

N° 113

1983

ENSTA

**PROJET DE SYSTEME DE DETECTION
DE PHENOMENES AEROSPATIAUX
RARES**

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE DE TECHNIQUES AVANCEES

projet **N° 113**

Par : MM. T. CATHALA et P. FLAMENT

Responsables : MM. F. LOUANGE (ETCA) et K. HURLEY (CESR)

**PROJET DE SYSTEME DE DETECTION
DE PHENOMENES AEROSPATIAUX
RARES**

PROJET DE SYSTEME DE DETECTION
DES PHENOMENES AEROSPATIAUX RARES

STAGE REALISE A L'ETABLISSEMENT TECHNIQUE CENTRAL DE L'ARMEMENT
(ARCUEIL)

ET AU CENTRE D'ETUDE SPATIALE DES RAYONNEMENTS
(TOULOUSE)

PAR MM. CATHALA et FLAMENT, ELEVES ENSTA DE LA PROMOTION 83

PROFESSEURS DE STAGE :

M. LOUANGE (E.T.C.A.)

MM. HURLEY et ATTEIA (C.E.S.R.)

S O M M A I R E

I - INTRODUCTION	2
LA - Présentation du problème	2
LB - Organisation du stage	4
II - ETUDE DES SOUS-ENSEMBLES DE LA CHAINE D'ACQUISITION	5
II.A - Analyse et justification de la solution adoptée	5
II.B - Les phénomènes observés, le capteur	7
II.C - Les développements algorithmiques	22
III - CONCLUSION	37
III.A - Bilan	37
III.B - Perspectives	38
III.C - Les grandes lignes du calendrier proposé	39
REFERENCES	40

I - INTRODUCTION

I.A - Présentation du problème

I.A. 1 - Existence d'un besoin

Une division du CNES, le GEPAN, a pour mission de collecter et de traiter des informations sur les "phénomènes aérospatiaux rares" ; il s'agit de phénomènes aérospatiaux fugitifs, imprévisibles et généralement non reproductibles dont certains sont déjà connus et étudiés (foudre, météores).

Une étude réalisée pour le GEPAN en décembre 1982 : Etude sur la détection des phénomènes aérospatiaux rares (réf. 1), fait état de l'absence en France de moyens de surveillance systématique du ciel (à l'exception des radars), contrairement à d'autres pays (réseaux tchèque, canadien, américain).

Il existe pourtant un besoin potentiel pour des données de ce type :

- météores : Laboratoires de minéralogie et d'astronomie
- satellites : Défense Nationale
- contreparties optiques des sursauts gamma : C.E.S.R.
- foudre : organismes divers : E.D.F., C.N.E.T., O.N.E.R.A.
- tous phénomènes : CNES / GEPAN.

Suite à ce rapport le GEPAN a suscité la présente étude de faisabilité d'un système original de détection des phénomènes aérospatiaux.

I.A.2 - Resserrement du problème

L'étude mentionnée plus haut contient un travail de spécification technique de besoin et de définition préliminaire pour un dispositif de détection :

a) Les phénomènes observables

Un modèle simplifié représentatif d'un météore particulier ou d'un satellite est représenté par quelques paramètres dimensionnants,

obtenus à la suite de calculs simples :

- taille angulaire : source ponctuelle
- spectre d'émission : corps noir à 2854 K
- flux instantané : équivalent à un objet de magnitude + 1
- vitesse angulaire : 10 °/s.

Le dépouillement statistique d'une campagne de prises de vues menée par le CESR avec la caméra Téléphot (réf. VII) est venu corroborer ces ordres de grandeur pris pour référence.

b) Le capteur

Différentes classes de capteurs sont envisageable~a priori : acoustiques, électromagnétiques, radars, optiques. Un système de détection optique offre le plus d'avantages quant à la variété des phénomènes observés et la richesse des informations collectées.

Plusieurs solutions optiques sont techniquement réalisables : photographie, cinéma, vidéo. A l'heure actuelle, tous les réseaux existants utilisent l'enregistrement photographique, qui donne d'excellents résultats en termes de résolution spatiale, mais se révèle très limité en ce qui concerne les mesures radiométriques.

Toutes les autres solutions posent le problème de la gestion des données brutes. L'exploitation des quelques 150 heures d'enregistrement de la caméra Téléphot a permis de mesurer la difficulté et d'estimer avec précision le pourcentage d'enregistrement "utile" : un système d'archivage sélectif en aval du capteur s'avère indispensable. Remarquons que le

signal vidéo issu d'un capteur à photo-senseurs (CCD) se prête bien à la numérisation des images en ligne, pour traitement sur un système informatique spécialisé et stockage sélectif des séquences porteuses d'informations utiles.

La station de détection finalement envisagée se présente comme une chaîne de sous-ensembles implantés en série mettant en jeu des équipements optiques, opto-électroniques (du type CCD) et micro-informatiques.

I.B - Organisation du stage

Le stage s'est déroulé en trois phases :

I.B.1 - La période de Septembre

- Elle s'est passée à l'ETCA pour les deux stagiaires.
- Le capteur, l'un des deux points sensibles du système, a été l'objet d'une étude critique :
 - a) Faisabilité de la détection du phénomène de référence : il existe des chaînes opto-électroniques répondant au problème
 - b) Pertinence de la solution proposée : les capteurs CCD semblent devoir être retenus
- Suite à cette phase, le projet s'est orienté vers une séparation selon les deux grands axes (capteur et algorithmique), dans des laboratoires offrant les structures d'accueil nécessaires.

I.B.2 - L'étude du capteur

M. Cathala, au CESR (Centre d'Etude Spatiale des Rayonnements), " Toulouse

L'étude de Septembre a été approfondie (éventuellement corrigée), en s'appuyant sur la présence au CESR des compétences techniques requises :

- a) Caractérisation fine des phénomènes observés en amont de l'objectif
- b) Justification quantifiée du principe de stockage sélectif
- c) Caractérisation du signal obtenu en aval du capteur

I.B.3 - L'étude des algorithmes de traitement

M. Flament, à l'ETCA (Etablissement Technique Central de l'Armement), Arcueil

D'importants moyens de traitement d'image (système VICOM) ont été utilisés à cet effet :

a) Mise au point de l'outil de simulation

En l'absence de prises de vue issues d'une caméra CCD, des séquences d'images ont **été générées** et visualisées sur la console VICOM. L'introduction des paramètres s'est effectuée au vu des résultats de l'analyse menée au CESR.

b) Mise au point de l'outil de détection
.....

Un algorithme complet a été développé et testé sur les séquences d'images simulées. Il devrait être simplifié ultérieurement pour l'adaptation au temps réel.

II - ETUDE DES-SOUS-ENSEMBLES DE LA CHAÎNE D'ACQUISITION

II.A - Analyse et justification de la solution envisagée

II.A.1 - Les facteurs déterminants dans le choix du capteur

O Dans l'optique d'une intégration du capteur à un réseau de détection, des considérations géométriques simples imposent d'utiliser un objectif d'angle de champ égal à 160° (cf.réf. II).

O Rappel des caractéristiques du phénomène de référence

* magnitude visuelle 0 (corrigée plus tard en + 1).

* vitesse angulaire apparente $10^\circ/s$ (angle de champ : 160°).

On en déduit :

- l'éclairement de l'objectif :

(On ne tient pas compte dans les premiers calculs de la correction bolométrique, due à la température de l'objet).

$2,4 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2$ pour une étoile de magnitude 0.

- Le temps d'exposition : il est limité par la vitesse angulaire des phénomènes observés et par la résolution du capteur, plutôt que par la fréquence de prise de vue . Il est de l'ordre de 20 à 40 ms, pour le phénomène de référence, quand la fréquence de trame est choisie égale à 5 Hz (justification cf.réf. II).

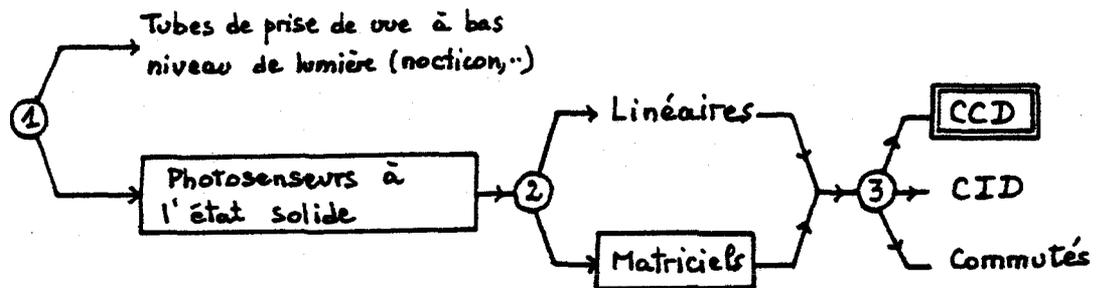
Un problème crucial sera la faiblesse du bilan énergétique

II.A.2 - La division en étages : les matériels disponibles

0 L'objectif de la caméra pourrait être un fish-eye classique .

0 Le capteur proprement dit :

C'est la partie du système qui transforme l'image en signal vidéo.
L'éventail des possibilités est ouvert ; le choix se résume en 3 points :



1er point : Pour être utilisable dans un **système** de traitement en temps réel, ce signal doit posséder toutes les **informations** de synchronisation (ceci, **au** niveau même du pixel), d'où le choix des **photo** senseurs à l'état solide.

2ème point : Un système à balayage par **barrettes** n'est pas adapté aux faibles niveaux de lumière.

3ème point : Les matrices CCD (en français DTC : Dispositif à Transfert de Charges) semblent **supérieures** à d'autres technologies (CID, **corn-**tés) tant sur le plan de la sensibilité que sur celui de la **résolution** spatiale.

0 **Les** Intensificateurs d'images Lumineuses (I.I.L.):

On est amené à envisager l'**éventualité** d'une intensification de lumière entre l'**objectif** et le capteur.

Les intensificateurs sont de 2 types :

tubes à focalisation de **proximité**

tubes à renversement d'image.

0 L'aspect micro-informatique n'a pas été abordé pendant la **durée** du **stage**. En effet, **une étude** du **matériel** serait prématurée avant la mise au point des algorithmes de traitement.

II.A.3 - Conclusion

o Suite aux premières estimations, il apparaît possible de détecter le phénomène de référence (les conditions sont sévères : les premiers calculs simplifiés sont exagérément pessimistes;.,'

o L'orientation du stage se dessine nettement :

- d'une part mise au point des algorithmes de traitement d'image
- d'autre part poursuite de l'étude du capteur (affinement du modèle de l'image obtenue).

II.8 - Les phénomènes observés, le capteur

II.B.1 - Caractérisation des phénomènes observés

a) L'environnement

a.1) Les étoiles

Ce sont des sources lumineuses ponctuelles, émettant selon le spectre d'un corps noir.

Les grandeurs déterminantes pour l'étude de notre système sont le flux d'énergie émis F et sa répartition spectrale: $\mathcal{E}(\lambda)$.

