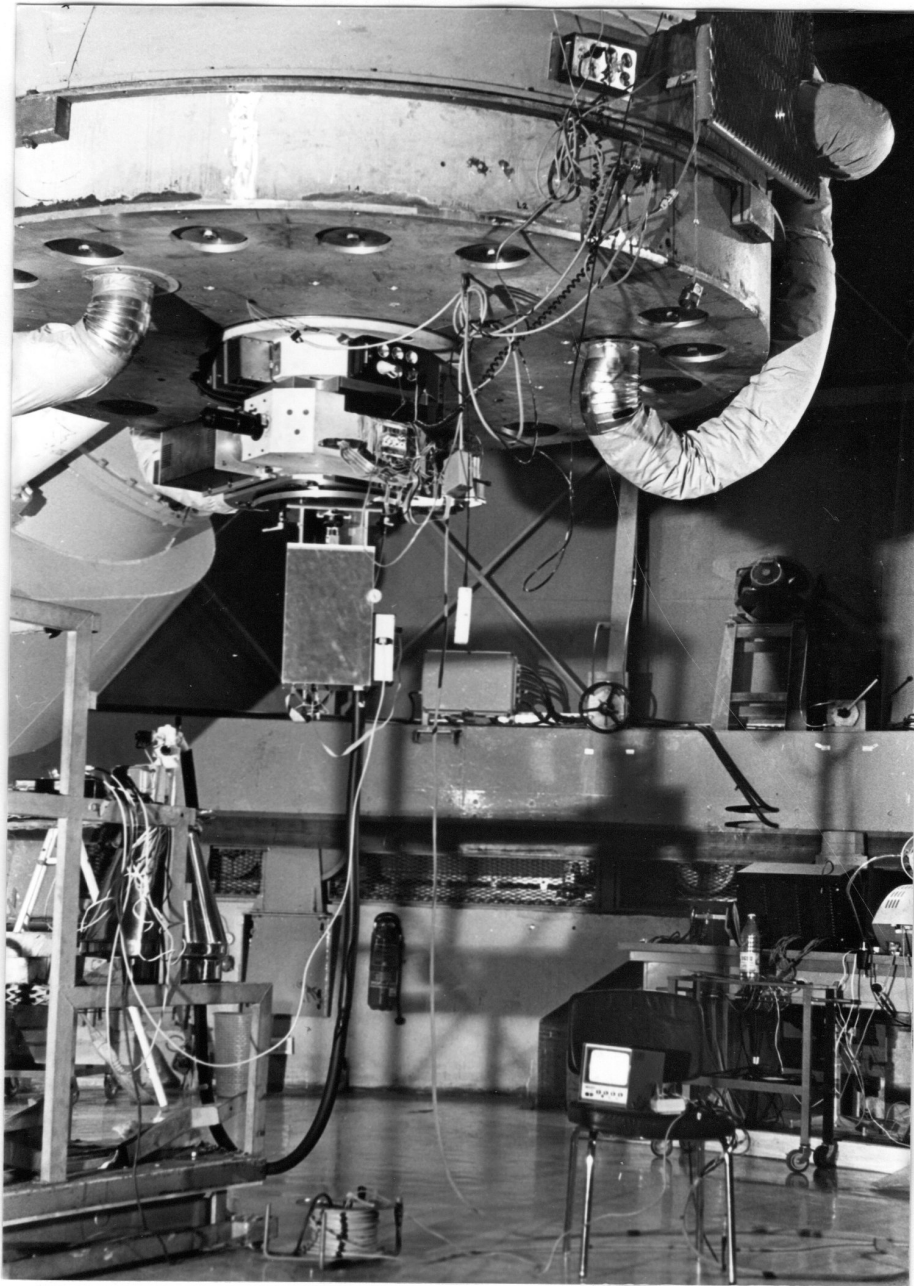


Photo n° 5b- La caméra et la visualisation des images sur un moniteur vidéo - A gauche, le système de refroidissement en fonctionnement

une image nette sur le moniteur vidéo, d'une mire simulant un objet situé à l'infini et observé par le télescope de 2 m.

On monta ensuite la caméra à l'arrière du barillet du télescope. Ces premiers essais de refroidissement du CCD ne pouvaient être testés* que dans la coupole elle-même pour être significatifs. En augmentant peu à peu la puissance de chauffage dans le bidon d'azote, par palliers, et après plusieurs essais, on obtint un refroidissement du CCD de + 10° à - 12° en 25 mn ; puis une stabilisation à - 12° en 10 mn. La température ambiante était de 8° et l'azote gazeux sortait du boîtier à 5° ; le hublot double que l'on avait monté sans sécher l'air d'isolation ne givrait pas. Par contre le tuyau d'arrivée de l'azote était rigidifié par le froid et imposera un montage fixe du réservoir d'azote sur le barillet du télescope.

La troisième étape consista à déterminer la longueur du câble minimale nécessaire pour relier la caméra à l'ordinateur situé à l'étage en dessous (Les liaisons électriques standards font 60 m, ce qui était beaucoup trop pour des signaux TTL à 4 MHz) on réussit à réduire la liaison à une longueur minimale de 17 m.

3°) Premier bilan de cette mission

- Le CCD est bien dans le plan focal du télescope
- Le système de refroidissement semble répondre à l'objectif que l'on s'était fixé : refroidissement vers 0° C (ou si possible moins) sans givrage du hublot.
- La longueur de la liaison avec l'ordinateur est proche de la longueur limite de 15 m que donnent les constructeurs de l'interface, ce qui n'était pas le cas en utilisant la liaison câblée existante.
- Enfin, un intérêt annexe, non des moindres est que j'ai réussi à lancer la fabrication de l'entretoise pour le réducteur de focale, à l'atelier du sommet, malgré un planning très chargé.
- Le prochain problème à résoudre pour le refroidissement est la fixation du bidon d'azote, à l'arrière du télescope (au cours de cette mission j'ai donc pris les côtes des trous de fixation sur le barillet).

* un résumé de cette étude fait l'objet de l'annexe B.

4°) Conclusion

Les objectifs de cette mission ont été tous atteints, ce qui est de très bon augure pour la prochaine mission du 18 au 24 Juillet. Lors de cette mission on fera, je l'espère, des essais sur la liaison avec l'ordinateur, et on enregistrera peut-être nos premières images astronomiques..., c'est-à-dire avec deux mois d'avance sur la première observation d'occultation cométaire programmées sur ce grand télescope. (Octobre 83).

V - PARTICIPATION PERSONNELLE A CE PROJET

Pendant ce stage, mon rôle était d'assurer la réalisation concrète du projet dans les meilleurs délais, au plus faible coût. Pour cela, j'ai dû être polyvalent et me charger des tâches suivantes :

1°) Définition précise de la caméra, pièce par pièce :

Lorsque je suis arrivé en Avril, ce projet était encore assez vague. Le cahier des charges n'a été élaboré sous sa forme actuelle que très récemment. C'était un prototype et il était très difficile de cerner tous les problèmes, car on ne possédait pas toutes les données (par exemple la documentation Thomson était insuffisante pour notre application).

