

NEUVIEME COLLOQUE SUR LE TRAITEMENT DU SIGNAL ET SES APPLICATIONS

NICE du 16 au 20 MAI 1983

TRAITEMENT DU SIGNAL DANS L'EXPERIENCE TYCHO

B. ROY et E. ZEIS

MATRA Z.I. du Palays Rue des Cosmonautes - 31400 TOULOUSE -

RESUME

L'expérience TYCHO utilise le télescope et le senseur stellaire du satellite scientifique HIPPARCOS. Elle doit fournir, pour un catalogue de 400.000 étoiles, des mesures astrométriques et photométriques. Le senseur stellaire est composé d'une grille de modulation non périodique placée au plan focal de l'instrument, d'un miroir dichroïque séparant la lumière selon deux bandes spectrales et de deux photomultiplicateurs.

Le signal en sortie du photomultiplicateur est obtenu par la convolution de la tache de diffraction de l'étoile observée avec la grille du senseur stellaire; un bruit de fond se superpose au signal utile, l'ensemble étant perturbé par un bruit photonique. On applique un filtrage numérique ayant un rôle double :

- améliorer le rapport signal / bruit et rendre plus étroit le pic de détection d'une étoile (filtre de type "replié")
- maximiser le rapport entre le lobe principal et les lobes secondaires de la fonction d'intercorrélation entre le signal et le filtre (technique analogue aux "coded apertures" développée pour l'imagerie aux rayons X).

Des filtres numériques de types différents sont utilisés en fonction des contraintes opérationnelles : traitement au sol, traitement à bord.

SUMMARY

The TYCHO experiment uses the telescope and star mapper of the scientific satellite HIPPARCOS. It will provide astrometric and photometric measurements for a catalogue of 400 000 stars.

The star mapper is composed of a non-periodic modulation grid located in the instrument focal plane, of a dichroic mirror splitting the light into two different spectral bands and of two photomultipliers.

The signal, at the output of the photomultiplier, is obtained through the convolution of the observed star diffraction pattern with the star mapper grid ; a background noise is superimposed on the useful signal, a further deterioration being caused by photon noise.

- A numerical filter is applied to the signal which has a twofold purpose :
- Improve the signal / noise ratio and make the star detection peak narrower (filter of the "folded" type)
 - Maximize the side lobe suppression factor of the intercorrelation function between the signal and the filter (technique of "coded apertures" as used for X-ray imaging).

Numerical filters of different types are used according to the operational constraints (on-ground processing, on-board processing).



1. INTRODUCTION

Le satellite scientifique HIPPARCOS de l'agence spatiale européenne (ESA) sera lancé en 1987 en orbite géostationnaire. Il permettra l'élaboration d'un catalogue des paramètres astrométriques (position, parallaxe et mouvement propre) de 100 000 étoiles présélectionnées. Les mesures astrométriques seront d'une précision nettement améliorée par rapport à celles que l'on peut atteindre à partir des observatoires terrestres. L'objectif est d'atteindre des erreurs moyennes inférieures à 2 milliarcsec. sur les deux composantes de position sur la parallaxe et 2 milliarcsec. sur les 2 paramètres de mouvement propre, pour des étoiles de magnitude $B = 9$ mag. et d'indice de couleur $B - V = 0.5$ mag. Rappelons que la magnitude d'une étoile dans une bande spectrale ($B =$ bande spectrale bleue, $V =$ bande spectrale visible) est reliée au flux d'énergie reçu de la part de l'étoile dans cette bande. Les étoiles de magnitude élevée dans une bande (typiquement $B = 12$ ou 13 mag. qui est la limite des étoiles observables par HIPPARCOS) correspondant de façon inverse à un flux d'énergie faible reçu dans cette bande. Les étoiles les plus brillantes sont de magnitude faible (principalement comprises entre $B = 6$ et 10 mag.).