Elles sont caractérisées par :

* la température effective d'émission T

* la magnitude visuelle m_v

◇ L'émittance d'un corps noir par unité de longueur d'onde s'écrit (cf. réf. v):

$$\mathcal{E}(\lambda) = \frac{c_1 \lambda^{-5}}{e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1} \quad (\text{W/m})$$

Loi de Planck

avec $c_1 = 3,74185 \cdot 10^{-16} \text{ W.m}^4$

$c_2 = 1,4388 \cdot 10^{-2} \text{ K.m}$

λ en mètres

o Le flux d'énergie F est lié à la magnitude visuelle m_v d'une étoile par la relation :

$$F = S \cdot 10^{-\left(\frac{m_v + BC + 19}{2,5}\right)} \quad (\text{Watt})$$

où BC est la correction bolométrique de l'étoile. BC représente la correction qu'il faut apporter pour passer du flux lumineux (en lumen) au flux d'énergie (en Watt). S est la surface éclairée (en m^2).

$$BC = 42,54 - 10 \log T - \frac{29000}{T} \quad (T \text{ en Kelvin})$$

a.2) Le fond de ciel

Le ciel émet par angle solide $1^\circ \times 1^\circ$ l'équivalent de 380 étoiles de magnitude visuelle 10 et de température effective $T = 5520 \text{ K}$.

a.3) Autres objets

o La lune . Elle refléchit la lumière du soleil ; sa magnitude visuelle est : - 12,6

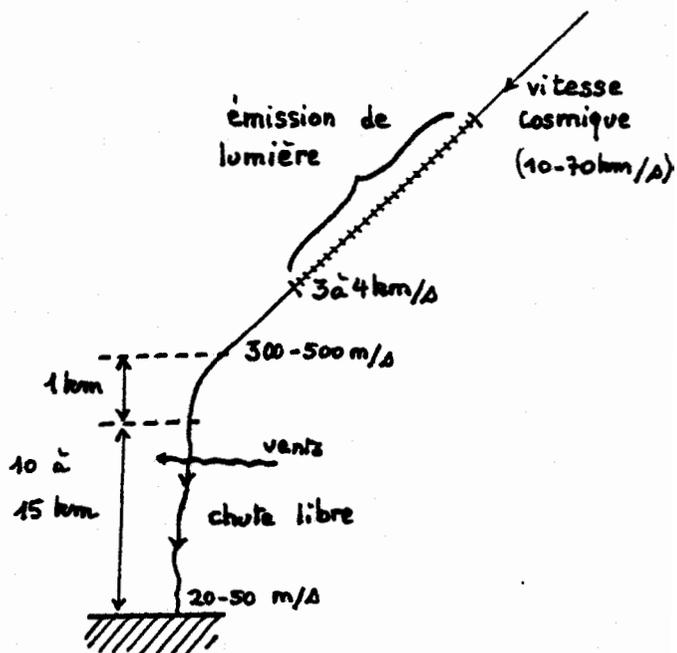
o La brume , Il faudrait tenir compte du degré hygrométrique de l'atmosphère. La brume agit comme diffuseur sur la lumière qui la traverse.

b) Les cibles

b.1) Les météores

Ces corps naturels d'importance très variable matérialisent leur passage à grande vitesse dans l'atmosphère par une traînée lumineuse. La trajectoire angulaire apparente couvre couramment plusieurs dizaines de degrés, tandis que la vitesse angulaire apparente peut aller de 0 (météore radial) à $60^\circ/\text{s}$.

fig. 1
Trajectoire d'arrivée
d'un météore type
(1 kg)



Compte-tenu de la diversité des cas, les calculs seront effectués sur un météore type ayant une vitesse angulaire apparente de 10°/s et émettant le maximum de flux lumineux à une altitude de 91 km. La magnitude visuelle est liée au flux d'énergie par la relation

$$m_v = 6.8 - 2,5 \log I \quad (I \text{ en Watt})$$

Le spectre de raies d'émission d'un météore moyen a été fourni par Z. Cepiecha qui est un météoriste tchèque de renommée mondiale. (cf réf. III)

b.2) Les satellites

Ils se présentent comme des sources ponctuelles. Le spectre lumineux qu'ils émettent est celui de la lumière solaire réfléchiée par les parties métalliques.

Un satellite à défilement en orbite basse (altitude entre 800 et 1000 km) a une vitesse angulaire apparente de l'ordre de 0.5 °/s au zénith. La nuit, la magnitude visuelle apparente d'un satellite à défilement standard est de l'ordre de 2 à 3. Certains satellites semblent clignoter, ceci en raison de leur rotation sur eux-mêmes (fréquence de l'ordre du Hertz).

II.B.2 - Justification quantifiée du principe de stockage sélectif

Les vidéo cassettes représentant les 92 premières heures d'enregistrement de la caméra TELEPHOT, ont été visualisées au CESR pour établir des statistiques sur la fraction de temps où se produisent des événements dans le ciel nocturne. 400 phénomènes lumineux ont été répertoriés et classés. Ils se répartissent comme suit :

phénomènes	nombres	pourcentage du temps total d'enregistrement	pourcentage de la durée totale d'observation des phénomènes
météores	242	0,09 %	3 %
avions et satellites	151	4,18 %	94,8 %
autres phénomènes ("flashes")	7	0,13 %	2,2 %
TOTAL	400	4,4 %	100 %

L'utilisation d'un système de stockage sélectif devrait donc permettre de réduire le volume des données dans un rapport égal à 20.

II.B.3 - Le capteur

a) Le photo-senseur CCD : Principes généraux

a.1) Principe de fonctionnement

Un CCD est composé d'une matrice de photo-éléments reliés à des registres à décalage analogiques vers un étage de sortie. Il existe 2 types d'organisation :

° Les matrices à transfert interligne (Fairchild) (fig 2)

Le flux lumineux tombe sur les photo-éléments et, pendant la phase d'intégration, y génère localement une charge proportionnelle à l'éclairement incident. Cette charge est ensuite transférée ligne par ligne, par des registres à décalage cadencés par des horloges, vers un amplificateur de sortie.

° Les matrices à transfert de trame (Thomson, RCA) (fig 3)

Le principe de **génération** des charges est le même, mais après la phase d'intégration, les charges sont transférées dans une mémoire tampon où s'effectue le processus de décalage des charges vers la sortie.

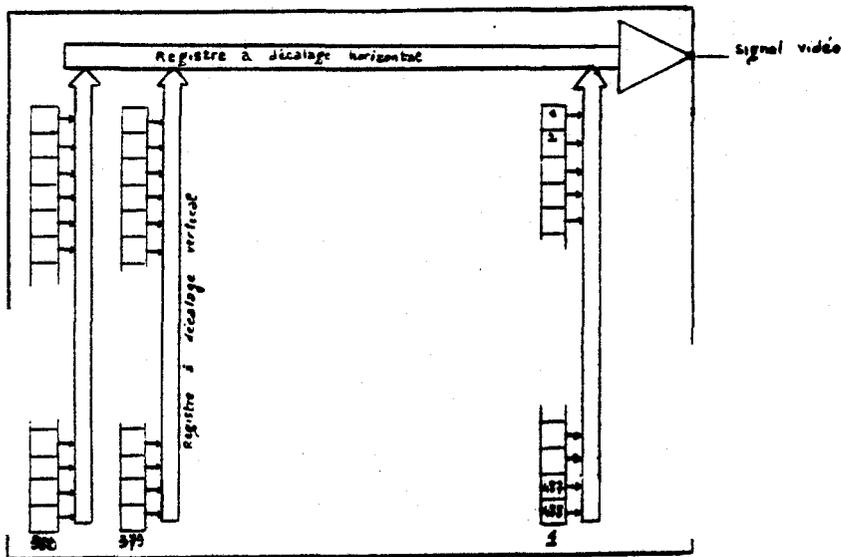


fig. 2 - Matrice à transfert interligne

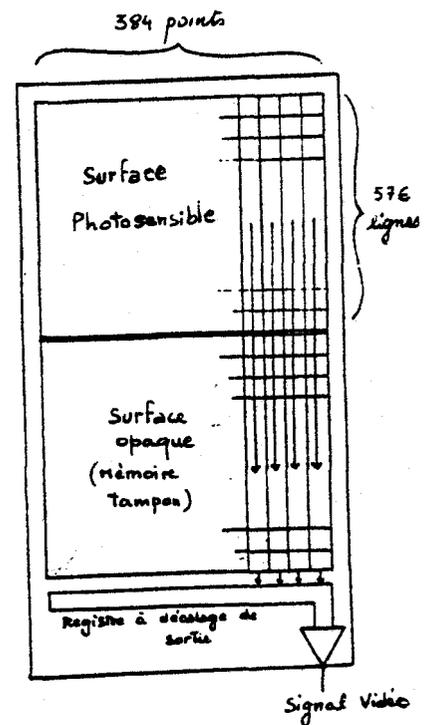


fig 3.- Matrice à transfert de trames

a.2) Réponse spectrale

C'est la courbe exprimant la sensibilité $R_{sp}(\lambda)$ (ou l'efficacité quantitative $\rho_{CCD}(\lambda)$) en fonction de la longueur d'onde λ . Le rendement quantique d'un photodétecteur est défini par :

$$\rho_{CCD}(\lambda) = \frac{\text{nombre d'électrons générés}}{\text{nombre de photons incidents}}$$

La figure 4 illustre 2 exemples de réponses spectrales:

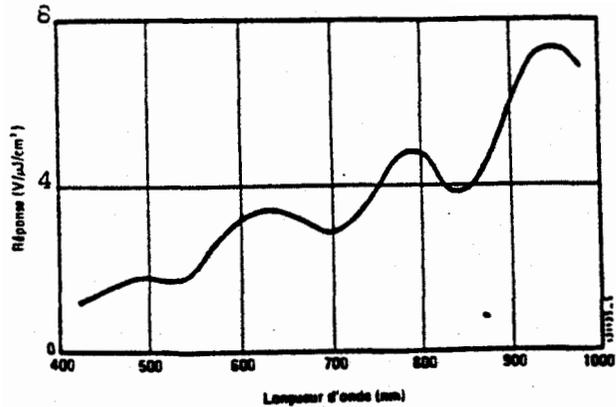
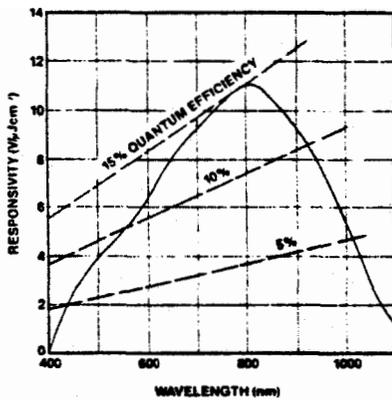


fig.4 - CCD 221

THX 31133

a.3) Bruits

La capacité de détection des faibles flux lumineux est fortement liée au niveau de bruit global du signal de sortie. Les différentes sources de bruit sont :

- o Le bruit poissonnien, lié à la nature quantique des photons. L'art-type N_p du nombre de charges représentant le signal est égal à la racine carrée de la valeur moyenne n_e du signal :
$$N_p = \sqrt{n_e}$$
- o Les bruits liés au stockage : ils ont pour origine la génération thermique de charges n_s . Ils se manifestent par la création d'un courant appelé courant d'obscurité, lorsque le flux lumineux incident est nul. Ce courant est proportionnel au temps d'intégration et augmente exponentiellement avec la température.