Malgré tout cela, il fallait avancer de façon à pouvoir faire des mesures des caractéristiques du CCD en "mode cinéma" le plus rapidement possible. En effet, cette caméra perdra beaucoup de son intérêt lors de la mise en service du "Space telescope", il faudrait donc qu'elle soit au point très rapidement.

2°) Conception et dessin des pièces mécaniques :

J'ai dessiné près de 50 pièces au total. Le boîtier de la caméra et l'entretoise ont été sous-traités à l'extérieur, et j'ai obtenu que le réducteur de focale soit réalisé à l'atelier du Pic-du-Midi. A ce propos, je félicite Monsieur Benzaken qui a réussi à faire usiner rapidement quelques pièces à l'ENSAE, étant donné la performance que cela représente !

Tous les ateliers contactés : ateliers de l'Observatoire à Toulouse, à Bagnères ou au Pic-du-Midi, ainsi que l'atelier de l'ENSAE, étaient surchargés. En passant par la procédure normale, les pièces que j'avais dessinées en Mai et en Juin auraient été faites pour le mois de Septembre ou d'Octobre (!).

Pour la construction de prototypes, sujette à de nombreuses modifications en cours de route, il serait très utile de disposer d'un certain nombre d'heures d'atelier par semaine, de manière systématique. L'équipe CCD qui employait un ouvrier à mi-temps à Meudon pour l'usinage, envisage à moyen terme de revenir à cette solution ;

car la sous-traitance à l'extérieur est très onéreuse.

3°) Approvisionnement des pièces :

Une première étape consistait à définir les besoins et à réunir le maximum de documentation concernant ce matériel. Contrairement à ce que l'on pourrait croire il m'a été très difficile d'obtenir cette documentation de la part des fournisseurs. Pour les tarifs, c'était impossible la plupart du temps : je devais alors demander les prix par téléphone, article par article.

Ensuite, lorsque la commande était envoyée, il fallait suivre son bon déroulement et téléphoner régulièrement pour obtenir le respect des délais annoncés (ce fut notamment le cas lors des commandes importantes comme l'intensificateur ou bien l'usinage des pièces mécaniques).

4°) Présentation du projet au séminaire sur "Le Recentrage des images en Astronomie" au L.A.S. :

Ce séminaire s'est déroulé au Laboratoire d'Astronomie Spatiale de Marseille le 25 mai 1983. J'y représentais seul le laboratoire CCD et je remercie toute l'équipe pour cette marque de confiance. Mon intervention avait pour titre "Adaptation d'une caméra CCD aux techniques de recentrage d'images" et a duré 30 mn environ. Le programme du séminaire fait l'objet de la planche n°15. Un résumé de l'ensemble des communications sera publié ultérieurement.

5°) La Mission du 21 au 24 Juin au Pic-du-Midi :

J'ai dû préparer l'ensemble du matériel à emporter. Il ne fallait rien oublier car le sommet étant très isolé, la moindre omission pouvait entraîner l'échec de ces essais techniques.

Un résumé de cette mission fait l'objet du chapitre IV et les essais thermiques sont décrits en annexe B.

CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
 LABORATOIRE D'ASTRONOMIE SPATIALE
 TRAVERSE DU SIPHON - LES TROIS LUCS - 13012 MARSEILLE

IVE SEMINAIRE DE TRAITEMENT DES IMAGES

- INTERFEROMETRIE
- CENTRAGE DES IMAGES

MERCREDI 25 MAI 1983

F. Roddier (O.H.P.)	9h30 - 10h15	Théorie de l'agitation et étalement des images. Application aux problèmes de centrage.
J. Boufesteix (Obs. Marseille)	10h15 - 10h35	Gain en résolution par recentrage de trames.
A. Blanchard (Obs. Meudon L.A.M.)	10h35 - 10h55	Application du recentrage à l'observation de jets.
J.L. Prieur (Pic du Midi)	10h55 - 11h15	Adaptation d'une caméra CCD aux techniques de recentrage d'images.
J. Hecquet (Pic du Midi)	11h15 - 11h35	Reconstruction d'images par compositage de poses courtes après recentrement. Gain en résolution obtenu à 1 et 2 dimensions.
12h00 : <u>D E J E U N E R</u>		
C. Roddier (O.H.P.)	13h30 - 14h15	Traitement numérique des interférogrammes dans le plan de pupille.
A. Chelle (Obs. Lyon)	14h15 - 14h30	Reconstruction d'image dans l'infrarouge proche à partir de données speckel.
A. Mariotti (Obs. Lyon)	14h30 - 14h45	Problèmes liés à la variation de $R\theta$ dans l'interférométrie de tavelures en infra-rouge.
J. Beaumartin (Obs. Nancy)	14h45 - 15h00	Traitement numérique au radiohéliographe de Nancy
D. Cesarsky (Inst. Astroph.)	15h00 - 15h15	Application de la méthode CLEAN
J. Caplan (Obs. Marseille)	15h15 - 15h30	Perot-Fabry : Développement actuel et perspectives.
B. Ruffini (Obs. Marseille) M. Thonnat (L.A.S.)	15h30 - 15h55	Nouvelles méthodes de réduction interactive des interférogrammes de Pérot-Fabry.
J. Marcellin (Obs. Marseille)	15h55 - 16h20	Dépouillement semi-automatique des interférogrammes obtenus en Comptage de Photons- Application à la Galaxie NGC 2303.

VI - APPLICATIONS ASTRONOMIQUES DE CETTE CAMERA

1°) L'observation dans le domaine 800 - 1000 est encore peu développée (Cf. figure n°16) :

Ceci est dû au manque de "bons" détecteurs travaillant dans ce domaine.

- Les détecteurs "infra-rouge" dont la manipulation est délicate ont un rendement quantique équivalent beaucoup plus faible que les CCD, autour de 1 μm .
- Les plaques photographiques et les dispositifs à effet photoélectrique ont une sensibilité qui s'effondre rapidement vers 800 nm.
Au contraire les CCD à substrat épais (ce qui est le cas de notre CCD Thomson) ont un très bon rendement quantique dans le proche infra-rouge : jusqu'à 40 % autour de 800 - 900 nm.

Les CCD à substrat épais présentent donc une certaine originalité dont on peut tirer profit en astronomie. Le proche infra-rouge fait intervenir un certain nombre de raies moléculaires très importantes pour l'étude de la physique des planètes, des nébuleuses, et des étoiles à faible température de surface. (Malheureusement, la "nouvelle génération" des CCD fabriqués actuellement a un maximum de sensibilité dans le bleu, pour répondre aux besoins des caméras de télévision).

2°) Les CCD en mode cinéma ont une très grande dynamique qu'il faut exploiter :

La dynamique d'un détecteur est le rapport entre les intensités lumineuses maximale et minimale qui peuvent être détectées. Le niveau minimum est déterminé par le bruit du CCD, le niveau maximal par le seuil de saturation d'un puits de potentiel. Une valeur typique pour les CCD est 4000 soit 9 magnitudes. La technique de compositage permettant de détecter des signaux noyés dans le bruit pour chaque image élémentaire, augmente ainsi la dynamique résultante.