Un tel catalogue astrométrique permettra des mesures de position précises des objets dans le système planétaire, des étoiles et des objets extragalactiques par l'établissement de systèmes de référence ainsi que l'étude du mouvement des objets célestes. De même la géodésie et la géophysique bénéficieront des raffinements des techniques astrométriques.

A bord du satellite HIPPARCOS sera embarquée une expérience supplémentaire dénommée TYCHO : celle-ci doit permettre l'élaboration d'un catalogue des paramètres astrométriques et photométriques de 400 000 étoiles. Selon l'objectif envisagé, la précision astrométrique, tout en étant moindre que dans le catalogue HIPPARCOS, devrait atteindre 0.1 arcsec environ pour les étoiles les moins brillantes observées. Un tel catalogue est d'un très grand intérêt pour les astrophysiciens et serait irréalisable avec les techniques des observatoires terrestres.

L'expérience TYCHO permet d'utiliser efficacement l'instrumentation d'HIPPARCOS en exploitant les données des senseurs stellaires nécessaires au contrôle d'attitude du satellite. Le signal de sortie de ces senseurs stellaires est transmis au sol puis traité à l'aide d'un filtrage approprié pour donner une estimation astrométrique et photométrique des étoiles transitant devant le système optique du satellite. Le traitement du signal de TYCHO ainsi que les résultats de simulation effectués au Centre Matra Toulouse sont l'objet de cet article.

2. DESCRIPTION DU SYSTEME D'OBSERVATION

Le système d'observation du satellite HIPPARCOS est constitué d'un télescope optique permettant de superposer au plan focal de l'instrument les observations selon deux directions séparées par un angle de base. L'intensité lumineuse des étoiles apparaissant dans chacun des deux champs de vue est modulée dans le plan focal par une grille constituée de fentes transparentes périodiquement espacée et perpendiculaire à la trace de la trajectoire du satellite. Celui-ci est animé d'un mouvement de rotation autour d'un axe de pivotement perpendiculaire au plan des deux directions d'observation (12 rotations par jour). L'axe de pivotement décrit un cône de révolution autour de la droite satellite-soleil (environ 6.5 révolutions par an). Le mouvement du satellite est illustré en figure 1.

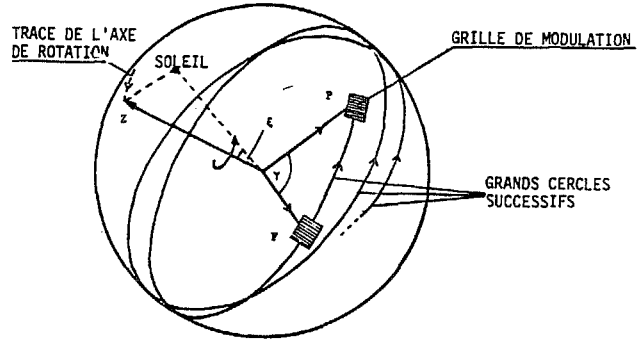


Figure 1 : Directions d'observation d'HIPPARCOS et trajectoire du satellite

Le champ de visée optique se compose, au centre du champ principal alloué à la mission nominale HIPPARCOS et, sur les côtés, des deux champs de visée des senseurs stellaires utilisés dans l'expérience TYCHO (figure 2).

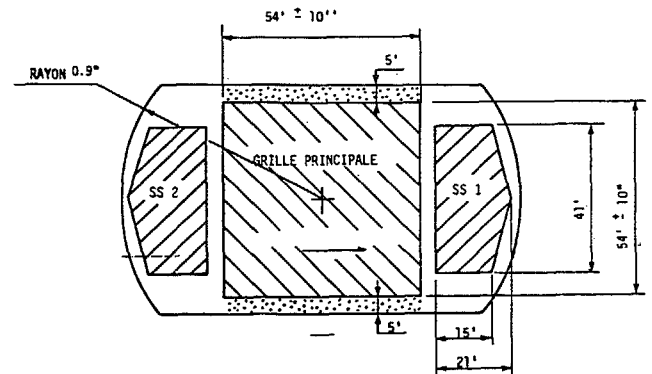


Figure 2 : Champ de visée optique.

