Correction des transitoires de la caméra infrarouge du satellite ISO

Alain Coulais, Alain Abergel

Institut d'Astrophysique Spatiale, Bâtiment 121, Université Paris XI, 91405 Orsay cedex - France
coulais@ias.fr, abergel@ias.fr

Résumé – Les photo-détecteurs utilisés en astronomie infrarouge à très bas niveau de flux présentent généralement une rémanence lors d'un changement d'illumination. Ce phénomène transitoire est non linéaire et non symétrique pour les montées et les descentes. Pour le détecteur ISOCAM-LW embarqué sur le satellite ISO, nous avons montré qu'un modèle issu de la physique des photo-détecteurs permet de décrire avec une très bonne précision (de l'ordre du pour-cent) ces transitoires lorsque le gradient entre les pixels est limité (cas dit de l'éclairement quasi uniforme). Une méthode d'inversion originale permet de corriger ces transitoires. Nous travaillons actuellement sur les problèmes induits par les forts gradients d'éclairement entre pixels voisins.

Abstract – Low level photo detectors used in infrared astronomy do not response instantaneously after a change of the incident illumination. These transient processes are non linear, and upward steps and downward steps are not symmetrical. We show that a model based on photodetector theory allows to describe with a good accuracy the transient processes for the LW detector of ISOCAM aboard the ISO satellite for low contrasted fields. One original inversion method allows to correct the transient processes. Actually, we work on the crosstalk between pixels for strong gradients of illumination.

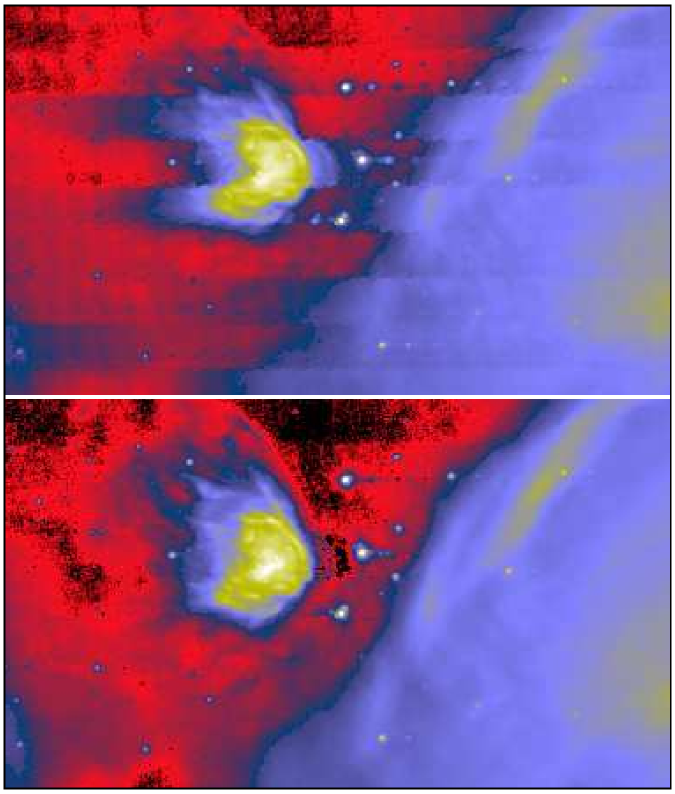

Fig. 1: Région de formation d'étoiles observée par LW-ISOCAM (champ de l'ordre de 10×25 minutes d'arc). Sur la figure du haut est présentée la carte brute obtenue en mode balayage (ici, 9 balayages en zigzag, de haut à droite en bas à gauche); sur la figure du bas, la carte est corrigée des transitoires ainsi que des problèmes de champ plat variable dans le temps (Miville-Deschênes et al., 1999).

1 Position du problème

Le ciel observé en astronomie infrarouge se caractérise par des niveaux de flux très bas (typiquement 10^{-9} fois le flux d'une scène IR terrestre). Les détecteurs utilisés sont généralement des semi-conducteurs extrinsèques refroidis à quelques Kelvins.