- ° Les bruits N_t liés aux transferts de charges : Lorsqu'un paquet de charges se déplace le long des registres à décalage, une fraction reste en arrière à chaque transfert.
- ° Les bruits N_v dus aux pièges en volume.

a.4) Saturation - Dynamique

La courbe de réponse d'un CCD se décompose en 3 parties :

- ① Une zone linéaire
- ② Une zone saturée
- ③ Une zone de bruit

$V_{sat} = 1V$ pour le CCD 221,
 $0,3V$ pour le THX 31133.

La dynamique est définie comme le rapport entre V_{sat} et V_{min} .

Une dynamique égale à 1000 peut être obtenue à température ambiante (5000 à $-50^\circ C$).

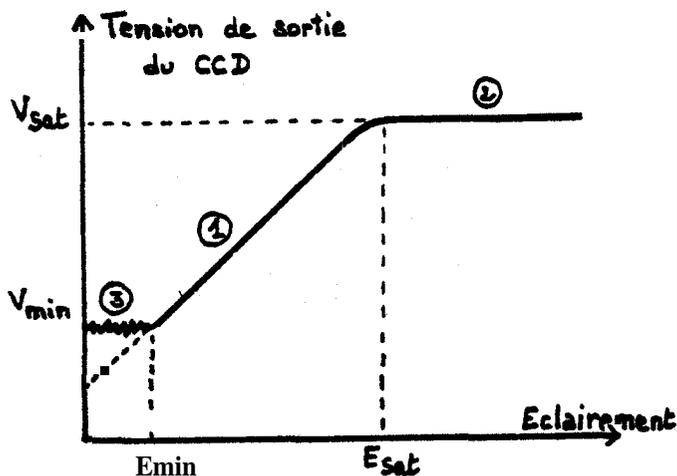


fig. 5

b.) Le photorécepteur CCD intégré dans une chaîne optique

Connaissant les caractéristiques de la chaîne optique et des phénomènes observés on calcule la réponse du CCD pour différentes sollicitations afin de déterminer les performances du système.

b.1) Cas d'une étoile

- ° Chaîne optique sans intensificateur d'images lumineuses (I.I.L.)

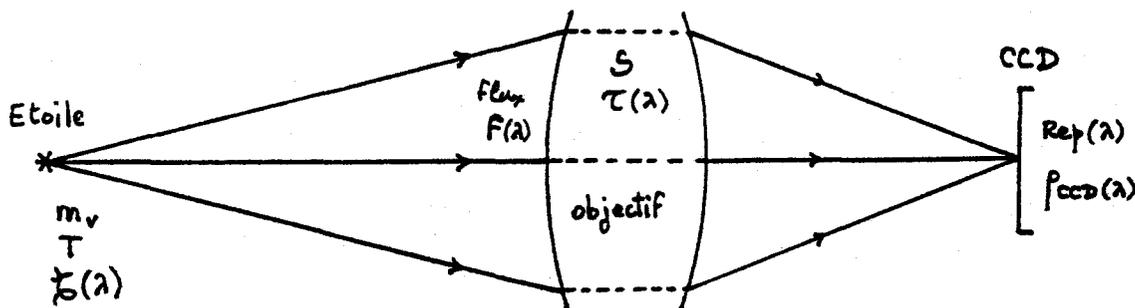


fig. 6

Pour déterminer la tension de sortie du CCD pointant une étoile, on calcule la répartition spectrale $f(\lambda)$ du flux lumineux traversant l'objectif :

- ° $f(\lambda)$ est proportionnel à $\mathcal{E}(\lambda)$ émis par l'étoile : $f(\lambda) = K \cdot \mathcal{E}(\lambda)$
- ° Calcul de K

Par définition, $f(\lambda)$ vérifie

$$\int_0^{\infty} f(\lambda) d\lambda = S \cdot 10^{-\left(\frac{m_v + BC + 19}{2,5}\right)} \quad \left(\begin{array}{l} \text{flux total reçu par l'objectif.} \\ \text{cf II.B.1.a.1} \end{array} \right)$$

$$\text{et donc } K \int_0^{\infty} \mathcal{E}(\lambda) d\lambda = S \cdot 10^{-\left(\frac{m_v + BC + 19}{2,5}\right)}$$

$$\text{Soit } K = \frac{S \cdot 10^{-\left(\frac{m_v + BC + 19}{2,5}\right)}}{\sigma T^4} \quad \text{puisque } \int_0^{\infty} \mathcal{E}(\lambda) d\lambda = \sigma T^4$$

$$\text{d'où } f(\lambda) = \frac{10^{-\left(\frac{m_v + BC + 19}{2,5}\right)}}{\sigma T^4} \frac{c_1 \lambda^{-5}}{e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1}$$

- ° Si t est le temps d'intégration du CCD et sachant que l'image d'une étoile est contenue sur un seul photo-élément de surface S_p , on en déduit la tension de sortie d'une matrice CCD éclairée par une étoile :

Tension de
sortie V_*
(pour une étoile:
 m_v, T)

$$V_* = \frac{St}{S_p} \frac{10^{-\left(\frac{m_v + BC + 19}{2,5}\right)}}{\sigma T^4} \int_0^{\infty} \frac{c_1 \lambda^{-5}}{e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1} \text{Rep}(\lambda) d\lambda$$

V_* a été calculé sur l'ordinateur CDC II du CNES pour la CCD 221 et la THX31133 en fonction de la **température** effective de l'étoile. Le temps d'intégration choisi est $t = 0,2$ s et la surface d'ouverture S est celle d'un objectif $f = 16$ mm ouvert à $f/2,8$: $S = 0,2565$ cm².

Soit V_0 la tension pour une étoile de magnitude 0.

Température	$V_0(\text{CCD221})$	$V_0(\text{THX31133})$
3000 K	350 mV	216 mV
5334 K	120 mV	62 mV
9486 K	82 mV	42 mV
16870 K	82 mV	42 mV
30000 K	105 mV	55 mV

Remarques :

- 1) Pour une étoile de magnitude m_v : $\gamma = V_0 \cdot 10^{-0,4 m_v}$
- 2) Compte tenu des tensions de saturation, le THX3113 est proche de la saturation pour des étoiles rouges ($T = 3000 \text{ K}$) de magnitude 0.
- 3) Pour $m_v = 5$, $V_{m_v=5} = \frac{V_0}{100} = 1 \text{ mV}$ (voisin du minimum détectable)
- 4) Une autre manière de caractériser les performances du système est de déterminer le nombre d'électrons n_* générés par le CCD.
(Le calcul se fait par un raisonnement analogue au précédent).

Nombre d'électrons n_* généré par une matrice CCD éclairée par une étoile de magnitude m_v et de température T :

$$n_* = St \frac{10^{-\left(\frac{m_v + BC + 19}{2,5}\right)}}{\sigma T^4} \int_0^{\infty} \frac{2\pi c \lambda^{-4}}{e^{\frac{hc}{\lambda T}} - 1} \rho_{\text{CCD}}(\lambda) d\lambda$$

avec $\rho_{\text{CCD}}(\lambda)$: efficacité quantique du CCD (cf II.B.3.a.2)

Le calcul de n_* pour le CCD221 montre que n_* et V_* sont proportionnels, le facteur de proportionnalité valant $\frac{n_*}{V_*} = 300\,000 \text{ e}^-/\text{v}$ (en accord avec la documentation Fairchild).

Conclusion
.....

La chaîne optique ainsi décrite doit permettre de détecter des étoiles de magnituds 5. L'éventualité d'une intensification de la luminosité peut être envisagée pour améliorer la sensibilité du système,

0 Chaîne optique avec I.I.L.

◦ Généralités sur les I.I.L.

Les I.I.L. étudiés sont des intensificateurs à galette de micro-canaux.

composants :
.....

* une photocathode placée dans le plan focal de l'objectif et chargée de transformer les photons incidents en électrons.

Soit $\rho_{pk}(\lambda)$ l'efficacité de cette conversion.

* une galette de micro-canaux, qui est l'organe amplificateur de l'I.I.L. Son gain G peut varier entre 1 et 1000 000,

* un phosphore, qui collecte les électrons amplifiés et réémet des photons envoyés sur la CCD à travers un cône de fibres optiques. Soit $\rho_{ph}(\lambda)$ le rendement photoémissif du phosphore.

◦ Le montage de la chaîne est le suivant :

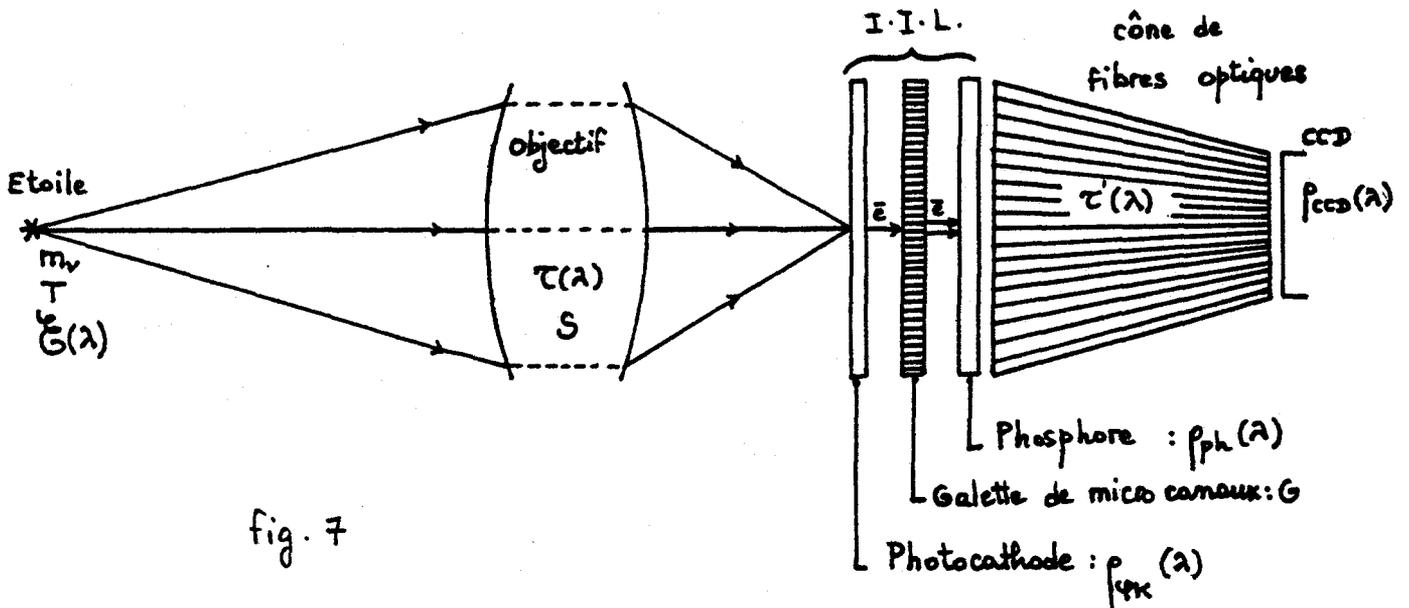


fig. 7

Un raisonnement calqué sur les 2 précédents donne le nombre d'électrons $n_{\varphi K*}$ générés par la photocathode, puis la répartition spectrale $\Psi(\lambda)$ du nombre de photons après le phosphore :

$$n_{\varphi K*} = St \frac{10^{-\left(\frac{m_v + BC + 19}{2,5}\right)}}{\sigma T^4} \int_0^{\infty} \frac{c_1 \lambda^{-5}}{e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1} \rho_{\varphi K}(\lambda) d\lambda$$

$$\Psi(\lambda) = \frac{\lambda \rho_{PR}(\lambda)}{\int_0^{\infty} \lambda \rho_{PR}(\lambda) d\lambda} G n_{\varphi K*}$$

