

Inversion de données infrarouges issues du télescope SPITZER

Thomas RODET¹ Alain ABERGEL² Hervé DOLE² Alain COULAIS³

¹Laboratoire des Signaux et Systèmes (L2S) Supélec, Plateau de Moulon, 3 rue Joliot Curie, 91192 Gif-sur-Yvette, France

²Institut d'Astrophysique Spatiale (IAS) - UMR-8617 (CNRS-UPS) Université Paris-Sud, Bâtiment 121, 91405 Orsay, France

³Laboratoire d'Étude du Rayonnement de la Matière en Astrophysique (LERMA)

Observatoire de Paris, 61 Avenue de l'Observatoire, 75014 Paris, France

Thomas.rodet@lss.supelec.fr, Alain.Abergel@ias.u-psud.fr, Hervé.Dole@ias.u-psud.fr,
Alain.Coulais@obspm.fr

Résumé – Nous nous intéressons dans ce papier à l'inversion de données infrarouges issues du télescope spatial SPITZER avec l'imagerie MIPS à 160 microns. Le principal problème rencontré est la perturbation des mesures sur le ciel par le dépôt d'énergie des rayons cosmiques dans le détecteur. Ces particules de haute énergie peuvent modifier temporairement les gains des capteurs en altérant la structure du semi-conducteur. Nous avons donc développé un algorithme d'estimation conjointe du gain et de l'image infrarouge du ciel. Cet algorithme repose sur la minimisation d'un critère par une approche de type gradient conjugué.

Abstract – This paper deals with the reconstruction of infrared data. The data were measured by NASA's SPITZER Space Telescope. The main problem comes from high energy particles "glitches". These particles disturb the data, and modify temporarily the detector gain. To solve this issue, we estimate jointly the infrared sky and the detector gain in our algorithm. It is based on a criteria minimization. This minimization is the same as an approach of conjugate gradient.

1 Introduction

Le rayonnement infrarouge de l'univers est très intéressant pour les astrophysiciens car non seulement il trace les milieux froids (et habituellement opaques au rayonnement visible) tels que les régions de formation stellaire, les disques autour des étoiles, ou les galaxies contenant beaucoup de poussières, mais aussi il permet d'accéder au spectre d'émission de certains espèces chimiques (molécule H₂ par exemple). Malheureusement, ce rayonnement est essentiellement absorbé par l'atmosphère. Dans ce contexte, l'observatoire spatial SPITZER [1] de la NASA a été lancé 25 août 2003. Ce satellite est composé de trois instruments (IRAC, IRS, MIPS). Nous nous intéresserons ici uniquement au détecteur 160 μm de l'instrument MIPS (Multi-band Imaging Photometer for SPITZER [2]). Comme l'instrument n'est pas protégé par l'atmosphère terrestre, les mesures sont entachées d'un bruit impulsionnel occasionné par les particules hautes énergies que nous appellerons "glitches". La présence en grand nombre de ces "glitches" altère un nombre significatif de données. De plus, le détecteur 160 μm est composé de capteurs en **Ge:Ga** qui ont un comportement non linéaire dissymétrique [3, 4]. Ces difficultés ont poussé les astrophysiciens à collaborer avec des chercheurs en traitement du signal pour l'aspect inversion et des spécialistes des semi-conducteurs pour comprendre le détecteur [5].

2 Principe de formation des mesures (problème direct)

Le principe des acquisitions est résumé sur la figure 1.

Conversion photons signal : Le capteur de photons infrarouges est composé de **Ge:Ga** contraint. Ce semi-conducteur est entouré de deux électrodes et il convertit les photons infrarouges en charges électriques. Le mode de lecture des charges est spécifique à ce satellite : on observe la même zone du ciel, durant un temps t_{obs} . Dans ce laps de temps, on effectue plusieurs lectures (de 16 à 40) des charges qui s'accumulent sur les électrodes. Avant de mesurer une autre partie du ciel, on vide les charges présentes sur les électrodes. Les flux incidents sont estimés au sol à partir des courbes d'évolution des charges (points représentés à droite de la figure 1).

Matrice de capteurs : Le détecteur est composé d'une matrice de 20×2 capteurs physiquement indépendants. Ils ont donc des propriétés de détection propre (gain, bruit, etc...).

Acquisition de l'image par vignettage : Comme la matrice de capteurs est relativement petite, les images du ciel sont obtenues par vignettage. Le télescope observe dans une certaine direction pendant le temps d'intégration, puis il se déplace légèrement afin de couvrir une zone voisine du ciel (voir figure 2).