Considérons en figure 3 le chemin suivi par la lumière issue d'une étoile transitant dans le champ d'un senseur stellaire.

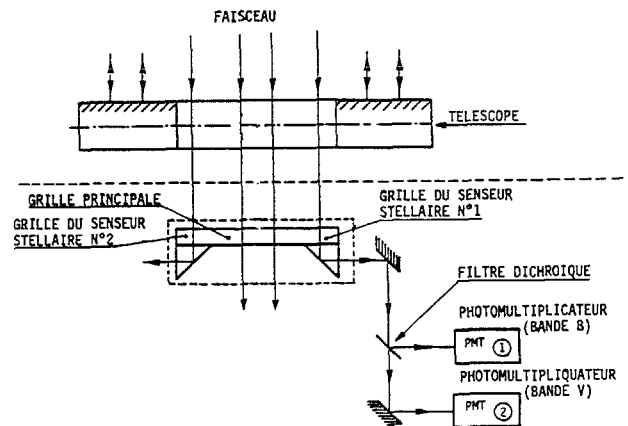


Figure 3 : Diagramme optique d'un senseur stellaire

Un filtre dichroïque sépare la lumière issue de l'étoile selon les deux bandes spectrale B et V (afin de permettre des mesures photométriques selon ces deux bandes) puis le flux lumineux est détecté par des photomultiplicateurs et transformé en signal électrique échantillonné à une fréquence de 600 Hz.

La structure de la grille du senseur stellaire a fait l'objet d'une optimisation décrite dans le paragraphe 3.

3. PROBLEMES DE TRAITEMENT DU SIGNAL DANS TYCHO

3.1 Modélisation du signal issu d'une étoile

Pour la plupart des étoile observées, entre les magnitudes 4 et 12, le photodétecteur fonctionne en mode "compteur de photons" le signal électrique issu du P.M étant affecté alors typiquement de fluctuations obéissant à une statistique de Poisson.

Par ailleurs, deux sources de bruits viennent s'ajouter au signal de l'étoile : d'une part le bruit stellaire (constitué par la distribution des étoiles de très forte magnitude) et d'autre part le courant de noir du photomultiplicateur (observé en l'absence de lumière à l'entrée du P.M).

Le signal lumineux issu d'une étoile est diffracté dans le télescope et donne une tache image diffractée au plan focal : c'est la Point Spread Function (PSF). Cette tache est analysée par chaque fente de la grille du senseur stellaire (selon une vitesse de 180 arcsec/sec correspondant à la rotation du satellite par rapport à son axe de pivotement) et donne un signal de forme $f(t)$ échantillonné à 600 Hz après détection par le P.M. (figure 4).

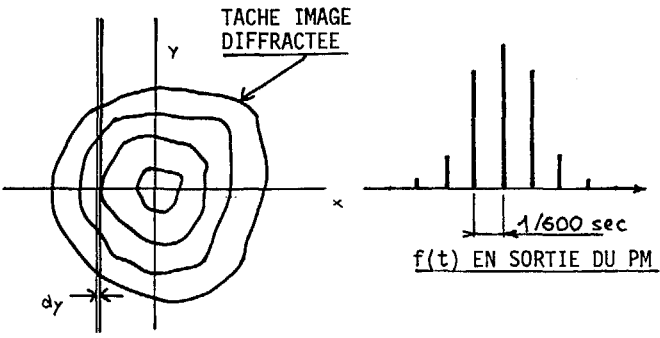


Figure 4. Analyse de la tache de diffraction par une fente de la grille.

Soit n_i la suite des comptes d'électrons en sortie d'un photomultiplicateur, nous la modéliserons comme suivant une distribution de Poisson de moyenne.

$$E(n_i) = b + a f(i - p)$$

où b représente le niveau de bruit total (bruit stellaire + bruit de courant de noir), a l'amplitude et p la position de l'étoile.