◦ Nombre d'électrons n'_* généré par une matrice CCD précédée d'un I.I.L., éclairée par une étoile de magnitude m , et de température T :

$$n'_* = St \frac{10^{-\left(\frac{m_v + BC + 19}{2,5}\right)}}{\sigma T^4} G \frac{\int_0^{\infty} \lambda \rho_{CCD}(\lambda) \rho_{PR}(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} \lambda \rho_{CCD}(\lambda) d\lambda} \int_0^{\infty} \frac{2\pi c \lambda^{-4}}{e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1} \rho_{\varphi K}(\lambda) d\lambda$$

Remarques

- 1) Un calcul plus rigoureux devrait tenir compte des facteurs de transmission $\tau(\lambda)$ et $\tau'(\lambda)$ de l'objectif et des fibres optiques
- 2) Le calcul de n'_* a été effectué avec une photocathode S20R, un phosphore E90 (cf ref. III) et un gain $G = 1000$ pour la galette de micro-canaux. Du fait du rendement quantique faible de la photocathode, le gain effectif apporté par l'intensificateur est bien inférieur à 1000. Il varie suivant la température de l'étoile :

Température	3000 K	5334 K	9486 K	16 870 K	30 000 K
gain effectif	15,7	32,6	51,8	67,9	78,6
gain en magnitude	3,0	3,8	4,3	4,6	4,7

Conclusion
.....

L'addition d'un I.I.L. permettrait théoriquement de détecter des étoiles de magnitude 8.

b.2) Cas d'un météore

L'étude a été menée sur un météore "moyen" (cf II.B.1.b. 1).
Le spectre de ce météore n'est fourni que sur la bande panchromatique
[0,36 μm ; 0,66 μm] : le calcul de la réponse du CCD a donc été effectué
dans l'hypothèse d'un I.I.L. pour que les bandes passantes correspondent.

Le météore "moyen" parcourt 5 photoéléments par trames ;
donc le temps d'intégration effectif pour chaque pixel est de 40 ms

Conclusion :

On constate qu'un météore se comporte vis-à-vis du CCD comme une étoile de
magnitude $m_v + 2$.

c) Rapport signal/bruit

c.1) Cas d'un système sans I.I.L.

o On a répertorié au paragraphe II.B.3.a.3) tous les bruits présents en
sortie du CCD.

A ceux-ci, il convient d'ajouter le bruit poissonnien créé
par le fond du ciel. Ramené au niveau du CCD, un pixel reçoit l'équivalent
d'une étoile (T = 5520 K) de magnitude 5,5 et génère une charge constante
 $n_{fdc} \approx 210$ électrons qui s'ajoute au courant d'obscurité.

o Soit n_* le nombre d'électrons générés par la CCD pointant une étoile (m_v, T)
(cf. II.B.3.b.1). Le rapport signal bruit S/B pour un système sans IIL
s'écrit :

$$\frac{S}{B} = \frac{n_*}{\sqrt{n_* + 2n_{fdc} + N^2}}$$

avec $N^2 = n_d + N_t + N_v^2$
(cf. II. B. 3. a. 3)

Conclusion

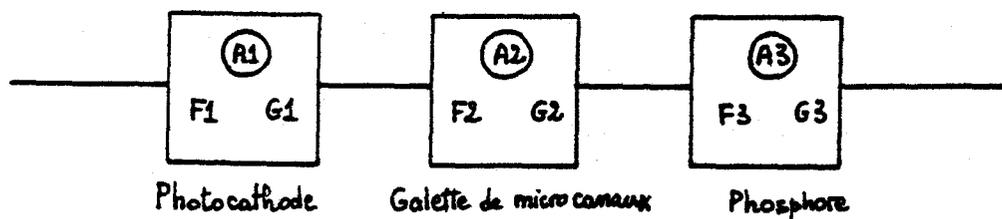
Le calcul a été effectuée pour $N^2 = 67\ 500$ (Température
ambiante) et pour deux étoiles de magnitude 1 et 6 en fonction de leurs
températures :

Température	3000 K	5334 K	9486 K	16 870 K	30 000 K
S/B ($m_V = 1$)	41,9 dB	33,6 dB	30,7 dB	30,8 dB	32,6 dB
S/B ($m_V = 6$)	4,0 dB	-5,5 dB	-8,8 dB	-8,7 dB	-6,7 dB

Remarque : En abaissant la température du capteur, on diminue la valeur du courant d'obscurité donc on augmente le rapport S/B (gain probable de 2 magnitudes).

11.B.3.c.2) Cas d'un système avec I.I.L.

Le raisonnement est ici différent; en effet la chaîne optique se compose de 3 étages amplificateurs:



F1, F2, F3 représentent les facteurs de bruit respectifs des 3 étages et G1, G2, G3 leurs gains. Par définition, le facteur de bruit de la chaîne

(A2) + (A3) s'écrit :

$$F = F_2 + \frac{F_3 - 1}{G_2}$$

$$= F_2 \text{ car } G_2 = 1000 \text{ et } F_3 \text{ voisin de } 1.$$

rapport signal sur bruit S'/B' dans le cas d'un système avec IIL :

$$\frac{S'}{B'} = \frac{1}{\sqrt{F}} \frac{m_{\varphi K}^*}{\sqrt{m_{\varphi K}^* + 2n_{\varphi K} f_{dc} + N_{th}}}$$

où N_{th} est le bruit de l'émission thermoélectronique de la photocathode. (Le nombre d'électrons étant pris après la photocathode) .

Pour $N_{th} = 10$ et $F = 3$, on a :

Température	3 000 K	5 334 K	9 486 K	16 870 K	30 000 K
S/B ($m_V = 1$)	32,5 dB	30,5 dB	30,9 dB	32,3 dB	34 dB
S/B ($m_V = 6$)	2,2 dB	-1 dB	-0,2 dB	2,2 dB	5,3 dB

II.B.4 - Conclusion

0 Les performances de la chaîne optique à I.I.L. peuvent sembler meilleures. Cependant la dynamique du système est fortement limitée par le niveau du bruit de fond et la saturation de la galette de micro-canaux. Un système optique sans I.I.L. sera donc préférable (sous réserve de validation par l'expérimentation des résultats théoriques).

Le tableau suivant donne les ordres de grandeur des magnitudes observables dans chaque cas :

	étoile fixe		météore de référence	
	saturation	limite détectable	saturation	limite détectable
sans I.I.L.	0	+ 5	- 2	+ 3
avec I.I.L.	+ 4 ou + 5	+ 8	+ 2 ou + 3	+ 6

0 grandeurs à prendre en compte dans une simulation :

- les étoiles

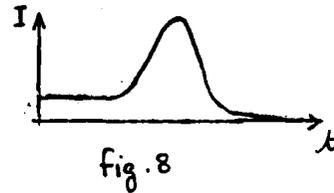
- les magnitudes varient entre - 1 et + 5
- défilement angulaire maximum : 0,004 °/s

- le fond du ciel

- niveau de gris (1 étoile de magnitude 5 par pixel)

- les météores

- vitesse : 10 °/s
- émission dans le temps :



- satellites

- vitesse : 0,5 °/s
- magnitude : 2 (et plus)
- éventuellement, fréquence de rotation : 1 Hz.

- les avions

- vitesse : 1 °/s

◇ exemple d'image obtenue à l'aide de la caméra Téléphot :



(Un météore est visible au centre de l'image).

II.C - Les développements algorithmiques (cf. réf. IV)

II.C.1 - Introduction

(description du système VICOM)

a) architecture

a1) Le système VICOM est la combinaison d'éléments micro informatiques classiques intégrés dans une architecture adaptée au traitement d'image et aux transferts de données.

Deux modes de travail sont utilisés :

- la programmation classique (en PASCAL)
- l'utilisation de commandes spécifiques.

Les aspects de l'architecture utilisés au cours du stage se schématisent de la façon suivante (cf. réf. VI) :

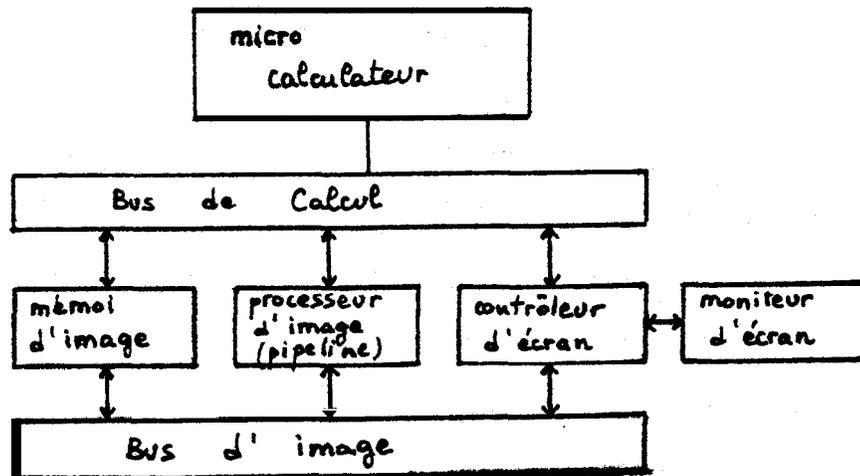
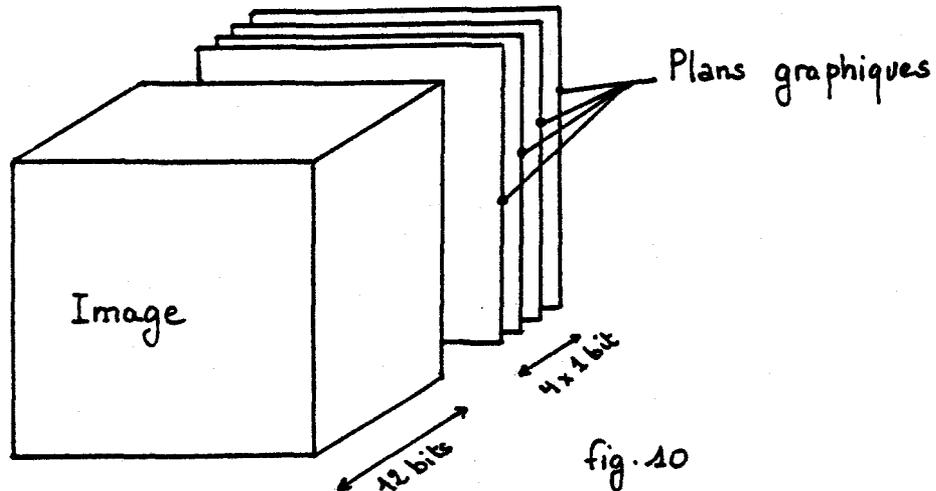


fig. 9

a2) mémoires d'image

- Les mémoires d'image totalisent quatre millions de points (pixels) implantés en mémoire vive. Cette mémoire a été utilisée sous deux configurations : 16 images 512 x 512 et 64 images 256 x 256. (configuration logique).
- Chaque pixel est codé sur 16 bits au maximum.