La réponse des détecteurs IR à un changement de flux n'est pas instantanée. Un phénomène transitoire se produit jusqu'à stabilisation sur la nouvelle valeur. La correction du transitoire permet de réduire le temps d'observation pour une même précision et, en mode imagerie par balayage, de supprimer les artefacts (Fig. 1). Ce problème se rencontre sur la majorité des détecteurs IR embarqués sur les satellites astronomiques.

Nous nous intéresserons plus particulièrement à la voie LW (4-18 μm) de la caméra ISOCAM embarquée sur le satellite ISO (Cesarsky et al., 1996). Celui-ci a été lancé en novembre 1995 et a fonctionné jusqu'en avril 1998 (Kessler et al., 1996). Cette voie est munie d'un détecteur constitué d'un mono cristal en Si:Ga sur lequel une matrice de 32 $\times$32 pixels est définie électriquement (au pas carré de 100 μm, épaisseur du cristal de 500 μm).

2 Description des transitoires

Le ciel observé en IR est composé a priori de structures à grande échelle (par exemple l'émission zodiacale) sur lesquelles se superposent des structures à plus petite échelle spatiale, allant jusqu'aux sources ponctuelles (étoiles). Un des modes d'observation le plus classique consiste à observer durant quelques poses élémentaires (typiquement de 5 à 20) dans une direction fixe, puis à changer de di-

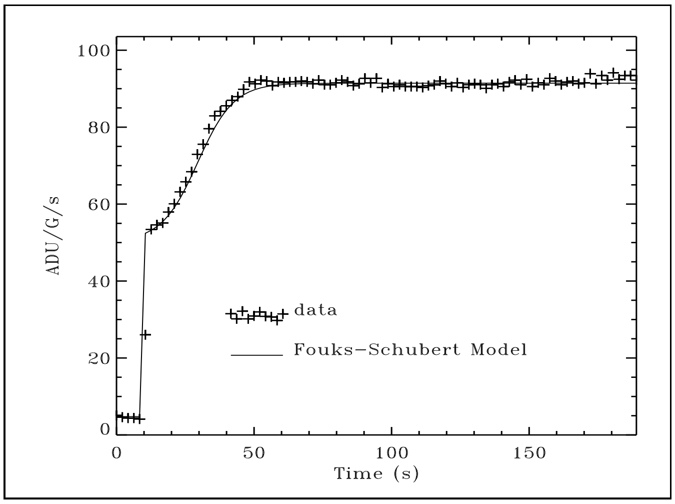

FIG. 2: Exemple d'un transitoire montant (réponse à une marche de flux). Le niveau avant changement de flux est constant. Les données sont représentées par des croix (+), le modèle par le trait continu (Eq. 1). '"ADU/G/s": unité interne de la caméra divisée par le gain électronique (G) et le temps d'exposition (s).

rection de pointage. Des transitoires se produisent après chaque changement de pointage lorsque le niveau de flux du ciel change. Sans correction de transitoire, l'écart entre le signal mesuré et le flux peut atteindre 40 % (Fig. 2).

L'étude des transitoires en montée et en descente pour des éclairement uniformes sur tout le détecteur a mis en évidence un certain nombre de propriétés reproductibles du détecteur (Abergel and Pérault, 1994; Abergel et al., 1999) :

- un saut instantané de l'ordre de 60 % la marche de flux;
- un temps de mise en stabilisation en première approximation inversement proportionnel à l'illumination;
- un point d'inflexion à la montée dont la position et est liée aux illuminations initiale et finale;
- une descente sur des faibles flux quasiment hyperbolique.

Tout ceci indique que le modèle décrivant le détecteur doit être non-linéaire.

3 Modèle utilisé

Nous avons utilisé un modèle non linéaire de physique des semi-conducteurs, développé par Fouks et Schubert (1995) pour le détecteur PHT-S d'ISO (Si:Ga, épaisseur de 2 mm, 64 pixels de 0.35×0.37 mm, longueur d'onde entre 2.5 et 12. μm). Ce modèle n'est qu'un cas particulier d'une famille de modèles pouvant être déduits d'un ensemble d'équations différentielles en fonction des conditions aux limites choisies.