Le problème du traitement du signal TYCHO peut être formulé ainsi : il s'agit d'estimer les paramètres a et p de l'étoile, le niveau de bruit de fond b étant inconnu a priori. La vitesse de rotation du satellite ainsi que la fréquence d'échantillonnage du P.M. étant constants, nous pouvons agir à deux niveaux pour résoudre le problème d'estimation : d'une part au niveau de la grille du senseur stellaire, d'autre part au niveau du filtrage en sortie du P.M.

3.2 Optimisation de la grille du senseur stellaire.

Cette grille est constituée de fentes transparentes de hauteur h et de largeur δ . Une étoile transitant dans le champ de visée du senseur stellaire passe successivement devant les fentes de la grille. Il est nécessaire d'en disposer d'un certain nombre (typiquement 4 ou 8) afin de collecter suffisamment de photons pour les étoiles les moins brillantes en sommant les signaux issus d'une étoile à travers plusieurs fentes. Par ailleurs, la distance minimale entre les fentes est telle qu'il n'y a pas recouvrement des signaux $f(t)$ associés à deux fentes successives.

L'optimisation de la grille du senseur stellaire consiste à déterminer les paramètres hauteur et largeur des fentes, nombre des fentes, dans le but de minimiser l'erreur d'estimation de la position de l'étoile observée. M.LINDEGREN (Lund Observatory, SWEDEN) a montré que l'on pouvait obtenir une borne minimale de la précision attendue qui fasse intervenir les paramètres de la grille.

Soit $I(t)$ la densité (fonction du temps) du processus de comptage de Poisson inhomogène considéré en sortie du Photomultiplicateur. Soit $N(t)$, le nombre de photons comptés du temps $t = 0$ au temps $t = T$, on peut exprimer la probabilité d'observer le processus $N(t)$ à l'aide de la fonction :

$$P\{N(t), 0 \leq t \leq T\} = \exp\left[-\int_0^T I(t; \theta) dt + \sum_{i=1}^N \ln I(t_i; \theta)\right]$$

L'estimée du maximum de vraisemblance $\hat{\theta}$ de θ est alors obtenue en maximisant la fonction de vraisemblance :

$$l(\theta) = -\int_0^T I(t; \theta) dt + \sum_{i=1}^N \ln I(t_i; \theta)$$

La borne de CRAMER-RAO nous donne alors, dans le cas d'un estimateur sans biais :

$$\epsilon^2 \geq \left[\int_0^T \frac{1}{I(t; \theta)} \left[\frac{dI(t; \theta)}{d\theta} \right]_{\theta=\hat{\theta}}^2 \right]^{-1}$$

En sommant les contributions des N fentes de la grille, la borne de CRAMER-RAO sur l'estimation du temps de passage de l'étoile dans le champ de visée du senseur stellaire devient :

$$\epsilon_N^2 = \frac{1}{N} \epsilon^2$$

La densité $I(t)$ est définie par :

$$I(t) = b(h, \delta) + a f(t; \delta)$$

Le bruit de fond b est relié aux dimensions et au nombre de fentes pour le bruit stellaire et le signal $f(t; \delta)$ présentera une forme plus ou moins étroite selon la largeur δ de la fente.

La borne de CRAMER-RAO sur l'estimation de la position de l'étoile a donc été l'outil de l'optimisation des paramètres δ et N de la grille, h étant déterminé par des contraintes extérieures. Le programme d'optimisation est structuré selon le diagramme de la fig. 5.

La forme du signal $f_B(t; \delta)$ et $f_V(t; \delta)$ étant différente selon les deux bandes spectrales, l'optimisation a été menée séparément dans les deux bandes spectrales puis un compromis est fait entre les deux largeurs optimales. L'augmentation du nombre de fentes de $N = 4$ à $N = 8$ amène une amélioration de la borne de CRAMER-RAO qui est assez faible étant donné le rôle limitatif du bruit stellaire.