Dans la configuration physique généralement adoptée, 8 ou 12 bits sont utilisés pour coder l'image, les quatre bits de poids faibles restants représentent quatre plans graphiques associés à l'image.



a3) processeurs

- Un microcalculateur classique un Motorola 68 000, permet de traiter les images point par point.

- Un processeur sur tableaux spécialisé permet de réaliser des convolutions d'images par des matrices 3 x 3 en 30 millisecondes (opérations de filtrage et de voisinage en temps réel vidéo).

b) Les modes de manipulation des images

- La mémoire d'image est directement manipulable par programme sous forme de tableaux 512 x 512.

- Une centaine de commandes VICOM permettent de manipuler les images en mode interactif.

Ces commandes sont utilisables à l'intérieur de programmes, mais ne peuvent pas être paramétrées par les variables du programme.

- Des commandes de transfert d'images entre la mémoire vive et la mémoire sur disque permettent de conserver et de gérer les fichiers créés.

II.C.2 - La simulation

a) L'objectif:

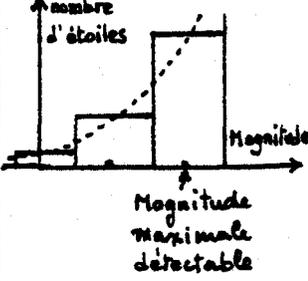
Il s'agit de générer des données de travail pour l'algorithme de détection : plusieurs dizaines d'images (de taille 512 x 512 ou 256 x 256) simulant les séquences que l'on obtiendrait avec une caméra C.C.D.

La séquence synthétisée doit être paramétrée, pour une adaptation souple à l'avancement des recherches sur le capteur.

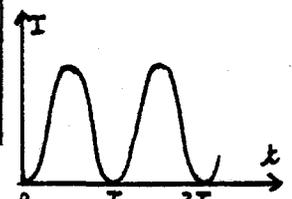
b) La modélisation:

Le tableau qui suit regroupe en classes d'objets les modèles simplifiés correspondants et les paramètres, ordonnés selon leurs "degrés de liberté" :

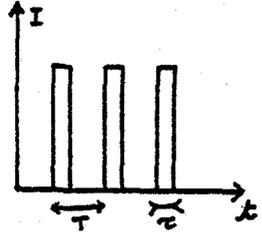
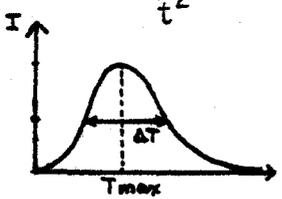
classes d'objets	modèles	paramètres et données		
		données définitives	génération aléatoire	introduction par l'utilisateur
paramètres généraux	. un "point" lumineux (étoile ou cible) est représentée dans l'espace par une tache gaussienne.	. écart-type (rayon) d'un "point" 0,7 pixel		. format d'image . nombre d'images . fréquence de trame . ouverture angulaire

classes d'objets	modèles	paramètres et données		
		données définitives	génération aléatoire	introduction par l'utilisateur
les étoiles	<ul style="list-style-type: none"> . modélisation en escalier : 	<ul style="list-style-type: none"> . nombre d'étoiles par magnitude entière 	<ul style="list-style-type: none"> . magnitude de chaque étoile (magnitude entière $\pm x$ ($x \in [-0,5; 0,5]$)) . répartition spatiale des étoiles 	<ul style="list-style-type: none"> . magnitude de saturation . magnitude maximale détectable
	<ul style="list-style-type: none"> . position et intensité de chaque étoile : variables aléatoires gaussiennes 		<ul style="list-style-type: none"> . fluctuation en position . fluctuation en intensité 	<ul style="list-style-type: none"> . fluctuation moyenne en position . fluctuation moyenne en intensité
	<ul style="list-style-type: none"> . rotation du champ d'étoiles modélisé par translation 	<ul style="list-style-type: none"> . vitesse de translation : 3,004 °/s 		
	<ul style="list-style-type: none"> . présence de la lune : non traitée 			<ul style="list-style-type: none"> . présence de la lune ou non
le bruit de fond	<ul style="list-style-type: none"> . gaussien . blanc . centré sur 0 . non corrélé spatialement . non corrélé temporellement 		<ul style="list-style-type: none"> . valeur calculée en chaque pixel 	<ul style="list-style-type: none"> . présence . puissance moyenne (variance)

classes d'objets	modèles	paramètres et données		
		données définitives	génération aléatoire	introduction par l'utilisateur
les nuages	. cas non traité			. présence ou non
la brume	. filtre passe-bas paramétré			. présence ou non . niveaux
les cibles	(pour chaque cible)			. nombre de cibles
	. la vitesse reste constante (module et direction)		. point d'apparition . vitesse angulaire (direction)	. moment d'apparition . moment de disparition . apparition au bord ou à l'intérieur du champ . vitesse angulaire (module) . magnitude maximale
	. quatre modèles de variations de l'intensité en fonction du temps :			. choix du modèle pour chaque cible
	* 1er modèle : intensité constante			
	* 2ème modèle : sinusoidal			. période T



(ex : satellite en rotation)

classes d'objets	modèles	paramètres et données		
		données définitives	génération aléatoire	introduction par l'utilisateur
les cibles (suite)	<p>* 3ème modèle : impulsions carrées</p>  <p>(ex : clignotants d'un avion)</p>			<ul style="list-style-type: none"> • période de répétition (T) • durée d'une impulsion (τ)
	<p>* 4ème modèle : loi en $\frac{1}{t^2}$</p>  <p>(ex : météore)</p>			<ul style="list-style-type: none"> • moment d'intensité maximale (Tmax) • largeur de l'impulsion à mi-hauteur (ΔT)

c) Ia réalisation:

c1) Ia gestion des paramètres généraux.

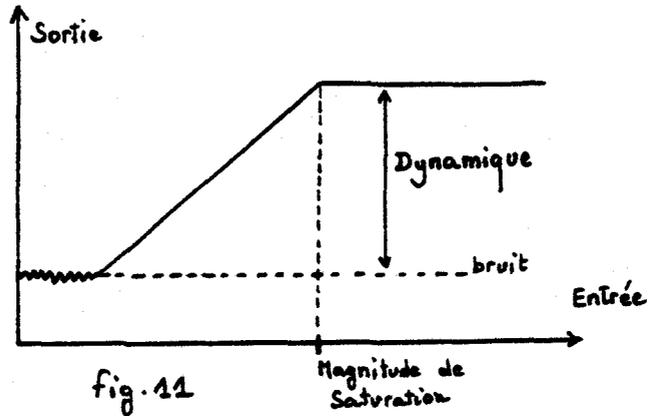
- L'ouverture angulaire intervient dans les calculs :
 - du nombre d'étoiles (en fonction du carré)
 - des vitesses et des déplacements apparents des phénomènes.

Elles est sans influence sur les magnitudes apparentes et les "diamètres apparents" des étoiles.

- La fréquence de trame intervient dans les vitesses et les déplacements apparents sur une trame.

Elle est introduite indépendamment de la magnitude de **saturation**.

- La magnitude de saturation et la variance du bruit limitent la dynamique du système :



c2) Pour chaque classe d'objet

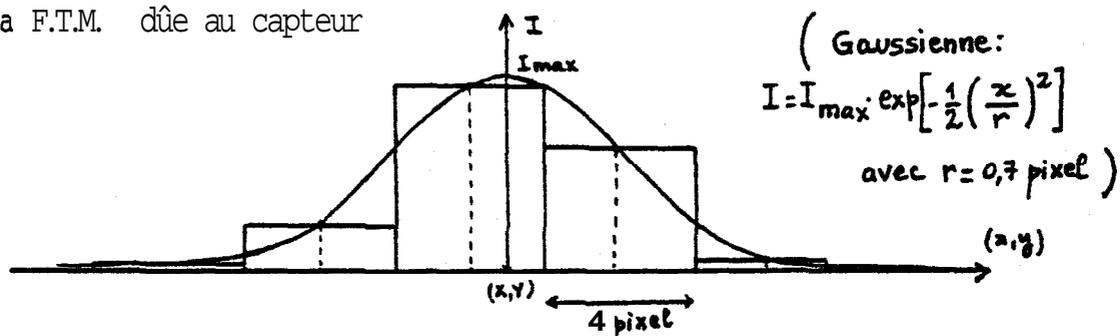
- Les étoiles :

0 leur nombre par magnitude :

magnitude	à l'oeil nu	sur plaque photo	modèle adopté
0	2	1	1
1	4	3	3
2	15	10	10
3	56	38	30
4	72	108	100
5	643	323	300
6	1618 (limite de visibilité)	1027	1000 (etc ...)

0 La magnitude limite devrait être fonction du niveau de bruit : la limite pratique tient au temps de calcul et à l'encombrement mémoire, et peut être inférieure ; l'ouverture angulaire et la magnitude de saturation sont éventuellement modifiées interactivement pour parvenir à un nombre d'étoiles acceptable.

◇ La coupe densitométrique d'une étoile : * courbe théorique : dégradation de la F.T.M. due au capteur

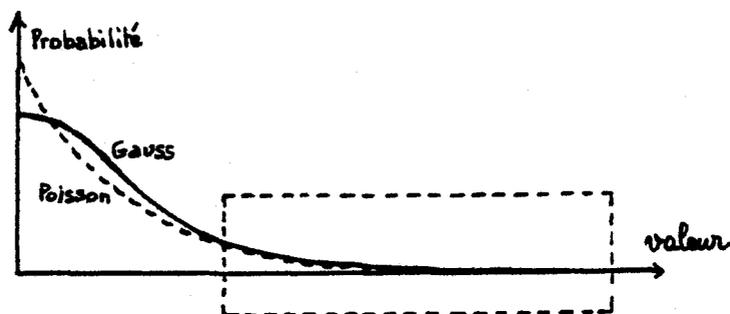


* calcul quantifié : l'intégrale de la courbe théorique sur chaque pixel est approchée : un échantillon par pixel ; la valeur de chaque pixel est éventuellement bornée par l'intensité saturante.