Avec 2000 images, on compte détecter un flux de $30 e^-$ par pose (de 0,25 s) et par pixel (Cf. Annexe C), soit 30 % du bruit de lecture que l'on a estimé. On multiplie donc la dynamique initiale de 4000 par un facteur 3, d'où une dynamique résultante de 12000 (10,2 magnitudes).

Le niveau N de charges détectables étant inversement proportionnel à la racine carrée du nombre d'images k, avec 4 disques enregistrés, on pourrait atteindre une dynamique deux fois plus grande (11 magnitudes).

Cependant, il faut être très prudent, car ces précisions reposent sur l'hypothèse que le bruit du CCD Thomson utilisé est voisin de $100 e^-$ rms (comme le CCD Fairchild 202).

Néanmoins, l'utilisation du compositage d'images obtenues avec un CCD augmente la dynamique initiale, ce qui est très utile pour l'observation d'objets faibles très proches d'un objet très brillant, lorsqu'on ne peut pas utiliser un coronographe (par exemple détection de compagnons faibles d'étoiles doubles, de satellites d'astéroïdes, etc.).

3°) Observations astrophysiques adaptées à cette caméra :

Un accroissement de la résolution spatiale d'un facteur 2 (i.e. dans le cas de bonnes images, une résolution $\rho_0 = 0,3''$) apporterait une quantité d'informations nouvelles très importante. De nombreuses modélisations en astrophysique sont mal définies, par manque de données observationnelles.

a) Observations planétaires :

- Il est très difficile à partir du sol d'obtenir des photographies qui montrent des structures sur la surface des planètes lointaines, des satellites de planètes plus proches, ou des astéroïdes. Les photos n° 8 montrent quelques uns des meilleurs clichés de Neptune, obtenus récemment avec un CCD.

La structure interne de Neptune est encore mal connue. Pour l'étude des surfaces planétaires, la caméra CCD Thomson aurait l'avantage d'enregistrer un très grand nombre de clichés, ce qui permettrait de sélectionner les meilleurs, puis de les composer. De plus, ce CCD est sensible dans le proche infra-rouge ce qui est très intéressant pour étudier Uranus ou Neptune dans la raie du méthane à 890 nm.

● Lors du passage d'un astéroïde devant une étoile, on note parfois des assombrissements secondaires de cette étoile alors que l'astéroïde s'éloigne de l'étoile. On pense que ce phénomène est dû à la présence de petits corps qui gravitent autour de l'astéroïde. Mais jusqu'à présent on n'est pas parvenu à les photographier. Cette caméra est bien adaptée à la photométrie des occultations (Cf. I-2e).

Pour mettre en évidence ces satellites en dehors d'une occultation on a besoin d'une grande dynamique (ces objets sont faibles par rapport à l'astéroïde) et d'une très bonne résolution (ces objets sont proches de l'astéroïde puisqu'ils sont liés par la gravitation, et que la masse des astéroïdes est assez faible).

b) Observations d'objets stellaires :

● Cette caméra paraît adaptée à la détection et à la photométrie de compagnons faibles d'étoiles doubles. Les mesures d'écarts angulaires et de positionnement sont faites visuellement avec de grands réfracteurs. Il serait intéressant d'automatiser ces mesures.

● Des clichés à haute résolution de centre d'amas globulaires sont très utiles pour mieux comprendre l'évolution interne de ces amas. C'est d'ailleurs au Pic-du-Midi que M. Aurière a obtenu de remarquables clichés d'amas globulaires ($\rho_0 = 0,5''$) avec un tube image au foyer du télescope de 2 mètres (nécessité de "figer" l'agitation atmosphérique).

Dans ce cas d'utilisation, on pourra employer le CCD intensifié.

c) Objets extra-galactiques :

- Une très bonne résolution est nécessaire pour mettre en évidence des structures au sein des noyaux de galaxies "actives". On observe parfois au centre des galaxies de brusques variations d'intensité lumineuse dont l'interprétation est difficile. C'est le cas du noyau de la galaxie NGC 2903 (photo n° 6). Certains observateurs* avaient montré que l'intensité lumineuse d'un des nodules de cette galaxie avait

* P. Laques et al., 1980. Brightening of a hot spot in NGC 2903. Nature, 13, N° 5787 p. 145.

augmenté de 1,3 magnitude entre Janvier 1978 et Février 1980. L'équipe CCD lors d'une mission au télescope de 3,60 m d'Hawaï, en Novembre 1980 a obtenu ce cliché n°6 (avec le CCD Fairchild). Des mesures photométriques ont montré que tous les nodules avaient la même intensité qu'en Janvier 1978.

L'obtention d'un cliché montrant des sous-structures de ces nodules permettrait peut-être une interprétation correcte de ce phénomène.

● La haute résolution spatiale serait aussi utile pour l'étude de jets associés à des galaxies, comme celui de la photographie n° 9 . La galaxie M87 est une galaxie elliptique géante située à 60 millions d'années-lumière. C'est une des galaxies les plus brillantes que l'on connaisse, qui émet des rayonnements radio et X. Elle possède un immense jet de matière dont l'origine est mal comprise. On pense que les rayonnements radio et optique émis par ce jet sont d'origine synchrotron (produit par des électrons très rapides prisonniers du champ magnétique).

● Un autre type d'observation intéressant est l'identification de "lentilles" gravitationnelles. Parfois on observe deux quasars (objets très brillants et extrêmement éloignés) qui ont les mêmes caractéristiques spectrales et qui sont très proches (6" dans le cas de Q 0957 + 056). En fait il s'agit de deux images d'un même quasar, causées par la courbure des rayons lumineux lors de leur passage à proximité d'un objet massif se trouvant dans la ligne de visée.

La première "lentille" gravitationnelle a été identifiée avec un CCD placé au foyer du télescope de 5 mètres du Mont-Palomar (USA). (Photos n° 10).

Un cliché de quasar double a été obtenu en Juin 83 avec le télescope de 2 m du Pic-du-Midi, et un CCD RCA : c'est la photographie n° 11 . (L'objet très brillant, à côté du quasar double est une étoile qui appartient à notre galaxie - alors que les quasars sont beaucoup plus éloignés -).

CONCLUSION

Pendant ces trois mois un travail important a été effectué. Le projet s'est structuré puis concrétisé. De nombreux sous-ensembles sont aujourd'hui terminés. Les interfaces mécaniques et optiques de la caméra avec le télescope de 2 m du Pic-du-Midi sont en cours d'achèvement. Un problème important à résoudre est l'interfaçage avec l'ordinateur PDP 1134. Pour des raisons de délais d'approvisionnement, il ne fonctionnera vraisemblablement que vers la fin du mois d'Août.