Problèmes dus aux particules hautes énergies : Les "glitches" introduisent un flux intense pendant un temps inférieur à notre période d'échantillonnage. Ces "glitches" peuvent être supprimés grâce aux nombreuses mesures de l'évolution de la charge au cours du temps. Par contre, dans certains cas, les "glitches" entraînent la perte de la donnée à cause de la saturation des capteurs. Ils peuvent aussi modifier temporairement les gains des capteurs en altérant la structure du semi-conducteur.

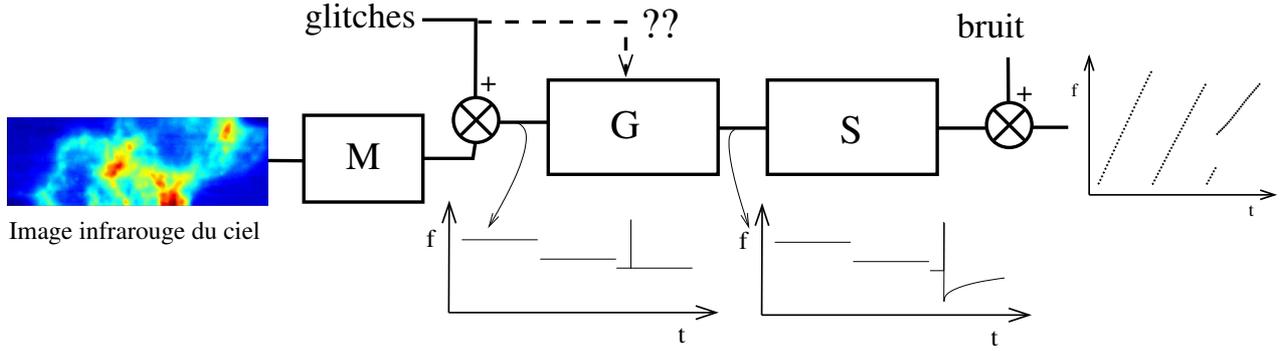


FIG. 1: Schéma d'acquisition des données : M correspond à l'opérateur de découpage de l'image en petites vignettes 20×2 , g à l'opérateur inconnu modifiant le gain des capteurs, G au gain détecteur et S à l'opérateur d'intégration des charges au cours du temps.

De plus, nous ne savons pas modéliser de façon physique les variations de gain car il y a trop de paramètres qui interviennent (type de particules, profondeur d'interaction etc...). Nous allons donc estimer le gain conjointement à l'image en ayant une approche similaire à [6].

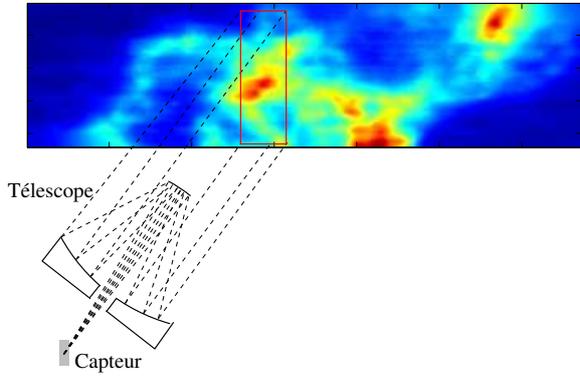


FIG. 2: Schéma de principe de l'acquisition des données par vignettage.

Acquisition Redondante : Afin de limiter l'effet des données manquantes, une procédure de balayage du ciel de manière redondante est mise en œuvre. Le facteur de redondance est compris entre 1 et 2 dans la plupart des données, afin de limiter le coût en terme de temps d'observation.

Modélisation du problème direct. Le problème direct peut se formaliser de la façon suivante :

Soient x la carte du ciel à reconstruire et y les données correspondant à l'évolution de la charge sur les électrodes du capteur au cours du temps. Comme le gain des capteurs peut varier, on le modélise par un vecteur d'inconnue g . Enfin on considère que l'on est en présence d'un bruit additif gaussien b . On a :

$$y = S \text{diag}(g) M x + b \quad (1)$$

Pour simplifier la mise en œuvre de notre approche, nous avons développé un algorithme qui estime le flux incident sur le détecteur à partir des données reçues et qui élimine les "glitches", mais pas leurs effets sur le gain détecteur. Nous réécrivons le problème direct en considérant que nos données y correspondent aux flux incidents sur le détecteur:

$$y = \text{diag}(g) M x + b \quad (2)$$

3 Inversion

La difficulté de l'inversion de ce problème réside l'estimation conjointe du gain et de l'image. En effet, ce problème est non linéaire, nous allons essayer de le résoudre en introduisant de l'information *a priori*.