0 La fluctuation en intensité d'une étoile est supposée proportionnelle à son intensité (elle devrait être en toute rigueur proportionnelle à la racine carrée de l'intensité).

0 La fluctuation en position des étoiles permet de tenir compte des caractéristiques des intensificateurs d'image lumineuse et des perturbations induites par l'atmosphère.

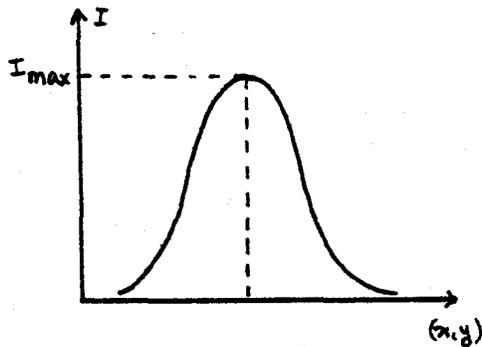
0 La loi théorique est une loi de Poisson (loi des grands nombres), qui se comporte comme la loi de Gauss du modèle adopté pour les valeurs de bruit élevées (prises en compte dans l'algorithme de détection).



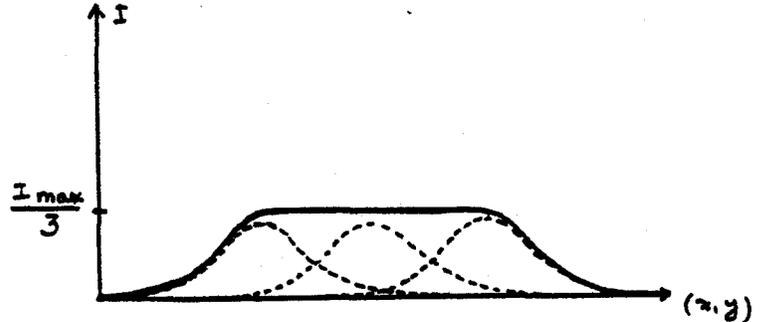
0 En pratique, le bruit est généré pixel par pixel sur un motif 64 x 64, qui est ensuite répété sur l'image.

- Les cibles

0 Le dessin de chaque cible est échantillonné en fonction de sa vitesse, de la fréquence de trame, de l'ouverture, etc.. ; l'intensité lumineuse pour chaque échantillon est divisée par le nombre d'échantillons :



(Etoile ou cible radiale)



(Cible mobile d'intensité constante avec 3 échantillons par trame)

0 Les fluctuations en position et en intensité s'appliquent à chaque échantillon comme à une étoile

c3) Conclusion

Une séquence type de 50 images a été générée, présentant les caractéristiques suivantes :

- . format : 512 x 512 pixels
- . ouverture angulaire : 160°
- . fréquence : 5 Hz
- . magnitude de saturation : + 1 ; magnitude limite : + 4
- . fluctuation des étoiles :
 - * en position : écart moyen : 0,05 % (0,15 pixel)
 - * en intensité : écart moyen : 2 %
- . bruit de fond : variance de 10^{-4} (équivalent à une étoile de magnitude 6 par pixel)
- . absence de brume , de lune , de nuages-
- . plusieurs cibles (modèles, magnitudes et vitesses variables).

11.C.3 - La détection

a) Les idées de base

- Les trames sont soustraites deux à deux, afin d'éliminer les étoiles.
- La différence est seuillée, pour s'affranchir du bruit de fond.

Cela reste insuffisant :

- Les étoiles laissent une trace importante après soustraction, du fait de leur double fluctuation angulaire et lumineuse : elles doivent être masquées.
- Le niveau lumineux des cibles peut être voisin du bruit : il leur faut appliquer un traitement particulier. La détection (la veille) se double d'une poursuite.

b) l'organigramme général

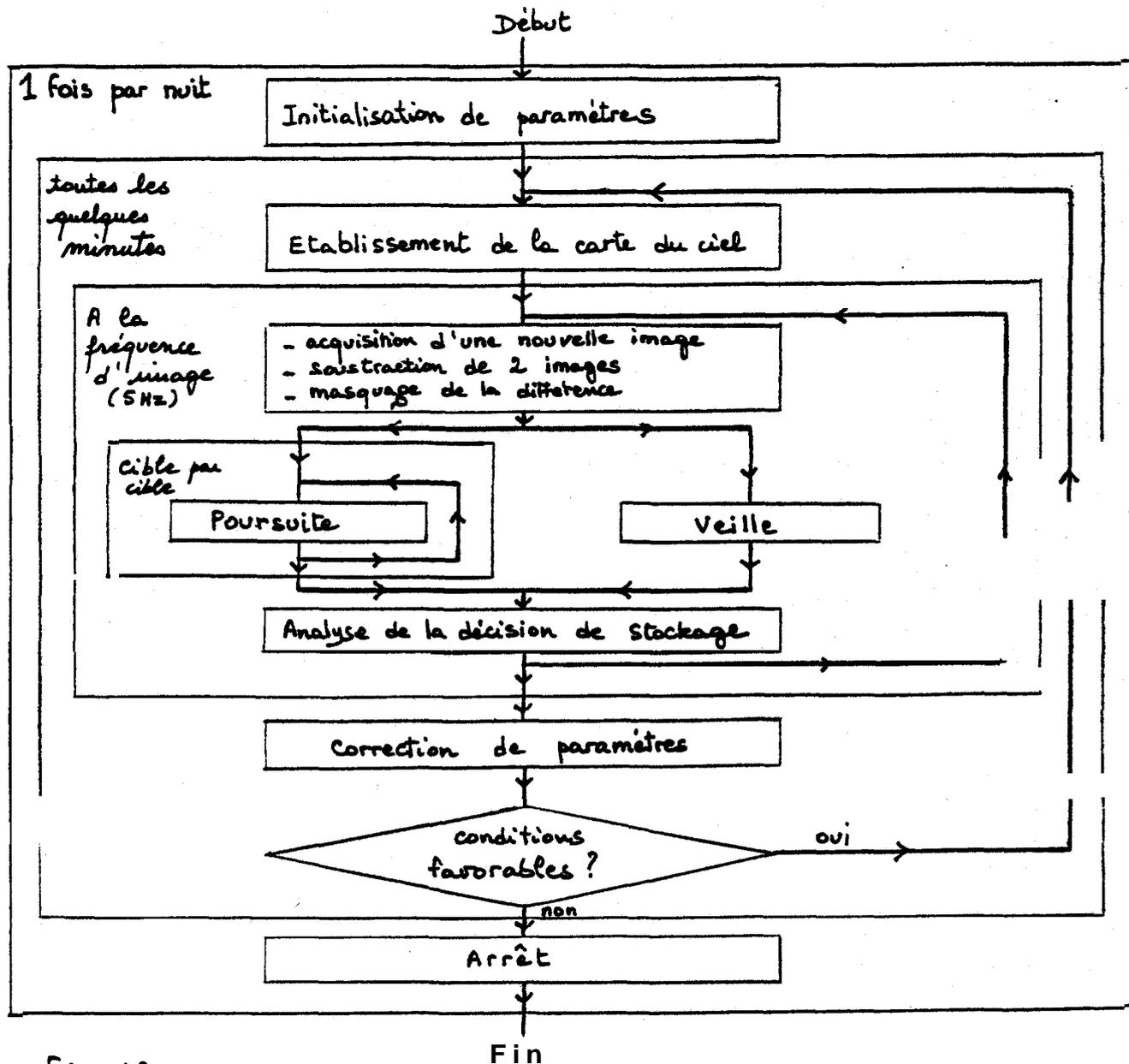


Fig. 12

c) La réalisation

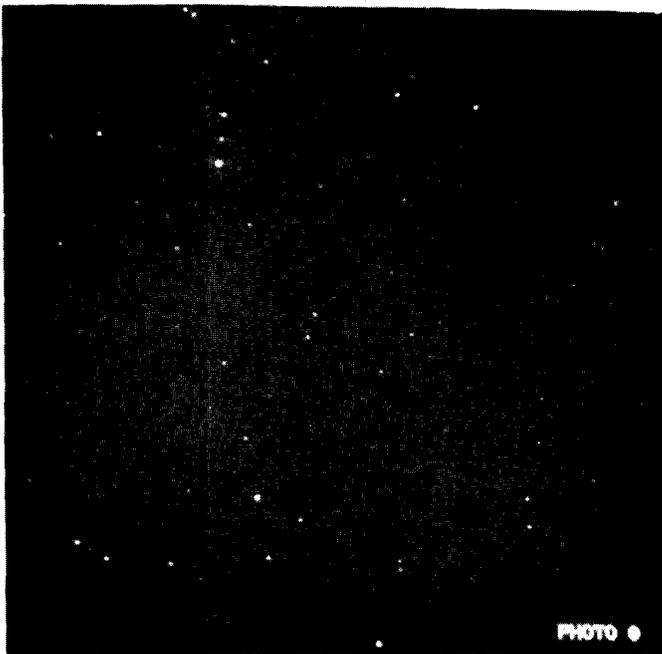
c1) La phase d'initialisation

Elle a lieu une fois pour toutes. Certains paramètres dépendent des caractéristiques de la séquence et sont déterminés à la suite d'une étude statistique portant sur quelques trames.

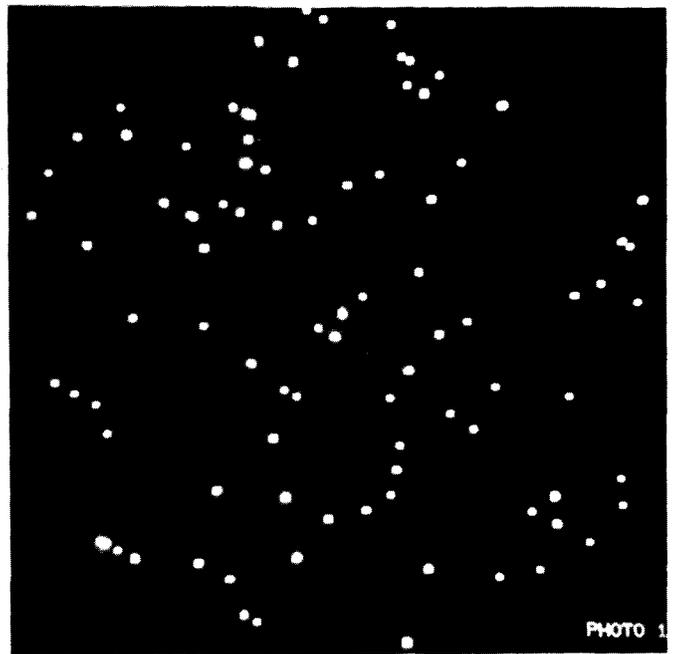
(Par exemple, les niveaux de seuil dépendent de la valeur moyenne du bruit de fond).

c2) La carte du ciel, utilisée pour masquer les étoiles (photo n° 1)

- plusieurs trames (type photo n° 0) sont additionnées, pour améliorer le rapport signal/bruit des étoiles ;
- le résultat est seuillé (tout ou rien) pour éliminer le bruit ;
- les taches obtenues sont élargies, pour tenir compte des fluctuations angulaires des étoiles et du mouvement de la voûte céleste.



une trame quelconque



une carte du ciel

Remarques :

1) La réalisation de la carte du ciel est périodique et prend un temps négligeable par rapport au temps de veille : elle n'a pas à être effectuée en temps réel.