La mise en service de cette caméra prototype au Pic-du-Midi suscite l'intérêt de plusieurs équipes d'astronomes en France. L'équipe "Planètes" de l'Observatoire de Meudon par exemple, qui a investi financièrement dans ce projet veut utiliser cette caméra lors d'observations d'occultations d'étoiles par des comètes ou par des astéroïdes. D'autres équipes sont intéressées par le compositage d'images afin d'améliorer la résolution, et mettre en évidence des structures jusqu'alors inconnues.

En effet, actuellement en astronomie l'intérêt pour les observations à haute résolution est de plus en plus manifeste. Plusieurs colloques récents (Toulouse 1980 - Garching 1981) ont montré le gain considérable d'information qu'on peut attendre d'une amélioration même relativement faible de la résolution. D'après F. Roddier (conférence ESO-Garching 1981) ce gain varie comme la puissance 4 de la résolution.

On doit noter que c'est au Pic-du-Midi que l'on a obtenu les meilleurs clichés du monde de la granulation solaire avec une résolution de 0,25" (R. Muller 1978). Or, l'expérience montre que, pour un site donné, la meilleure résolution spatiale est obtenue avec des clichés pris la nuit. En effet, la turbulence créée par un échauffement des couches d'air pendant la journée dégrade la qualité des images. Certains observateurs (dont J.L. Leroy) affirment avoir vu la figure de diffraction en observant à l'oculaire du télescope de 2 m. Quand on sait que le premier anneau a un rayon égal à $1,22 \lambda/D \approx 0,06''$ alors que les meilleurs clichés obtenus dans le monde ont une résolution d'environ 0,5", on demeure perplexe.

Tout ceci nous confirme que l'on peut espérer obtenir de très bonnes images avec notre caméra avec compositage sur le site remarquable du Pic-du-Midi.

Pour l'observation de fins détails planétaires en lumière visible ou celle des étoiles doubles, l'oeil derrière un oculaire d'un télescope, jusqu'à présent, demeure le meilleur détecteur. Il met à profit la moindre accalmie de la turbulence atmosphérique, même pendant un instant très bref, pour saisir quelques détails supplémentaires que l'on mémorise et dont on attend ensuite la résurgence lors d'une seconde accalmie. Ainsi peu à peu grâce à un "filtrage" des informations délivrées par l'oeil, on parvient à bâtir une image avec de très fins détails malgré la turbulence et le caractère aléatoire de l'apparition de ces détails.

Ainsi, le fonctionnement de la "ciné-caméra" Thomson, lorsqu'on sélectionne les images avant de les composer, s'apparente à celui de notre oeil. Nous espérons donc que la résolution spatiale sera proche de celle que l'on obtient "l'oeil à l'oculaire" d'un grand télescope, mais avec l'avantage de pouvoir faire une photométrie très précise sur des objets beaucoup plus faibles que ceux que l'on peut apercevoir lorsqu'on regarde à travers un oculaire.

BIBLIOGRAPHIE

- Dessin industriel :

- . Aide-mémoire de l'élève dessinateur.M. Norbert
- . Méthode active de dessin technique.A. Ricordeau
- . Formulaire technique de mécanique générale.J. Muller

- Thermique :

- . Chaleur, thermodynamique.P. Fleury - Eyrolles -
- . Astrophysical quantities.C.W. Allen
- . American Institute of Physics Handbook.Mc Graw Hill

- Optique :

- . Calcul des combinaisons optiques.H. Chrétien
- . Principles of optics.Born & Wolf

- CCD :

- . Documentation Thomson.CSF THX 31135
- . CCD Technical note.GEC Issue 1 March 82
- . Analyseurs d'images à transfert de charges.Belan
- . Analyseurs d'images utilisant des D.T.C.. R. Bouttes

- Intensificateurs :

- . Tube intensificateur d'image à très haute résolution pour photographie aérienne - Revue annuelle LEP 1982.
- . Intensified CCD single photoelectron response.J. Lowrance - SPIE Vol. 172 (1979)
- . The status of the multi-anode microchannel arrays (MAMA).J. Timothy - SPIE Vol. 172 (1979)

- Applications Astronomiques :

- . Charge-coupled Devices in Astronomy . Kristian & Blouke
Scientific American Octobre 1982
 - . Photométrie bidimensionnelle des galaxies elliptiques. avec une caméra CCD.
L. Vigroux - Colloque national du Comité Français du Télescope Spatial -
Avril 1980
 - . Initiation à la théorie de l'observation en Astrophysique. H. Reboul - MASSON
 - . Detection & spectrometry of faint light - J. Meaburn Vol. 56 D.Reidel pu-
blishing company
 - . Traitement numérique des images en astrophysique. B. Fort - Séminaire d'Aussors
1982
 - . Astronomical observations with a Fairchild 202 CCD. B. Fort et al. SPIE 1981
- et "Etude et Réalisation de l'électronique d'une caméra astronomique à CCD
Thomson" par F. Avitabile et G. Bailleul (Rapport de fin d'études ENSEEIHT
1983).

ANNEXE A

INTRODUCTION AUX CCD

C'est grâce aux progrès considérables réalisés en technologie des semi-conducteurs pendant les dix dernières années que l'on a pu concevoir les circuits CCD. Ce sont des dispositifs imageurs entièrement intégrés avec de nombreuses qualités : bonne sensibilité, haute résolution, grande dynamique, faible bruit et linéarité.

1°) Les caméras à tube :

Avant les années 60, la méthode couramment utilisée pour la lecture des photodétecteurs était le faisceau électronique. Par exemple, pour les tubes de prise de vue en télévision (tels que l'orthicon et le vidicon), c'est un faisceau électronique à faible vitesse qui vient recharger une cible, agissant comme un commutateur rapide à faible bruit venant successivement "connecter" chacun des photo-éléments (pixels) soit à un collecteur, soit à la cathode d'un canon électronique. Ce procédé a l'inconvénient d'introduire un bruit de lecture trop important pour des faibles flux (environ 10 000 électrons r.m.s. par lecture x pixel⁻¹).

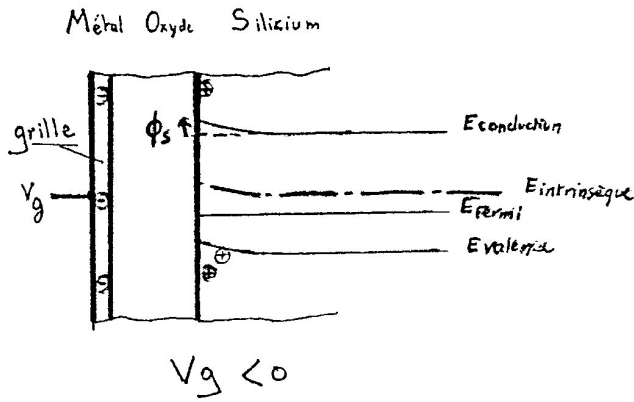
2°) Les CCD : Principe de fonctionnement :

a) Stockage des charges :

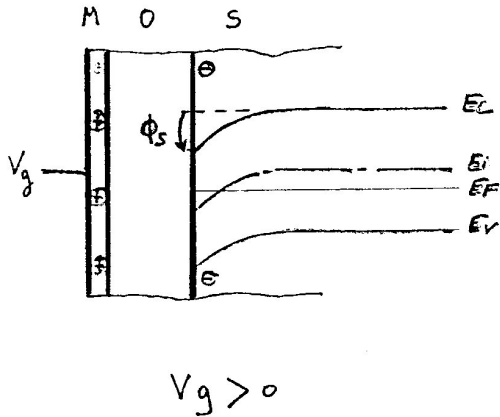
Le circuit CCD est constitué par une matrice de petites capacités (environ 30µm x 30µm) MOS (Métal, oxyde, silicium). Chaque capacité peut stocker jusqu'à 400 000 photocharges (photoélectrons pour les CCD Thomson) sans saturer.