Introduction d'informations *a priori*. Dans cette application, le télescope observe des Cirrus (nuages de poussières interstellaires), nous savons donc que les images que l'on cherche sont principalement composées des zones relativement lisses. En ce qui concerne le gain des capteurs nous savons qu'ils sont indépendants d'un capteur à l'autre. De plus, le gain varie à la suite d'une collision avec une particule haute énergie. Nous pouvons donc supposer que la variation du gain est lente sauf aux instants z où il y a un "glitch" car il est susceptible de varier brusquement. De plus, nous possédons une première estimation du gain par une méthode de calibrage en vol, la valeur du gain que nous cherchons est donc proche de 1. Cet *a priori* va nous permettre de lever partiellement les indéterminations de notre problème.

Définition du critère. Comme nous supposons que nos mesures se décrivent par des variables aléatoires gaussiennes et que nous introduisons des *a priori* gaussiens, la solution du maximum *a posteriori* est équivalente à la minimisation du critère suivant :

$$J(x, g) = \|y - \text{diag}(g) M x\|^2 + \mu \|D_s x\|^2 + \sigma \|D_{g/z} g\|^2 + \beta \|g - 1\|^2 \quad (3)$$

où D_s est la matrice des dérivées spatiales, et $D_{g/z}$ est la matrice des dérivées temporelles du gain calculé uniquement aux instants où il n'y a pas eu de "glitches". Dans l'équation (3), μ , σ et β sont des hyper-paramètres fixant le compromis entre l'attache aux données et les *a priori* introduits. Pour imposer la forte régularité temporelle du gain, nous prenons: $\sigma \gg \mu$.

4 Optimisation

Le but de cette optimisation est d'estimer de manière conjointe le flux \hat{x} et le gain détecteur \hat{g} .

$$(\hat{x}, \hat{g}) = \arg \min_{x, g} J(x, g)$$

Bien que $J(x, g)$ ne soit pas toujours convexe, nous avons décidé d'utiliser une méthode de descente pour obtenir nos estimateurs. Cette technique donne de bons résultats dans notre

cas car le critère est localement convexe. De plus, dans la plupart des cas nous pouvons initialiser l'algorithme assez près du minimum, et l'introduction d'*a priori* quadratiques tend à rendre le critère convexe. L'intérêt des techniques de descente est, qu'en générale, elles sont moins coûteuses en ressources de calculs.

Définissons le gradient conjoint :

$$\nabla J = \frac{\partial J(\mathbf{x}, \mathbf{g})}{\partial \begin{pmatrix} \mathbf{x} \\ \mathbf{g} \end{pmatrix}} = \begin{pmatrix} \frac{\partial J}{\partial \mathbf{x}} \\ \frac{\partial J}{\partial \mathbf{g}} \end{pmatrix} \quad (4)$$

Direction de descente défini par la méthode du gradient conjugué (voir [7, 8]) :

La méthode du gradient conjugué vise à construire une suite de directions de descente conjuguées, c'est à dire orthogonales dans la métrique associée au hessien du critère. Pour déterminer, la suite de direction de descente nous utilisons la formule de Polak et Ribière [9].

Soit \mathbf{d}_k la direction de descente à l'étape k :

$$\mathbf{d}_k = \begin{cases} -\nabla J_1 & \text{si } k = 1 \\ -\nabla J_k + \gamma_k \mathbf{d}_k & \text{si } k \geq 2 \end{cases} \quad (5)$$

avec

$$\gamma_k = \frac{\langle \nabla J_{k-1} - \nabla J_k, -\nabla J_k \rangle}{\|\nabla J_{k-1}\|^2}$$

L'algorithme de minimisation est itératif, l'étape de mise à jour est la suivante :

$$\begin{pmatrix} \mathbf{x}^{k+1} \\ \mathbf{g}^{k+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{x}^k \\ \mathbf{g}^k \end{pmatrix} + \alpha \mathbf{d}^k \quad (6)$$

Détermination du pas optimum de descente α_{opt} :

$$\alpha_{opt} = \arg \min_{\alpha} J \left(\begin{pmatrix} \mathbf{x}^k \\ \mathbf{g}^k \end{pmatrix} + \alpha \mathbf{d}_k \right) \quad (7)$$

La fonction $\phi(\alpha) = J \left(\begin{pmatrix} \mathbf{x}^k \\ \mathbf{g}^k \end{pmatrix} + \alpha \mathbf{d}_k \right)$ possède trois extréma, dont deux minima. Nous obtenons les extréma en déterminant les racines de $\frac{d\phi}{d\alpha}$.