L'optimisation de la répartition des fentes dans la grille du senseur stellaire est effectué conjointement avec la recherche du processus de filtrage à la sortie du senseur stellaire.

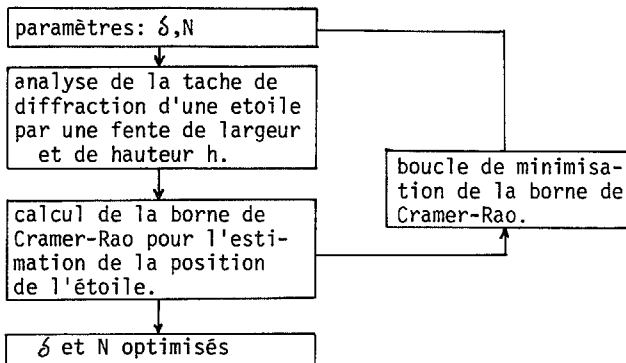


Figure 5 : Diagramme du programme d'optimisation de la grille du senseur stellaire.

3.3 Détermination du procédé de filtrage.

Le signal observé en sortie du photomultiplicateur, échantillonné à 600 Hz, est la somme du signal attendu lors du transit d'une étoile dans le champ de visée et d'un bruit de fond de niveau que nous supposons constant, chaque échantillon suivant une distribution de Poisson. Lorsque l'étoile transite dans le champ de visée, elle passe successivement devant les fentes de la grille.

Le filtre estimateur de la position et de l'amplitude de l'étoile doit avoir les propriétés suivantes :

- en l'absence d'étoile transitant dans le champ de visée, l'expérience mathématique du signal de sortie doit être nulle, c'est à dire que le bruit de fond doit être éliminé en moyenne
- quand une étoile est présente à une position p , le signal doit posséder un pic au point p avec une amplitude d'espérance mathématique égale à a .
- il faut pouvoir distinguer les différentes fentes de la grille, c'est-à-dire lever l'ambiguïté de détermination de la position. Pour cela, il faut que les pics secondaires soient le plus possible atténués par rapport au pic principal.

Nous avons recherché un filtrage non-optimal (au sens du maximum de vraisemblance) mais présentant une structure simple : le principe consiste à effectuer une intercorrélation entre le signal observé et une copie pondérée du signal attendu (voir la figure 7). Pour satisfaire la troisième propriété du filtre, il faut donc déterminer un filtre dont la fonction d'autocorrélation présente un lobe principal le plus élevé possible relativement aux lobes latéraux. M. Lindegren a montré que ce problème pouvait trouver une réponse dans les techniques de masquage employées en imagerie aux rayons X. Sur la figure 5, on vérifie que l'autocorrélation du signal attendu présente un pic en position 0 avec un rapport entre le pic principal et les pics secondaires de 4.

La structure du filtre étant optimisée, la forme élémentaire qui se trouve répétée N fois dans le filtre a été déterminée afin de minimiser la variance du signal de sortie à la position p de l'étoile. La forme élémentaire est déterminée proportionnelle à $\frac{f_i}{1 + \frac{a}{b} f_i}$ en prenant en compte le rapport entre l'amplitude du signal et celle du bruit pour pondérer la forme f_i du signal attendu.

La deuxième propriété est satisfaite en normalisant le filtre de manière appropriée.