Examinons le principe de ce stockage des électrons (fig n°17). Dans le cas d'un substrat P, les porteurs majoritaires sont les trous (ou défauts d'électrons). Si on applique une tension Vg positive, cette polarisation repousse les trous dans le substrat, ce qui crée une zone de déplétion. Par contre les électrons sont attirés par l'interface Si-SiO₂ et donnent naissance à une couche d'inversion (car alors, le type de conduction est opposé à celui du substrat).

Pour les électrons, il existe donc, un potentiel minimum ou "puits de potentiel" dont la profondeur peut être augmentée en faisant croître Vg.



Accumulation



Inversion

Figure 17

Si l'épaisseur d'oxyde augmente, ϕ_s diminue.

b) Création des charges :

Un photon ayant une énergie $h\nu$ supérieure à la largeur de la bande interdite du silicium peut communiquer cette énergie à un électron d'un atome du substrat qui passe ainsi dans la bande de conduction. Il y a ainsi création d'une paire électron-trou. Si cette paire est dans la zone de déplétion, l'électron va s'accumuler dans le puits de potentiel. Pour interagir avec le substrat, un photon doit donc avoir une longueur d'onde inférieure à λ_{seuil} mais il faut aussi qu'il puisse parvenir dans la zone de déplétion, ce qui est lié à la transparence des matériaux traversés.

Dans le cas du CCD Thomson, les capacités MOS sont éclairées par l'avant à travers une grille "transparente", cette technologie donne un maximum du rendement quantique dans le rouge, et le proche infra-rouge.

Dans le cas du CCD RCA utilisé par les caméras fabriquées par le CEA, le substrat est aminci, le CCD est éclairé par "l'arrière". Les photons bleus créent des charges qui peuvent être immédiatement collectées par la zone de déplétion. Par contre les photons du rouge lointain arrivent à traverser la puce en raison

de la transparence du Silicium à ces longueurs d'onde pour de si faibles épaisseurs. Ce CCD a un rendement quantique élevé dans le bleu. A cause des faibles épaisseurs du circuit (de l'ordre de quelques μm) il se produit des phénomènes d'interférence du type coin d'air pour le rouge lointain, ce qui est très gênant en astronomie.

c) Transfert des charges :

C'est ce qui fait l'originalité des CCD (ou DTC en français : Dispositifs à Transfert de Charges).

On transfère les charges d'une jonction à une jonction voisine en modulant les tensions de grille appliquées à ces deux jonctions. Il faut que les zones de déplétion se chevauchent à un moment donné pour que le transfert puisse avoir lieu.

Le transfert pour le CCD Thomson, à deux phases, est illustré par la figure n°18. L'épaisseur de la couche d'oxyde est modulée dissymétriquement de façon à imposer un sens de transfert privilégié.

3°) Facteurs de limitation et bruits :

Le bruit dans les CCD limite de façon significative la dynamique et la sensibilité à faible éclairement des photosenseurs, ce qui est le cas pour nos applications en astronomie.

Il provient de diverses sources : il y a d'abord le bruit dû à l'excitation optique, puis le bruit de transfert et le bruit dû aux pièges d'interface, ensuite le bruit dû à l'étage de sortie.

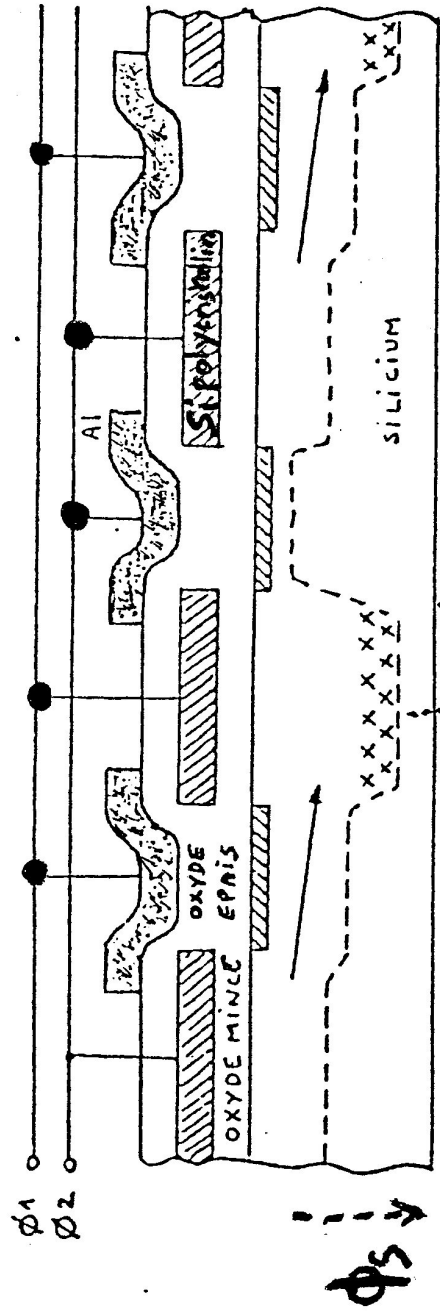
On ne parlera pas ici du bruit dû à l'étage de sortie car il est négligeable par rapport aux autres sources de bruit.

Les facteurs de limitations sont le transfert, les pièges d'interface et le courant d'obscurité. On peut les considérer comme des sources de bruit.

a) bruit dû à l'excitation optique :

C'est un bruit de grenaille causé par les photons incidents. On le modélise par une loi de Poisson :

$$\text{var}(B_1) = N$$



A (Cas où $\phi_2 < \phi_1$)

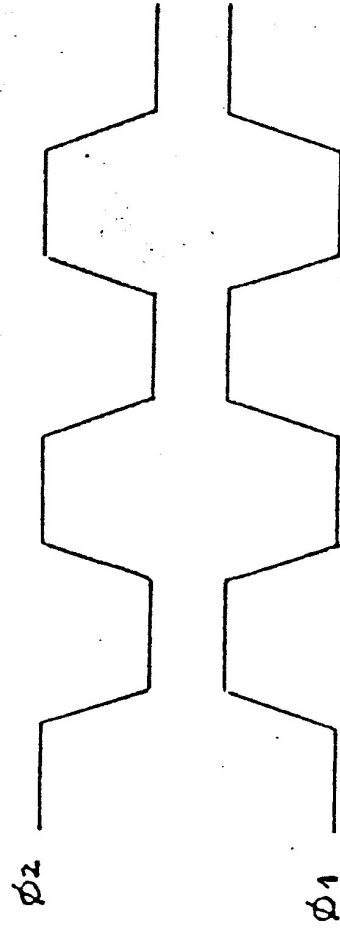


Figure 18 - Transfert C.C.D à 2 phases.