La première expression du modèle décrit le passage d'un niveau stabilisé J_{n-1}^{∞} à un nouveau niveau J_n^{∞} à l'instant

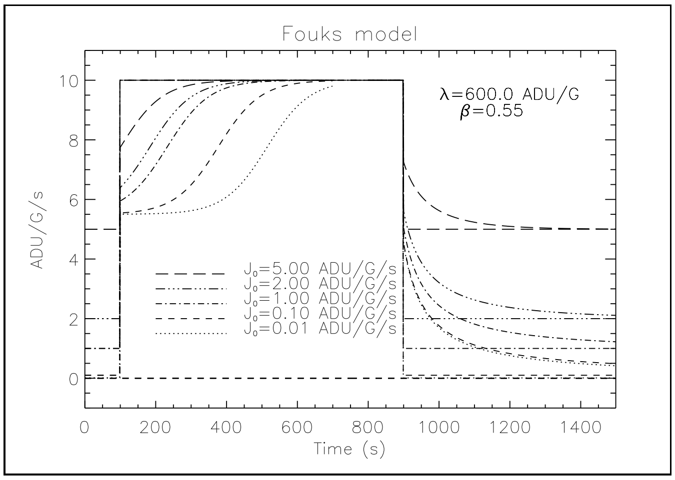

FIG. 3: Réponses du modèle de Fouks et Schubert pour des marches montantes et descendantes (Eq. 1). Les niveaux de départ pour les marches montantes (saut à t=100 s) et les niveaux d'arrivée pour les marches descendantes (saut à t=900 s) sont 0.01, 0.1, 1, 2 et 5 ADU/G/s. Le niveau final pour les marches montantes et initial pour les descendantes est de 10 ADU/G/s. La position du point d'inflexion en montée est fortement dépendante du niveau initial et du niveau final (aussi constaté dans les observations).

$t = 0$:

$$J_n(t) = \beta J_n^{\infty} + \frac{(1-\beta) J_n^{\infty} J_{n-1}^{\infty}}{J_{n-1}^{\infty} + (J_n^{\infty} - J_{n-1}^{\infty})\ exp(-t/\tau)} \quad (1)$$

avec β la réponse instantanée juste après le changement de flux et τ la constante de temps. Fouks et Schubert montrent que cette constante de temps τ est reliée au nouveau niveau par : $\tau = \lambda / J_n^{\infty}$, où λ est une constante. Cette relation est vérifiée expérimentalement sur plusieurs ordres de grandeur aussi bien pour PHT-S que pour ISOCAM-LW.

L'équation 1 est non-linéaire (à cause du terme J_n^{∞} dans l'exponentielle) et non symétrique entre la montée et la descente (Fig. 3). Cette équation ne peut être utilisée que pour des changements entre niveaux stabilisés, ce qui n'est généralement pas le cas pour les observations. Une nouvelle équation pour le cas général est dérivée de la première par Fouks et Schubert en assurant la conservation du courant :

$$J_n(t) = \beta J_n^{\infty} + ...$$
$$\frac{(1-\beta)(J_{n-1}^{fin} - \beta J_{n-1}^{\infty}) J_n^{\infty}}{(J_{n-1}^{fin} - \beta J_{n-1}^{\infty}) + ((1-\beta) J_n^{\infty} - (J_{n-1}^{end} - \beta J_{n-1}^{\infty})) e^{-(t-t_n)/\tau}}, \quad (2)$$

avec J_{n-1}^{fin} le courant (non stabilisé) juste avant le changement d'éclairement.