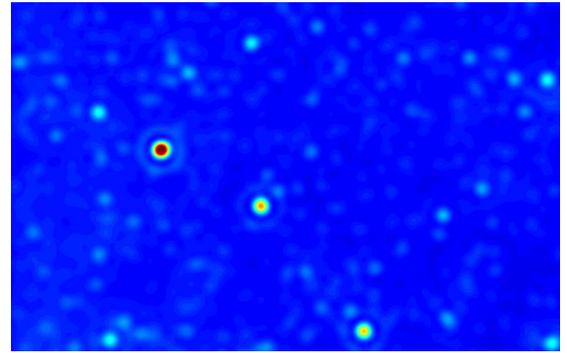
5 Résultats

Nous présentons dans cette partie les résultats préliminaires de notre approche sur des données simulées et sur des données réelles.

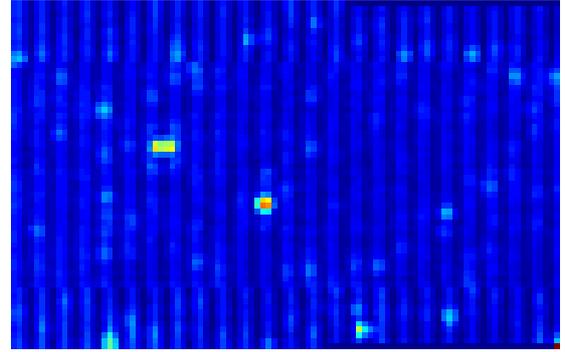
5.1 Étude sur des données simulées

Procédure de simulation : Nous avons simulé une carte du ciel infrarouge à 160 microns possédant les mêmes propriétés statistiques que le ciel observé (densité de galaxies, spectre de puissance de l'émission diffuse [10]). Nous avons convolué cette image avec la réponse impulsionnelle du télescope, le résultat est illustré sur la figure 3(a). Nous avons ensuite simulé l'acquisition de l'image en vignettes. Nous avons arbitrairement divisé par 2.5 les valeurs des gains des pixels détecteurs de la moitié du capteur. Cette modification nous permet de simuler partiellement les oscillations causées par les "glitches" (voir figure 3 (b)).

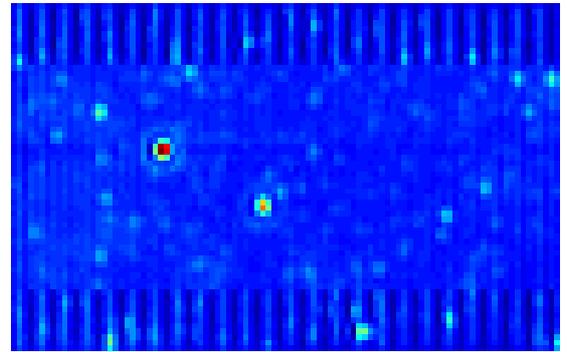
Analyse des résultats : La reconstruction obtenue avec la méthode actuellement utilisée par le Spitzer Science Center (NASA) [11], considère que le gain est correctement estimé lors de l'étape de calibration. Cette hypothèse n'étant pas vérifiée, nous voyons des oscillations apparaître sur l'image (voir figure 3(b)). L'estimation conjointe du gain permet de s'affranchir de ce problème, comme nous le voyons dans la partie centrale de la figure 3(c). Nous observons que les oscillations persistent sur le haut et le bas de l'image. Dans les parties haute et basse de l'image nous ne possédons pas de données redondantes, les données ne permettent donc pas d'estimer correctement le gain. Nous aurions pu compenser ce manque d'information par une augmentation de l'*a priori* de douceur de l'image. Nous ne l'avons pas fait pour ne pas dégrader la résolution au centre de l'image.



(a)



(b)



(c)

FIG. 3: (a) Image de référence sur-échantillonnée qui nous a permis de générer les données (b) Reconstruction avec l'algorithme officiel délivré par [11] (pas d'estimation du gain) (c) Reconstruction par estimation conjointe de l'image et des gains détecteur.