(N = moyenne du nombre de photons incidents).

b) efficacité du transfert :

Le transfert des charges n'est ni instantané, ni complet. L'efficacité de transfert est la proportion de charges transférées entre 2 jonctions :

$$P_1 = \eta * P_0$$

(P_1 = nombre d'électrons transférés, P_0 = nombre d'électrons à transférer).

Après N transferts, le nombre de charges est :

$$P_n = P_0 * \eta^n$$

η limite donc le transfert.

c) bruit de transfert :

Ce bruit est dû à la variation aléatoire du nombre de charges laissées en arrière à chaque transfert. Il est modélisé par une loi de Poisson fonction du coefficient d'efficacité de transfert η :

$$\text{var}(B2) = 2 * n * (1 - \eta) * N_0$$

(n = nombre de transferts, N_0 = nombre de charges initiales).

(Le facteur 2 vient du fait que chaque transfert est corrélé au transfert précédent et au transfert suivant).

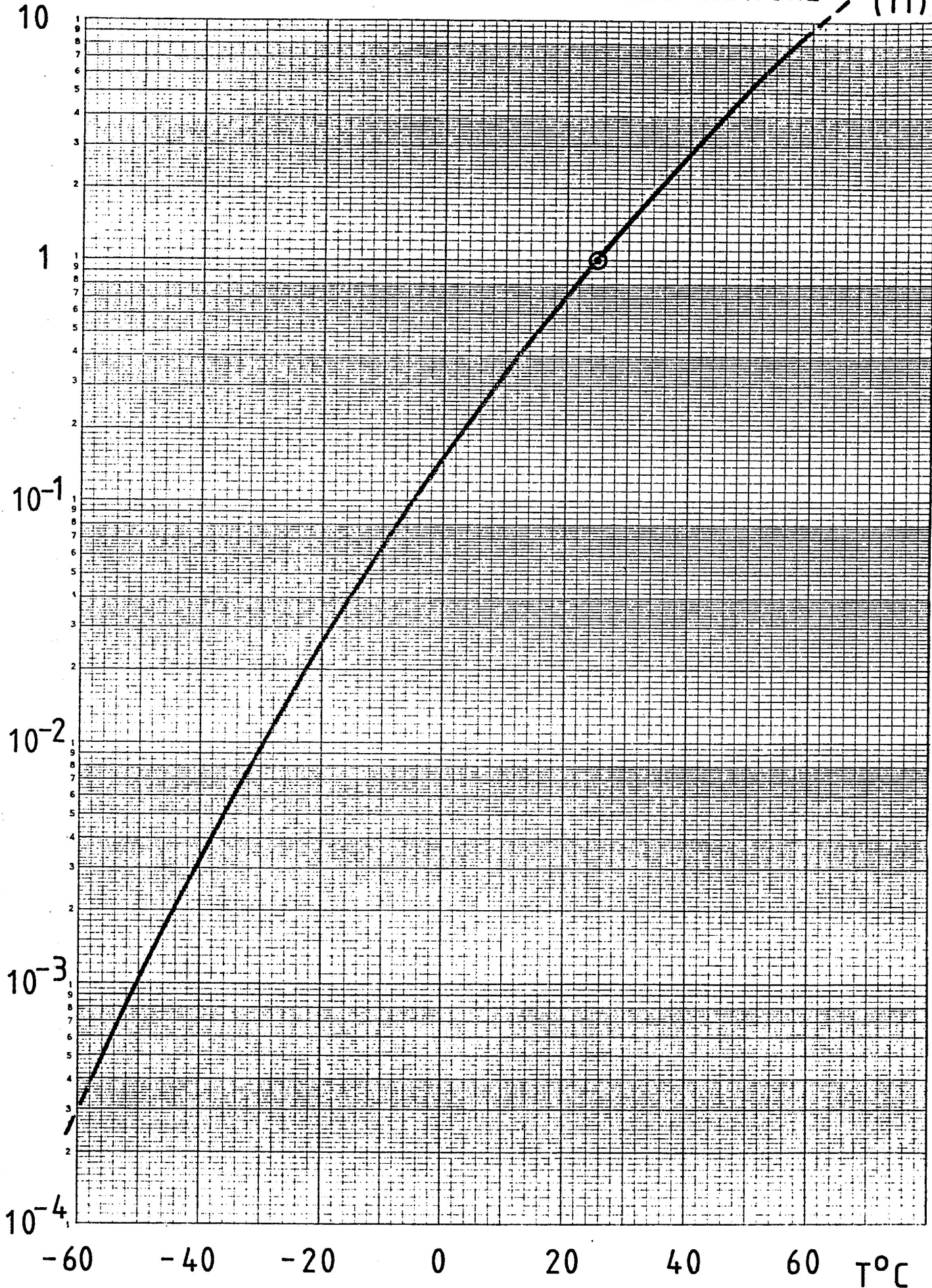
d) pièges à l'interface :

Ces pièges sont constitués d'atomes de la bande interdite du silicium, qui capturent des minoritaires et les relâchent au bout d'un certain temps.

Figure 18bis

NORMALISED DARK CURRENT vs TEMPERATURE

(11)



Seuls les pièges qui relâchent les minoritaires au bout d'un temps proche du temps de transfert peuvent perturber le système, car ils prennent des minoritaires dans un paquet de charges et les relâchent dans le paquet suivant.

Pour éviter cela deux solutions sont possibles : soit on sature en permanence les états d'interface en injectant un fond continu de charges ("fat zero"), soit on utilise la technique du "canal enterré".

- bruit dû aux pièges d'interface :

Il est modélisé par une loi de Poisson fonction du nombre de porteurs capturés et de la surface de l'électrode.

e) CCD à canal enterré (ou à transfert en volume) :

On introduit entre l'oxyde et le substrat une zone dopée de type opposé à celui du substrat. Cela crée une barrière de potentiel qui oblige les porteurs à évoluer loin de l'interface (les pièges en surface n'ont donc plus d'influence et les pièges en volume n'interviennent quasiment pas).

De plus la mobilité en volume est plus grande qu'en surface (η est plus grand aux fréquences élevées). Cette technologie, même si elle présente des difficultés, est très utile dès que l'on travaille avec une fréquence de transfert élevée, ou avec un grand nombre de transferts, ce qui est le cas du CCD en mode cinéma (le CCD Thomson est à canal enterré).

f) courant d'obscurité :

Le courant d'obscurité (courant apparaissant lorsque le CCD ne reçoit pas de lumière) engendre deux sortes de limitations :

- il introduit d'abord une contrainte sur le temps de transfert : celui-ci doit être très inférieur au temps de remplissage d'un puits de potentiel par le seul courant d'obscurité.
- il n'est pas uniforme spatialement et donc il y a apparition d'un bruit qui limite la dynamique.