4 Ajustement des paramètres

Un ajustement au sens des moindres carrés du modèle au signal a été réalisé sur des données d'étalonnage, les paramètres libres étant le niveau du zéro, β et λ. Un excellent accord avec les données expérimentales est obtenu sur la dynamique disponible (de quelques ADU/G/s à quelques

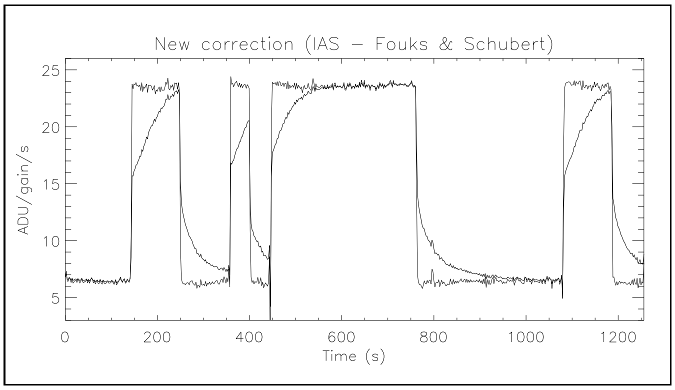

FIG. 4: Exemple de correction de données de vol (valeur médiane du carré central) avec le modèle de Fouks-Schubert et la méthode d'inversion basée sur Müller. Ces données d'étalonnage sont obtenues en vol par l'observation continue de l'émission zodiacale modulée par une roue à filtres. Le temps d'intégration est de 2.1 s.

centaines d'ADU/G/s). Ces ajustements ont permis de calculer des cartes pour les deux paramètres β et λ caractérisant chacun des 32×32 pixels du détecteur. Reproduits sur plusieurs jeux de données indépendants durant la vie du satellite (28 mois), nous avons montré que : (1) les paramètres β et λ apparaissent constants dans le temps, (2) les variations spatiales de ces paramètres sont significatives sur le détecteur (régions "rapide" et "lente" couvrant chacune de l'ordre de $\simeq$15% du détecteur).

5 Correction des transitoires par inversion

La correction par ajustement des observations scientifiques n'est généralement pas possible car on n'atteind pratiquement jamais des niveaux stabilisés. Aussi, nous avons mis au point une procédure d'inversion directe du modèle décrit précédemment. Supposons connus J_{n-1}^{fin} et J_{n-1}^{∞} décrivant le système à l'état $n-1$. L'équation non linéaire 2 permet de calculer par inversion J_n^{∞} à partir de la mesure $J_n(t)$. Plusieurs méthodes ont été testées pour inverser cette équation : méthode itérative, développement limité et méthode numérique de Müller (Press et al., 1992).

La méthode itérative consiste à utiliser $J_n(t)$ comme première estimation de J_n^{∞} pour calculer τ. On calcule alors J_n^{∞}, puis on itère. Cette méthode n'est efficace que lorsque le rapport signal sur bruit est très bon et n'est pas utilisable dans la pratique. Le développement limité au deuxième ordre de l'exponentielle donne un polynôme du troisième degré dont il est facile de calculer les racines. Cette approche, très rapide et peu sensible au bruit, n'est efficace que pour des marches de flux limitées ($J_n^{\infty} < 50$ ADU/G/s). La méthode de Müller (beaucoup plus lente) est une méthode numérique itérative de recherche de racines d'équations non-linéaire. Elle donne généralement les meilleurs résultats.

6 Performances et limitations

Pour un éclairement uniforme et dans des conditions stabilisées (observations d'étalonnage), la description du transitoire a une précision de l'ordre de 1% en général. Dans la pratique, pour les observations scientifiques de régions peu contrastées, l'inversion donne une erreur meilleure que 3% pour 90% des pixels.

L'utilisation de notre méthode d'inversion nécessite des précautions puisque (1) le modèle présente un effet de mémoire d'autant plus long que le niveau courant est faible et (2) les données brutes sont corrigées d'un niveau d'obscurité (Biviano et al., 1998). Pour les observations à faible illumination, la précision actuelle sur le niveau d'obscurité n'est pas suffisante pour assurer un traitement automatique fiable des données : des divergences apparaissent pour certains pixels.

Par ailleurs, plusieurs problèmes restent ouverts :

- le modèle de Fouks et Schubert ne permet pas de traiter les sources ponctuelles;
- les données expérimentales peuvent présenter une lente dérive globale d'amplitude relative de l'ordre de quelques pour-cent. Seules des méthodes de correction empirique sont à ce jour proposées (Miville-Deschênes et al., 1999);
- certains pixels ont un transitoire non monotone (oscillations).