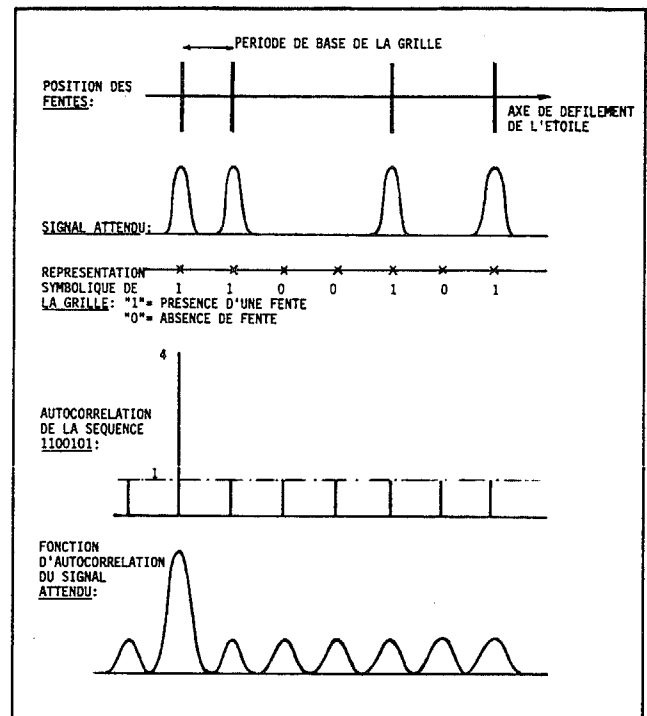


Figure 5 : Exemple de structure de grille à 4 fentes

Afin d'obtenir un filtre d'intégrale nulle, une partie négative a été ajoutée aux formes élémentaires positives. Cette partie négative de niveau constant (figure 7) joue le rôle d'estimateur du bruit de fond. Elle est donc étendue sur suffisamment de points afin de minimiser la variance de cette estimation.

L'estimation de la position p et de l'amplitude a de l'étoile est obtenue, après détection par seuillage du lobe principal, par mesure directe de la position et du niveau maximum de ce lobe.

4. RESULTATS DE SIMULATION DU FILTRAGE DES DONNEES TYCHO et CONCLUSION

Afin d'évaluer les performances du traitement des données TYCHO, nous avons développé au CMT, avec le concours de M. Francis VIOLES (de la MGIS) pour l'implantation sur ordinateur, une simulation décrite dans le diagramme de la figure 6.

Le calcul de la variance des estimateurs \hat{a} et \hat{p} est faite avec un nombre de simulation égal à 200 typiquement.

Un exemple de simulation est donné en figure 7. Le signal bruité en sortie du photomultiplicateur en 7.a) pour une étoile de magnitude $B = 9$ mag. et d'indice de couleur $B - V = 0.7$. Nous distinguons assez facilement les 4 pics correspondant au passage de l'étoile devant les fentes de la grille, car la magnitude de cette étoile est inférieure à la limite de détection $B = 11$ mag. En figure 7.b) est représenté le filtre avec les 4 formes élémentaires positionnées à l'endroit des 4 pics du signal de l'étoile et la partie négative nécessaire à l'élimination du bruit de fond superposé au signal. En figure 7.c) le signal de sortie du filtre autour de la position de l'étoile montre un pic central nettement distinct des pics secondaires. Après une analyse statistique sur 200 simulations on obtient un écart type de $\sigma_{\hat{a}} = 0.1$ mag. et $\sigma_{\hat{p}} = 0.04$ arcsec pour cette étoile dans la bande B .



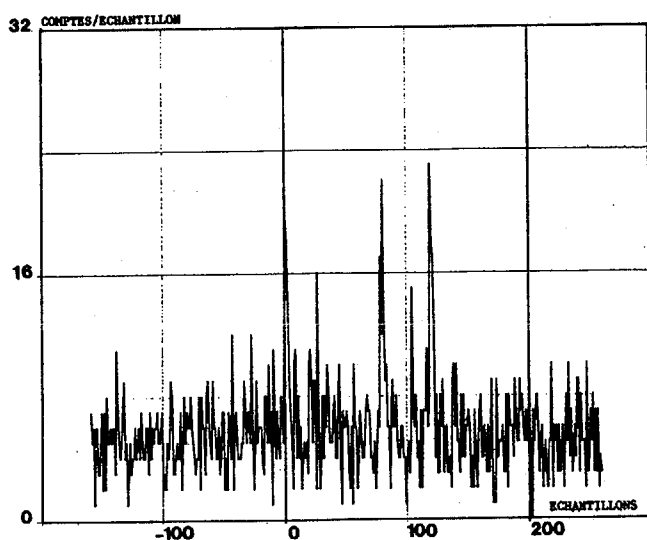
TRAITEMENT DU SIGNAL DANS L'EXPERIENCE TYCHO