Il est à noter que le courant d'obscurité varie très vite avec la température (il varie en $\exp(-a/T)$). D'où la nécessité de refroidir le CCD pour s'en affranchir (cf. figure n° 18^{bis})

ANNEXE B

PREMIERS ESSAIS THERMIQUES

1°) But des essais :

Ces essais se sont déroulés le 22 juin 1983 dans la coupole du télescope de 2 m du Pic-du-Midi.

Après une série de tests visant à s'assurer du bon fonctionnement de l'ensemble du matériel jusqu'à un refroidissement de l'ordre de -15° pour le CCD, on a simulé une mise en route de la procédure de refroidissement, avec deux étapes :

- 1 - débit maximal d'azote, électronique arrêtée
- 2 - électronique en marche, débit d'azote modéré

2°) Conditions de l'expérience :

Les conditions de l'expérience étaient les suivantes :

- mesure de la température du CCD avec une sonde au platine placée sur le radiateur de cuivre dans un trou \emptyset 2 mm avec de la graisse aux silicones et une liaison par câble de 15 m (5Ω).
- mesure de la température du boîtier par un thermomètre métallique fixé sur le boîtier.
- mesure de la température de sortie des gaz en plaçant un thermomètre à alcool à l'intérieur du trou (\emptyset 13 mm) de sortie de l'azote, sur la face arrière du boîtier.

J'avais placé une plaque de polystyrène pour séparer le boîtier en deux compartiments. La plaque avait une épaisseur de 10 mm et n'était pas bien ajustée. Les faces du boîtier en dural n'étaient pas isolées par du polystyrène. L'ensemble était fixé sur le barillet et le télescope pointait le zénith.

3°) Résultats expérimentaux : (fig 19)

Heure	t_1 °C	t_2 °C	R_0 Ω	t_0 °C	Observations
10 H 23	8°	8,5°	109 Ω	10°	Température ambiante : 8° CCD arrêté - Alim. à 36 V (120 W)
10 H 30	8	7,5	106	2,5	
10 H 34	7	6	103	-2,5	Début givrage au niveau de l'arrivée d'azote sur le boîtier - Tube mi-rigide. Début givrage de la gaine isolante.
10 H 36	6	5	101,0	-7,5	
10 H 38	6	4	99,0	-12,5	CCD en marche - Alim. de la résistance chauffante à 24 V (50 W)
10 H 45	6	4	99,5	-12,5	
10 H 50	6	4	100,3	-10	Tuyau rigide, pas de givre sur le hublot - Stabilisation à -10° C
11 H 30	6	5	101	-10	

t_1 : température du boîtier en dural

t_2 : température de sortie des gaz

et

R_0 : valeur de la résistance mesurée au niveau du pupitre

t_0 : température du CCD

4°) Conclusion :

Les résultats quantitatifs sont très satisfaisants et répondent au but fixé. Cependant, un problème important reste celui de la souplesse du tuyau. Je pense que, pour éviter ces difficultés, il serait bon de limiter le refroidissement aux environs de -3°C. Pour fixer cette valeur limite, il faudra placer une sonde de température au niveau de l'arrivée d'azote dans le boîtier, afin de pouvoir apprécier le seuil à partir duquel le tuyau devient cassant (-50° C d'après le fabricant).

ANNEXE C

ESTIMATION DE LA MAGNITUDE LIMITE

. Cette estimation est approximative, car on ne connaît pas encore les caractéristiques du CCD Thomson THX 31135, pour notre application. On prendra pour valeurs de base $NEC = 100 e^-$ r.m.s. et $\eta = 20 \%$ en s'inspirant des données obtenues avec le CCD Fairchild 202, testé par le laboratoire. On devrait aboutir à des conclusions un peu pessimistes, car le CCD Fairchild 202 est un CCD de première génération alors que le CCD Thomson est beaucoup plus récent, et a pu bénéficier de l'expérience acquise dans cette technologie.

. D'après l'étude du compositage qui fait l'objet du paragraphe I 4 c, le rapport S/B est tel que :

$$(S/B)^2 = \frac{k N_e}{1 + \frac{(NEC)^2}{N_e \eta}}$$

avec :

k : nombre d'images compositées

N_e : flux de photons incidents par pixel et par pose élémentaire

η : rendement quantique du CCD

NEC : bruit du détecteur CCD.

Dans le cas envisagé, on adopte les hypothèses suivantes : $k = 2000$, $NEC = 100 e^-$ r.m.s et $\eta = 0,2$. Avec un rapport $S/B = 6$, N_e est de l'ordre de quelques dizaines de charges. On peut alors négliger 1 devant $NEC^2 / N_e \eta$ d'où :

$$(S/B)^2 \approx \eta N_e^2 k / NEC^2$$

soit :
$$N_e^2 = \frac{NEC^2 \times (S/B)^2}{\eta \times k}$$

Pour obtenir $S/B = 6$, lorsqu'on composité 2000 images (capacité d'un disque RKO), il faut donc $N_e = 30$ photons. Exprimons ce flux en magnitude. (L'écart Δm en magnitude de deux étoiles d'éclat E_1 et E_2 est $\Delta m = 2,5 \log (E_1/E_2)$. Mais pour définir la magnitude d'un objet donné, il faut avoir une référence).

. On sait qu'un objet de magnitude visuelle 22,5 a un flux N_0 au sol de 6 photons par seconde et par mètre carré, avec un filtre V classique. Dans le cas du télescope de 2 m de diamètre équipé d'un réducteur de focale, on peut espérer que l'image d'un objet ponctuel soit intégrée sur un seul pixel (cas d'une belle nuit avec une largeur à mi-hauteur des images d'étoiles de 0,25" pendant 0,25 s).

En prenant pour rendement de l'optique $\eta_1 = 50 \%$ on aura donc un flux N_1 par pixel et par pose de 0,25 s :

$$N_1 = \eta_1 \times S \times N_0 \times 0,25 \quad \text{avec } S : \text{ surface de la pupille d'entrée.}$$

Dans notre cas, il vient : $N_1 = 0,5 \times 3,14 \times 6 \times 0,25$ soit $N_1 = 2,4$ photons.

Ainsi donc un objet de magnitude visuelle égale à 22,5 produirait un flux de 2,4 photons par pixel et par pose au niveau du CCD placé au foyer F/12,5 du télescope de 2 m du Pic-du-Midi.

. La différence de magnitude entre les flux N_1 et N_e est donc égale à :

$$\Delta m = 2,5 \log N_e/N_1 \quad \text{soit} \quad \Delta m = 2,7$$

Conclusion :

On peut donc s'attendre à pouvoir détecter des objets de magnitude 20 avec un rapport $S/B = 6$, lorsqu'on composera 2000 images obtenues au foyer F/12,5 du télescope de 2 m du Pic-du-Midi, si la résolution est de 0,25" pour 0,25 seconde de temps de pose.