7 Problème des forts gradients entre pixels

Le modèle ne décrit pas correctement la réponse des sources ponctuelles intenses ou de régions contrastées (gradient entre pixels supérieur à 50 ADU/G/s). La réponse des sources ponctuelles est caractérisée par un maximum avant stabilisation pour le pixel le plus intense (Fig. 5), d'autant plus pointu et proche du changement d'illumination que cette source est brillante. L'hypothèse généralement avancée pour interpréter ce phénomène est un effet de couplage électrique (*crosstalk*) entre pixels voisins (Vinokurov et al., 1992). Rappelons que les pixels ne sont pas définis physiquement (comme dans une matrice CDD) mais électriquement, par une tension de polarisation appliquée sur une maille carrée à chaque face du détecteur.

Des essais de modélisation ont été faits en ajoutant des termes de couplage à l'équation différentielle du modèle de Fouks et Schubert que nous avons utilisé. En appelant $s(t)$ le signal mesuré à l'instant t et $i(t)$ le signal d'entrée (illumination), cette équation s'écrit :

$$s(t) = \beta\ i(t) + (1-\beta)\ m(t)$$

où $m(t)$ est le terme de mémoire qui vérifie :

$$\frac{dm}{dt} = \lambda\ m\ (m - i). \qquad (3)$$

Nous avons testé le modèle de Désert (1999) qui donne qualitativement des résultats satisfaisants (Fig. 5). Son

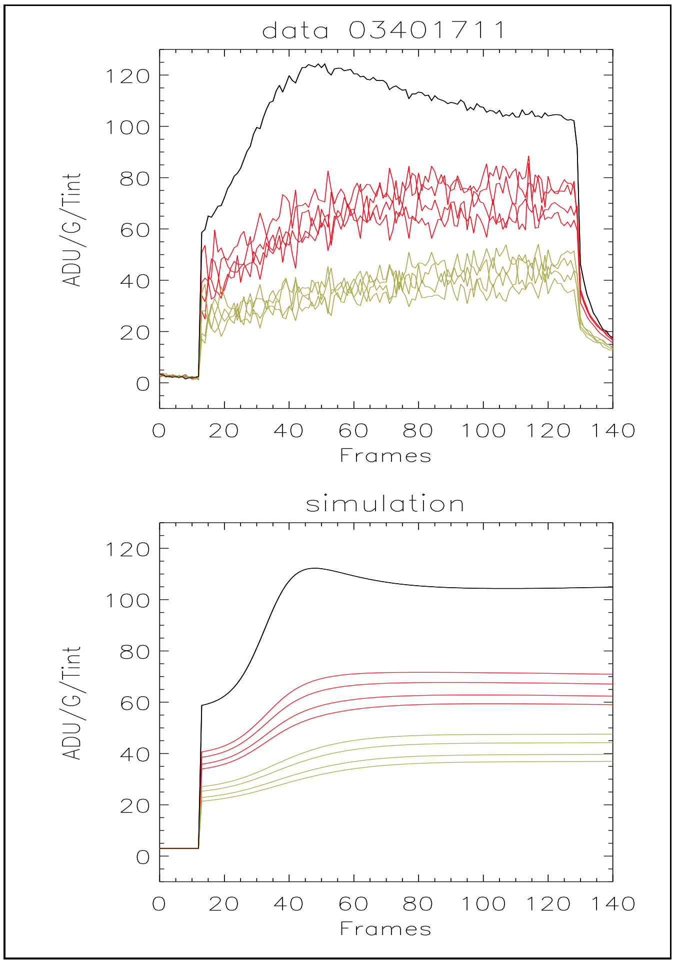

FIG. 5: Sur la figure du haut, exemple de réponse d'une source ponctuelle d'intensité moyenne. Les pixels tracés sont le pixel central (le plus intense) et ses 8 voisins (les 4 plus proches voisins et les 4 pixels diagonaux, les plus faibles). La figure du bas présente un exemple de modélisation basé sur l'équation 4.