Quelques résultats sont rassemblés dans le tableau 1 concernant des étoiles de magnitude $B \leq 9$. Pour comparaison figurent dans le tableau les valeurs attendues des précisions de mesures. Il apparaît que les performances astrométriques sont satisfaites. Les performances photométriques attendues ne sont atteintes que pour des étoiles de magnitude $B \leq 9$ mag. (ces résultats ne sont donnés qu'à titre indicatif).

La simulation ainsi décrite permet une étude paramétrique de la chaîne de traitement TYCHO : influence des paramètres de la grille, choix des photomultiplicateurs (réponses spectrales, courant de noir), variation de la vitesse de rotation du satellite par rapport à la vitesse nominale, modification de l'optique d'HIPPARCOS.

REFERENCE

- 1 D.L. SNYDER "Random Point Processes"
John Wiley and Sons, New York 1975



a) signal en sortie du photomultiplicateur

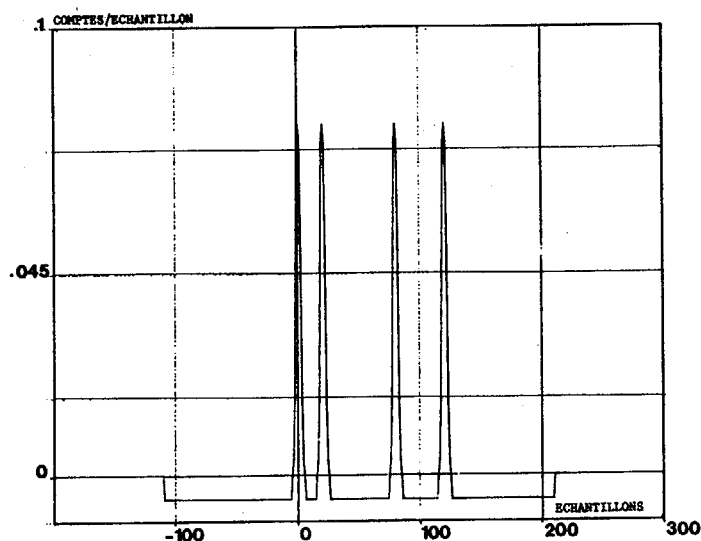
B = 10	Simulation	valeur attendue
B - V = 1.25	0.06 arcsec	0.15 arcsec
B - V = 0.5	0.09 arcsec	0.1 arcsec
B - V = -0.25	0.12 arcsec	0.15 arcsec

Tableau 1.a) astrométrie

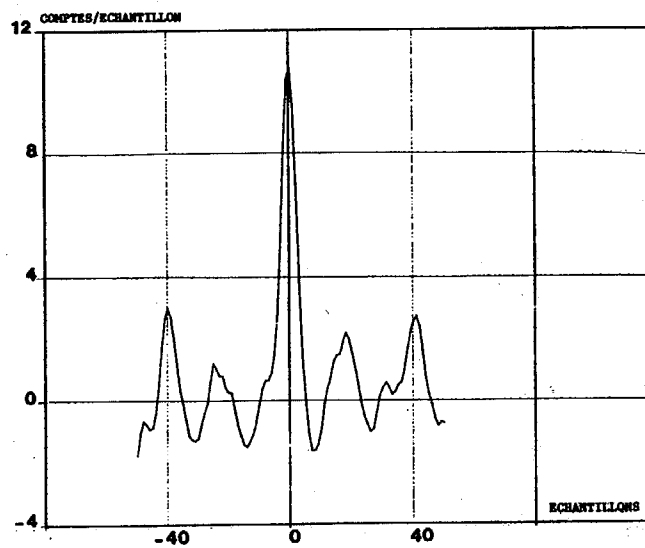
B = 10	Simulation	valeur attendue
B - V = 1.25	0.21 mag.	0.22 mag.
B - V = 0.5	0.28 mag.	0.15 mag.
B - V = -0.25	0.24 mag.	0.22 mag.