- Avec une résolution de 0,5", la surface d'étalement de l'image est multipliée par 4. Dans les mêmes conditions d'observation on n'atteindrait alors que la magnitude 18,5.
- Dans le cas où la résolution vaudrait 0,5" et que l'état de l'atmosphère serait calme et permettrait des poses élémentaires de 1 seconde on se ramènerait à une magnitude limite égale à 20.

. L'intensificateur doit permettre un gain substantiel que je ne peux pas chiffrer actuellement car je n'ai aucun renseignement sur la valeur du bruit qu'il va apporter à la chaîne de détection.

ANNEXE D

DOCUMENTATION TECHNIQUE

Cette annexe présente quelques renseignements techniques relatifs à cette caméra :

- 1°) Tableau d'étalonnage des sondes thermiques
- 2°) Intensificateur de lumière
- 3°) Visualisation vidéo/oscilloscope
- 4°) Liaisons du télescope de 2 mètres du Pic-du-Midi
- 5°) Températures au Pic-du-Midi.

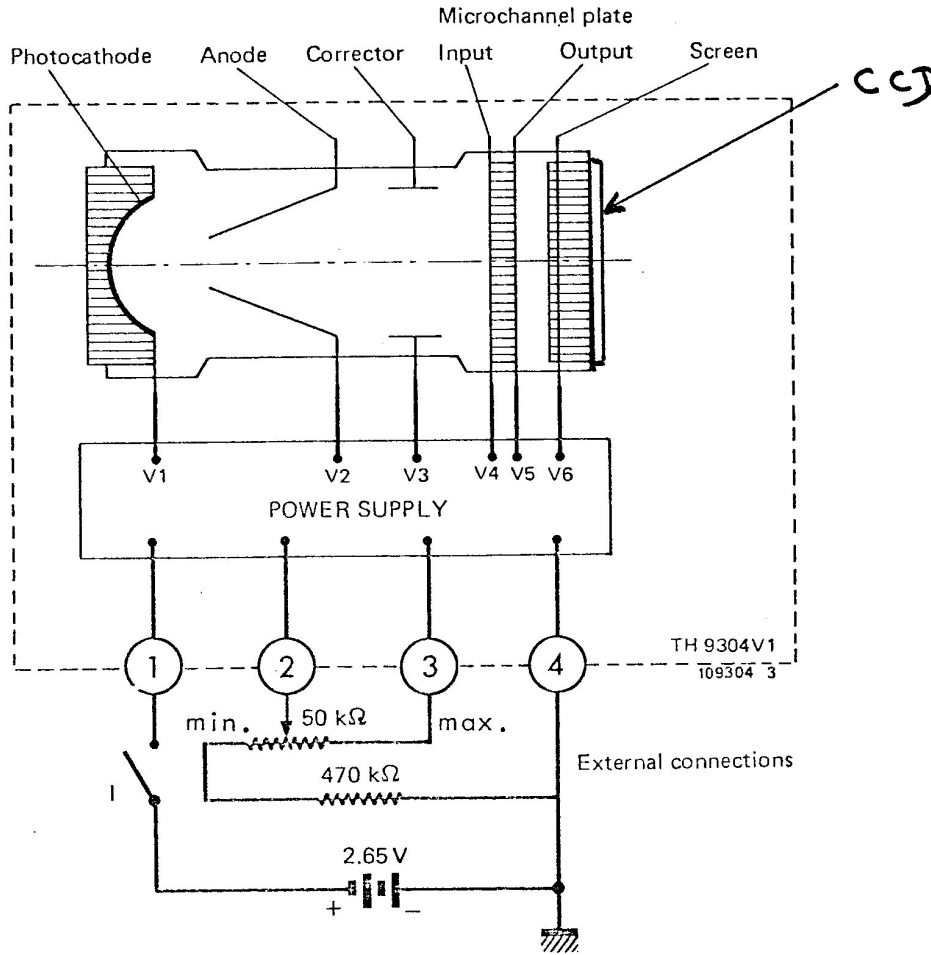


Figure 5 — Schematic view of TH 9304V1 and electrical diagram

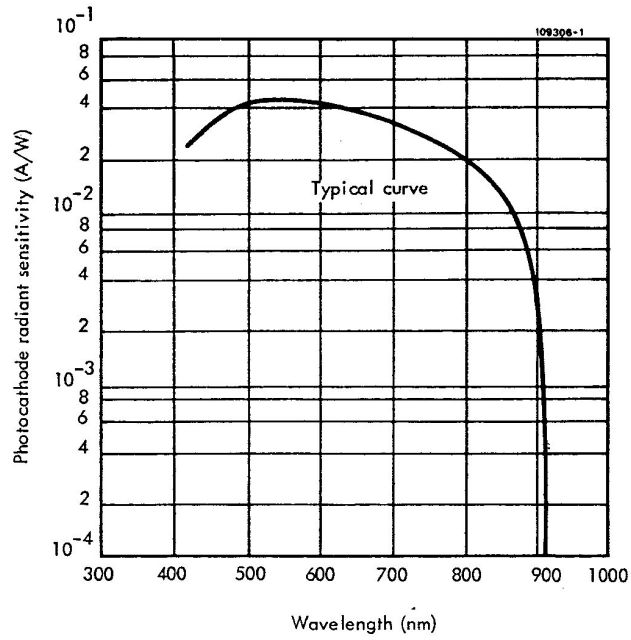


Figure 1 – S20ER photocathode radiant sensitivity (extended red sensitivity)

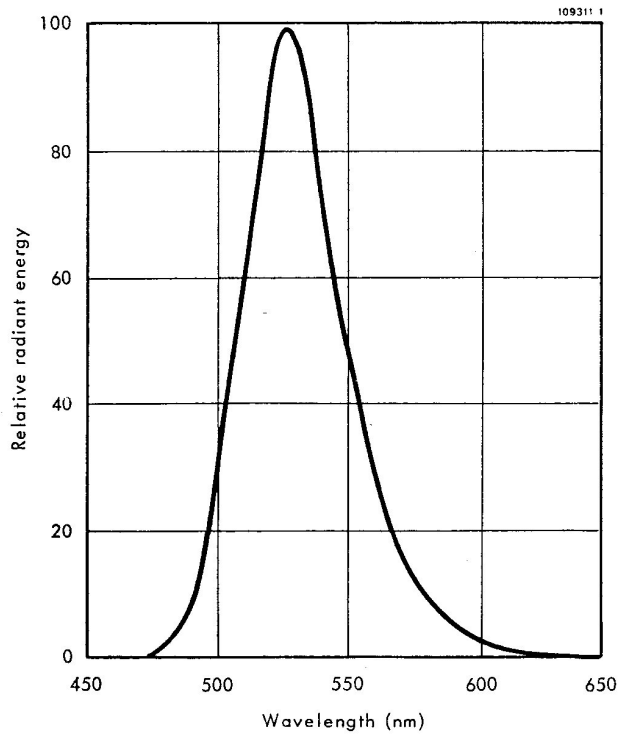


Figure 2 – Spectral-energy distribution characteristics of phosphor type E90