2) Les pixels masqués représentent environ 4% de la surface du champ : c'est la probabilité de non détection d'une cible immobile couvrant un seul pixel. Cette probabilité chute et devient nulle pour une cible mobile ou plus importante.

c3) La veille (détection de nouvelles cibles)

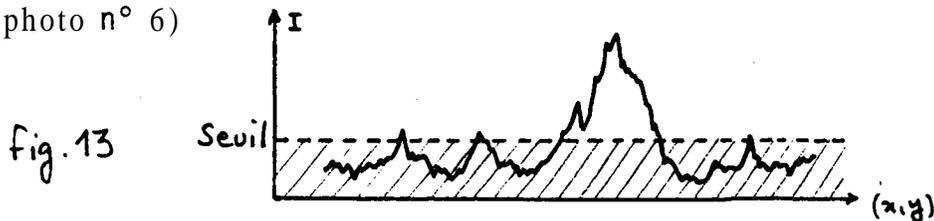
0 .La trame n (photo n° 3) est soustraite de la trame n - 1 (photo n°2)

.La valeur absolue de la différence (photo n° 4) est masquée par la carte du ciel (photo n° 1).

Le résultat (photo n° 5) est seuillé:

Seules restent les cibles et très peu de bruit

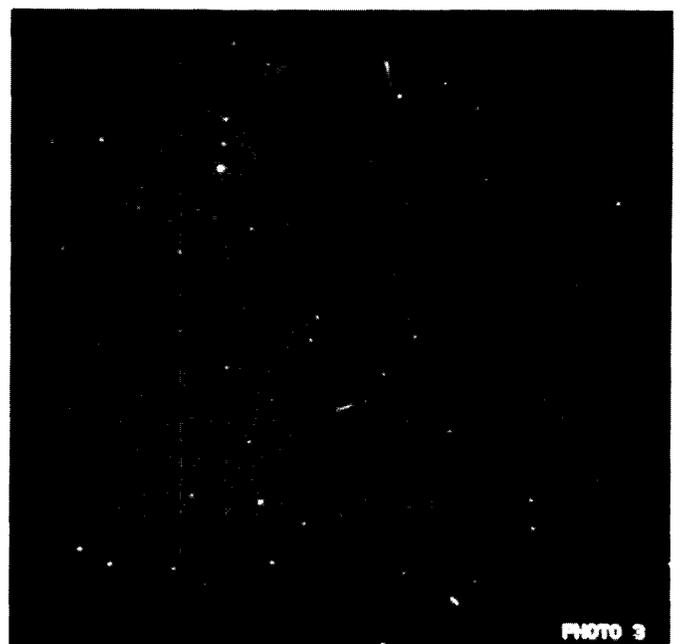
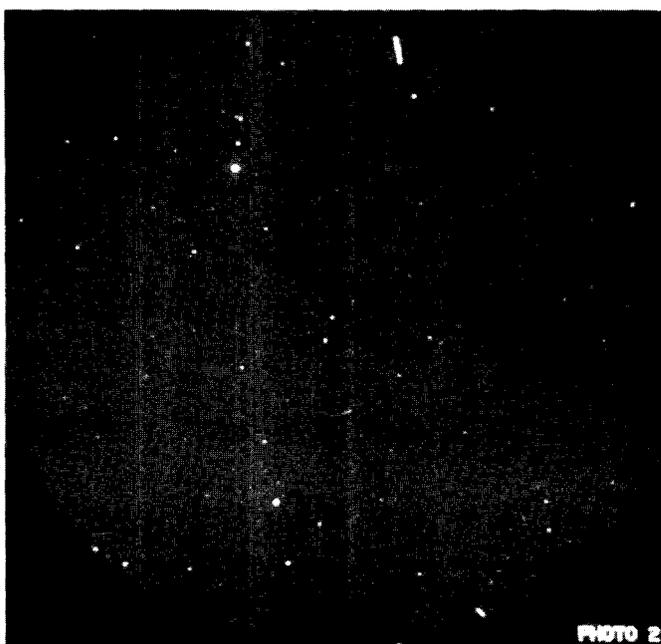
(photo n° 6)



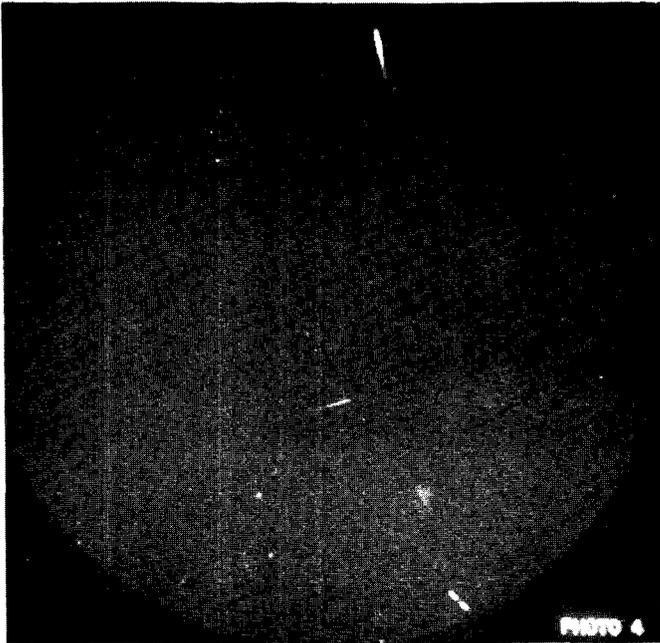
0 Les maxima locaux sont recherchés, un "point suspect" est créé pour chacun, s'il ne correspond pas à une cible déjà suivie (la distance doit être supérieure à 20 pixels: un "grand voisinage").

Trame n

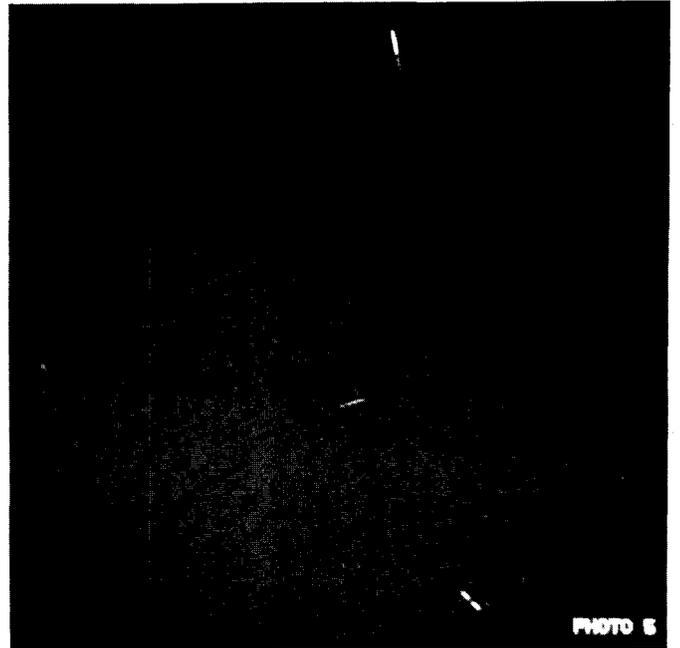
Trame n - 1



Différence :



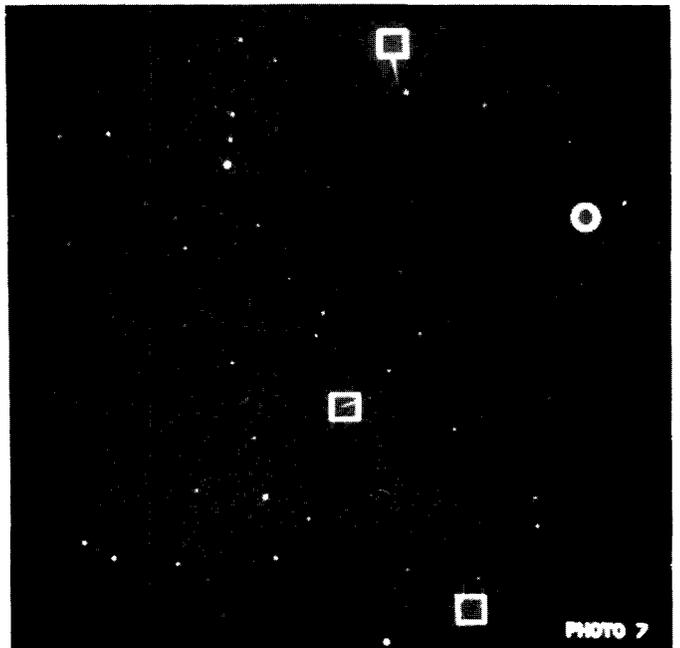
Différence masquée :



Différence masquée et seuillée :



Trame n, mise en évidence
des cibles détectées :



c 4) La poursuite

(A partir de la différence masquée : photo n° 5)

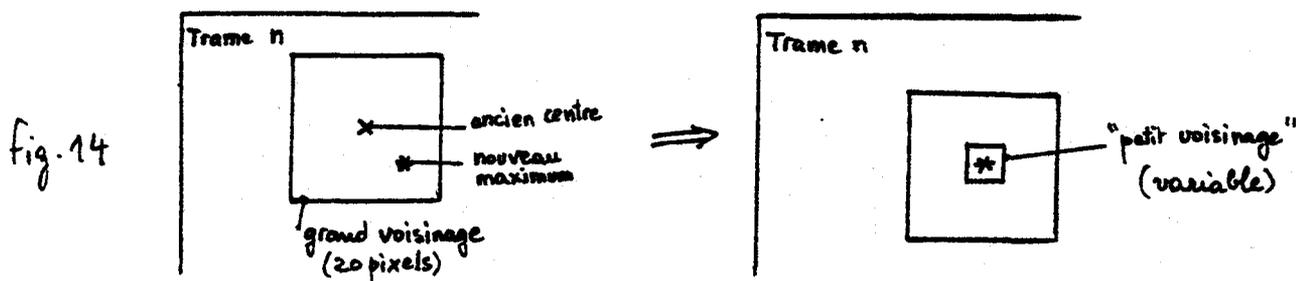
0 Les cibles suivies sont réparties en trois catégories :

- . les points suspects
- . les cibles confirmées
- . les anciennes cibles

0 La démarche :

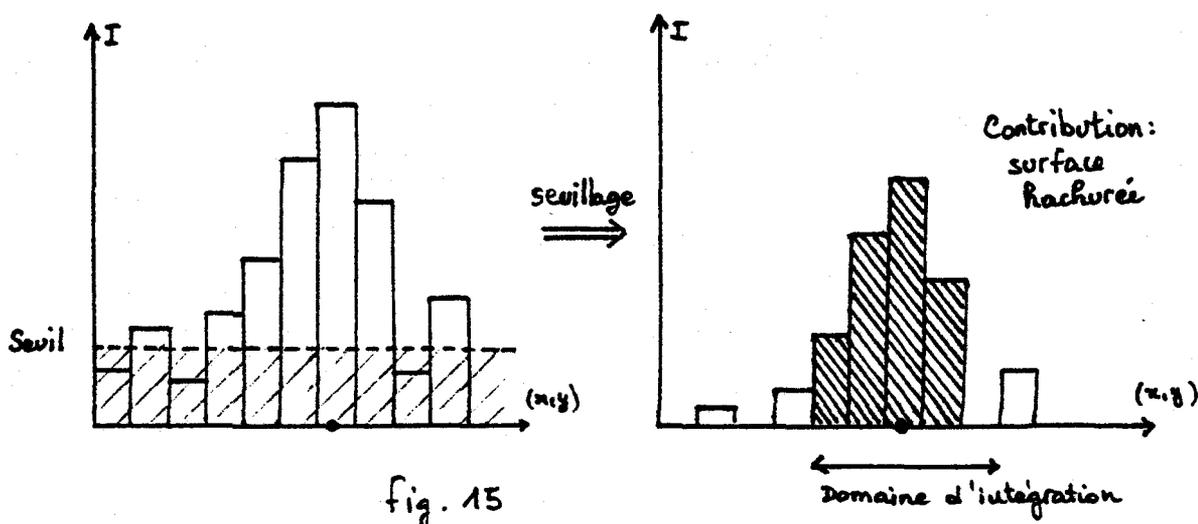
- Le traitement a lieu cible par cible.