Tableau 1.b) photométrie dans la bande B

Tableau 1 : Résultats de simulation pour des étoiles de magnitude $B = 9$ mag. et d'indice de couleur 1.25, 0.5, -0.25.



b) réponse impulsionnelle du filtre



c) signal de sortie du filtre

Figure 7 : Exemple de traitement du signal TYCHO pour une grille à 4 fentes (étoile de magnitude $B = 9$, d'indice de couleur $B - V = 0.7$)



TRAITEMENT DU SIGNAL DANS L'EXPERIENCE TYCHO

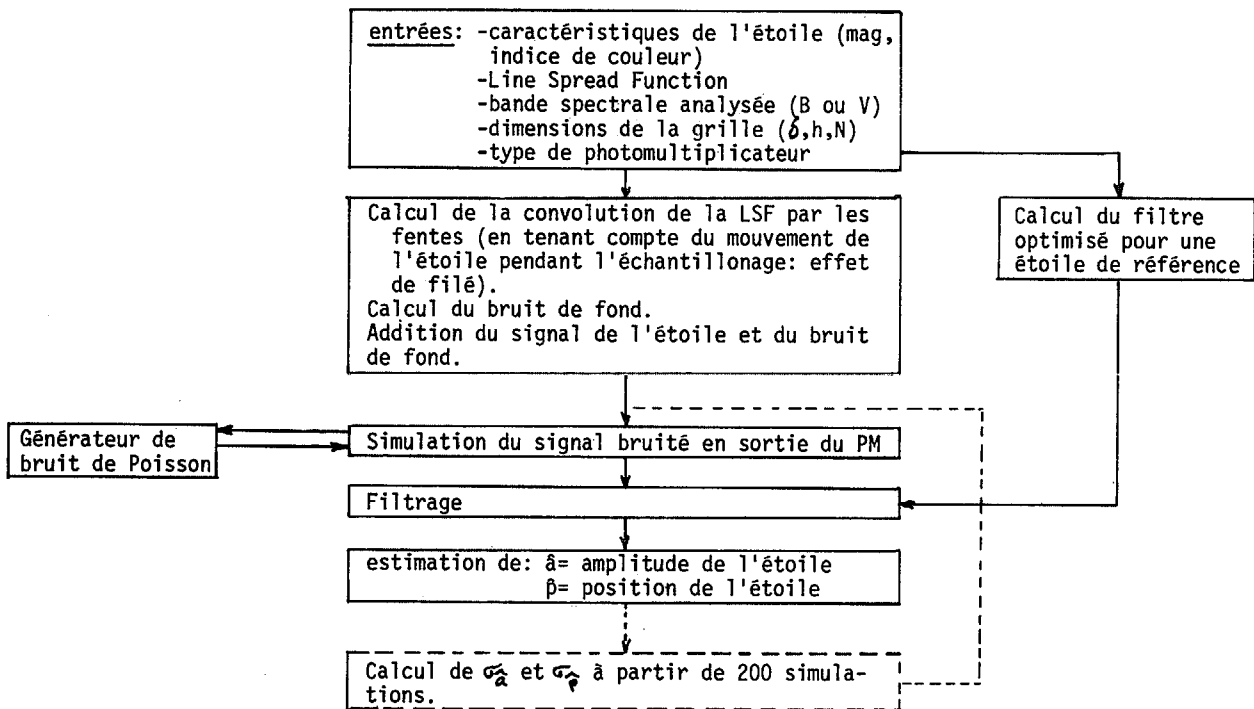


Figure 6 : Diagramme de la simulation du filtrage des données TYCHO