principe est de rajouter à l'équation 3 un terme de couplage :

$$\frac{dm}{dt} = \frac{\lambda}{(1+4C)}(m\ (m-i) + C\ m \sum_v (m_v - i_v)), \quad (4)$$

où C est un coefficient de couplage (sans unité), m_v et i_v respectivement la mémoire et le signal d'entrée des pixels voisins. La somme sur v est faite sur les quatre pixels les plus proches. Lorsque l'éclairement est uniforme, on retrouve l'équation 3.

8 Conclusions et Perspectives

La physique des photo-conducteurs infrarouges a été décrite par l'équipe de Fouks (par exemple Vinokurov and Fouks, 1991). Le modèle que nous avons utilisé n'est qu'une des approximations proposées. Il permet de décrire la réponse du détecteur de la voie LW d'ISOCAM avec une précision de l'ordre de 1% (en éclairement peu contrasté). D'autres modèles issus de la même description physique, mais qui font appel à d'autres approximations, sont susceptibles de produire des comportements complexes, par exemple des réponses instantanées en forme d'impulsion ou des oscillations. Ils pourront être utilisés pour comprendre le comportement des autres photo-conducteurs d'ISO, et ceux des futurs instruments d'astronomie infrarouge (par exemple ceux des satellites japonais IRIS et américain SIRTF lancés dans les années qui viennent).

En éclairement peu contrasté, notre méthode récursive (mesure après mesure) permet de corriger les données LW d'ISOCAM avec une précision de quelques pour-cent. Le problème des sources ponctuelles reste à ce jour la principale limitation du détecteur. Notre approche simple et rapide pourra être utilisée pour des modèles semblables. Ceci dit, une méthode utilisant le fait qu'une région du ciel est observée pendant plusieurs poses élémentaires successives (typiquement de 5 à 100) devrait être plus robuste aux phénomènes impulsifs dûs aux impacts de particules cosmiques. Pour chaque position dans le ciel, on ne recherche en fait qu'une seule valeur pertinente. Des algorithmes de ce type devront être utilisés dans les chaînes de traitements des données des missions infrarouges astronomiques.

Remerciements

A. Coulais remercie le CNES pour son support financier. Nous remercions J.-F. Giovanelli et J. Idier du Laboratoire des Signaux et Systèmes (Sup'Elec) pour leur conseil pour la mise au point de méthodes d'inversion.

Références

Abergel, A., Miville-Deschêne, M. A., Désert, F. X., Pérault, M., Aussel, H., and Sauvage, M.: 1999, *accepted in Experimental Astronomy*

Abergel, A. and Pérault, M.: 1994, *Flight model LW channel: noise due to transients*, Technical report, IAS lab.

Biviano, A. et al.: 1998, *The ISOCAM Dark Current Calibration Report*, Technical report, ISOCAM

Cesarsky, C. J. et al.: 1996, *Astron. Astrophys.* **315**, L32

Désert, F.-X.: 1999, *A modified IAS model for ISOCAM LW transient correction*, Technical report, LAOG, Version 2.0

Fouks, B. I. and Schubert, J.: 1995, *proc. SPIE* **2475**, 487

Kessler, M. F. et al.: 1996, *Astron. Astrophys.* **315**, L27

Miville-Deschênes, M.-A., Boulanger, F., Abergel, A., and Bernard, J.-P.: 1999, *Original data processing for ISOCAM raster imaging of extended emission*, accepted in A&A

Press, W., Teukolsky, S., Vetterling, W., and Flannery, B.: 1992, *Numerical Recipes in* `FORTRAN`, *second edition*, Cambridge University Press

Vinokurov, L. A. and Fouks, B. I.: 1991, *Sov. Phys. Semicond.* **25(11)**, 1207

Vinokurov, L. A., Zaletaev, N. B., Kocherov, V. F., and Fouks, B. I.: 1992, *Sov. Phys. Semicond.* **26(4)**, 433