- La nouvelle position est évaluée à chaque trame (recherche d'un maximum dans un "grand voisinage" autour de l'ancienne position) :



- La différence masquée (photo n° 5) est seuillée localement. Le niveau de seuil dépend de la catégorie, il est plus faible que pour la veille.

L'intégrale est calculée sur un "petit voisinage" du point : c'est la contribution de la trame pour cette cible:



(remarque : le domaine d'intégration est une caractéristique de chaque cible, il est corrigé à chaque trame pour s'adapter à la surface réelle de la cible).

- Les cibles sont suivies dans le temps, sans qu'il soit nécessaire de conserver d'anciennes trames en mémoire.

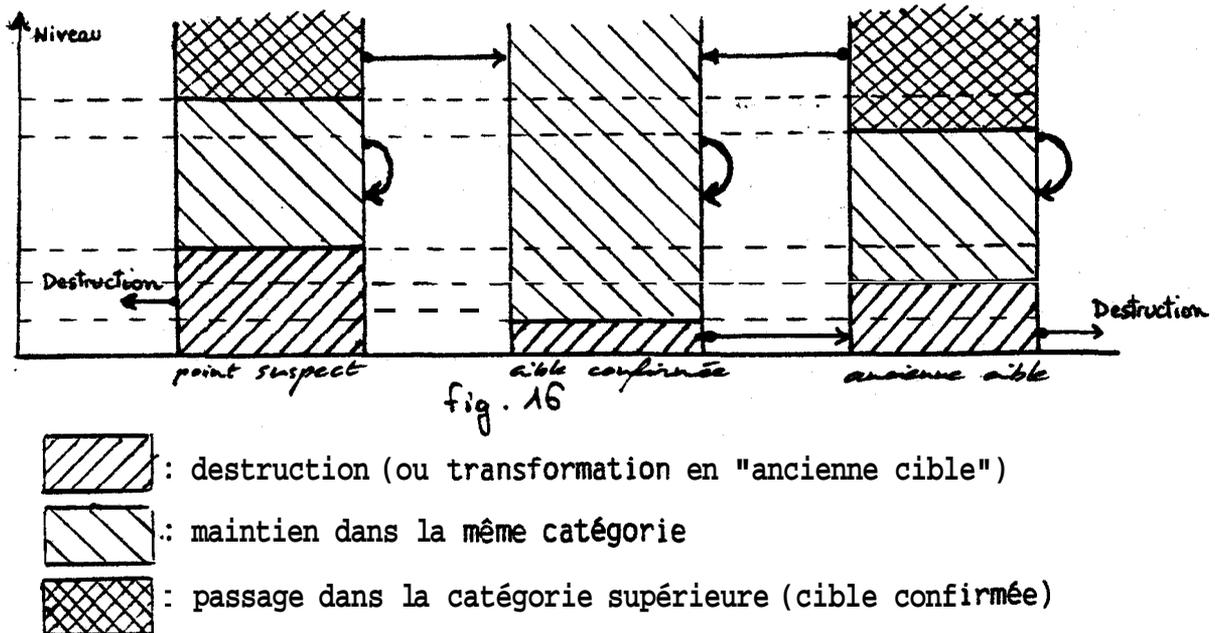
Le niveau de chaque cible prend en compte les contributions successives au moyen de la relation récurrente :

$$\text{niveau (trame } n) = \alpha \text{ contribution (trame } n) + (1 - \alpha) \text{ niveau (trame } n-1)$$

(α est choisi égal à 'r)

0 décisions en fonction du niveau

Elles dépendent de la catégorie de chaque cible, comme le montre le schéma suivant :



La présence sur une trame d'une cible confirmée ou d'une ancienne cible entraîne le stockage de la trame.

d) Conclusion-

0. En raison de l'énorme quantité de calculs nécessaires et de la complexité des modèles, il n'est pas possible de fournir pour l'instant d'estimations statistiques précises de :

- la probabilité de non détection
- la probabilité de fausse alarme

.Cependant , sur les essais réalisés, les cibles proches du niveau de bruit (bruit moyen + 1 ou 2 magnitudes, c'est à dire sous le bruit de crête) ont toutes été détectées, sans qu'il y ait de fausses alarmes par ailleurs.

La sensibilité en mode poursuite est supérieure d'au moins deux magnitudes à celle du mode veille

0 .Les algorithmes doivent être simplifiés :

◦ La veille

- la différence masquée et seuillée (photo n° 6) est obtenue en temps réel sur VICOM.

- son analyse pixel par pixel est plus longue.

◦ La poursuite

- elle prend moins de temps que la veille

- les trois catégories de cibles (points suspects, cibles confirmées, anciennes cibles) doivent être partiellement unifiées.

III - CONCLUSION

III.A -Bilan

Il ressort de l'étude de faisabilité que le type de station de détection envisagé répond aux spécifications (détection du phénomène type) :

1) au niveau du capteur

. Le météore type est décelé, la marge de détection est supérieure à 2 magnitudes.

. Les satellites en orbites basses sont bien visibles.

2) au niveau des algorithmes de traitement :

. Les phénomènes sont détectés même sous le niveau crête du bruit, grâce à l'algorithme établi : le système global n'est limité que par les caractéristiques du capteur.

. Il existe ainsi une marge de manoeuvre pour la simplification et l'adaptation au temps réel de cet algorithme.

III.B - Perspectives

La poursuite du projet est envisagée ; la réalisation d'une maquette pourrait être l'aboutissement de recherches menées selon 2 axes, sous la forme de thèses.

III.B.1) Le capteur

0 Une caméra enregistreuse devrait voir le jour rapidement sous forme de maquette. (De l'été 1983 à l'été 1984 :
- en fonction de la main d'oeuvre technique disponible
- sous réserve de mise à disposition du matériel).

Le coût des composants est estimé à 80 KF TTC (cf ref III)

0 Cette caméra serait ensuite expérimentée (par exemple au Pic du Midi) et servirait à obtenir des séquences brutes.

III.B.2) L'archivage sélectif

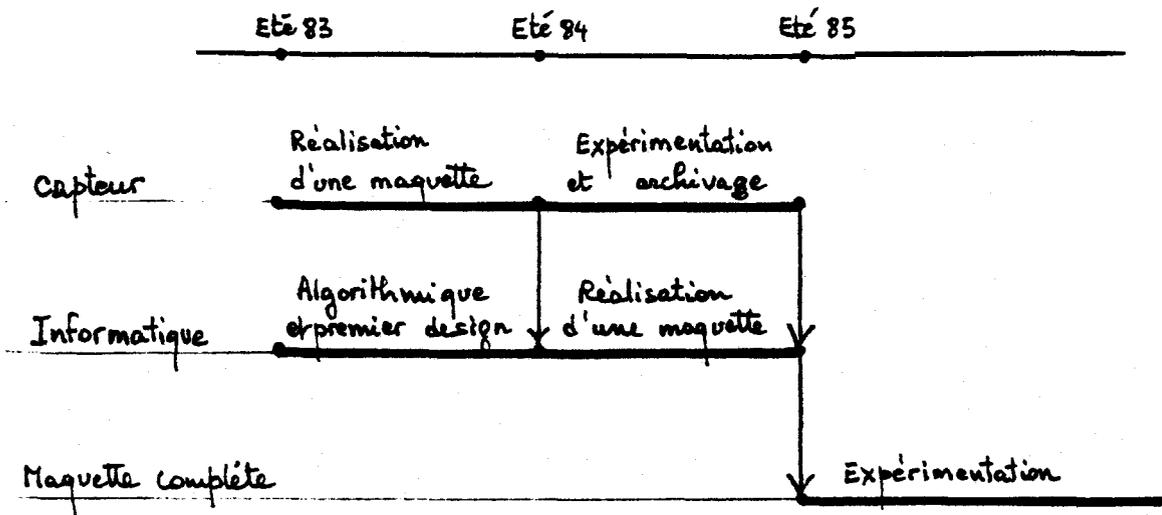
0 De l'été 1983 à l'été 84 : en attendant les séquences brutes

- ° amélioration de l'outil de simulation
- ° simplification des algorithmes de détection et de poursuite, en visant l'objectif temps réel (développements poursuivis sur un système de traitement d'image à usage général).
- ° estimation des contraintes matérielles et choix des composants d'une maquette,
- ° premier design d'une maquette microprogrammée et cablée.

0 De l'été 1984 à l'été 85 : en disposant des séquences brutes

- ° test des algorithmes
- ° réalisation de la maquette
- ° mise au point de l'interface caméra-micro informatique (fin 85)
- ° support de stockage

111.C - Les grandes lignes du calendrier proposé



Une maquette complète (capteur et archivage) pourrait être expérimentée fin 85 ou en 86. Son intérêt potentiel pour la détection des satellites pourra éventuellement justifier une participation de la DGA aux coûts de développement.



REFERENCES

- I - Etude sur la détection des phénomènes aérospatiaux rares* M. LOUANGE
- II - Système de détection de phénomènes aérospatiaux rares
(Résumé du mois de Septembre) MM CATHALA et FLAMENT
- III - Document technique n° 1 : étude du capteur M. CATHALA
- IV - Document technique n° 2 : études algorithmiques M. FLAMENT
- V - Astrophysical Quantities M. ALLEN
- VI - Vicom User's Manual
- VII - Document technique : Camera TELEPHOT
CNRS Laboratoire de Haute-Provence
Luminescence atmosphérique
LAO31 Novembre 1981 MM FEHRENBACH et CHEVASSUT

(* Document interne du CNES/GEPAN)