5.2 Application aux données réelles

La figure 4 représente une partie d'un Cirrus observée à la longueur d'onde $160 \mu\text{m}$ par le télescope SPITZER. Ces données nous ont été fournies dans le cadre d'une collaboration avec l'IAS et le Steward Observatory in the University of Arizona. Sur la figure 4 (a), le ciel est reconstruit sans estimer le gain, ni connaissances *a priori* (La méthode de traitement des données est décrite dans [11]). Nous observons dans cette image trois types de défauts :

- Des trous apparaissent sur l'image (petits rectangles bleu foncés sur la figure 4 (a)), car une série de 5 pixels détecteurs voisins sont défectueux.
- Certains pixels ont des valeurs aberrantes (les points rouges de la figure 4 (a)).
- Des oscillations sont présentes sur l'image. Elles sont causées par certains "glitches" qui modifient le gain du pixel détecteur.

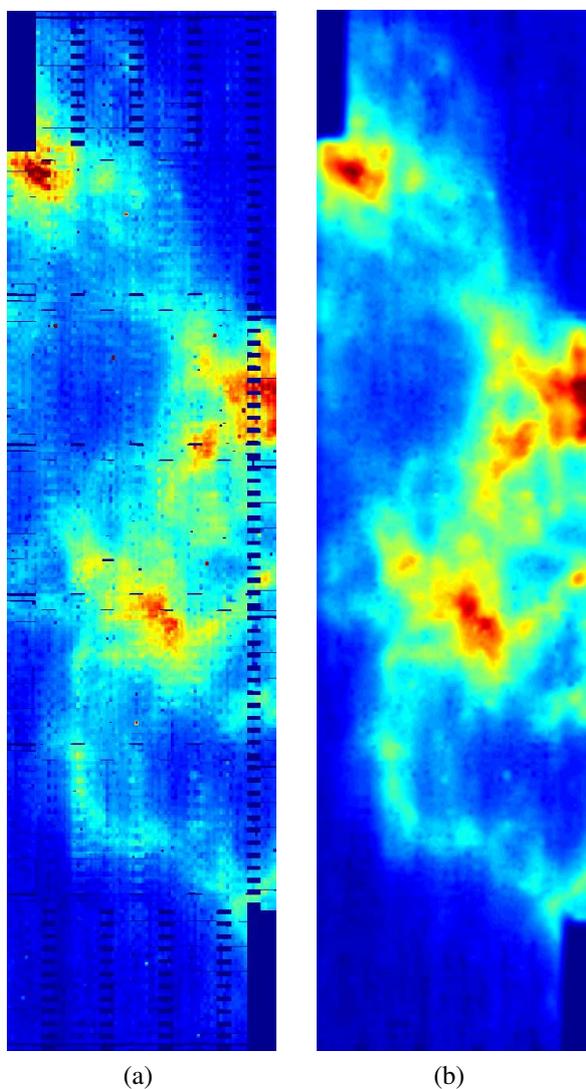


FIG. 4: Reconstruction du Cirrus ECO observé par l'instrument MIPS $160 \mu\text{m}$ du satellite SPITZER: (a) reconstruction avec l'algorithme officiel délivré par [11], (b) estimation conjointe du flux et du gain en utilisant un algorithme de descente dans les directions du gradient conjugué.

Pour résoudre ces différents problèmes nous avons construit le critère de l'équation (3). L'*a priori* de douceur sur l'image nous permet d'estimer la valeur du flux présente dans les trous. L'estimation du gain associé à ces *a priori* nous permet d'éliminer les oscillations comme nous l'avons illustré dans la partie 5.1. Enfin, les pixels aberrants ont été supprimés en améliorant l'algorithme de détermination du flux à partir des données brutes. En minimisant conjointement le critère de l'équation (3), nous obtenons l'image de la figure 4 (b). On peut en conclure qu'en tirant mieux partie de la redondance des données nous pouvons augmenter la qualité des images reconstruites.

6 Conclusion

Nous avons développé un algorithme d'estimation conjointe de l'image infrarouge du ciel et du gain détecteur. Cet algorithme repose sur la minimisation d'un critère par la méthode du gradient conjugué. Les premiers résultats sur les données simulées et sur les données réelles sont encourageants. Nous validerons notre approche sur un ensemble de données tests dans l'objectif de fournir cette approche à la communauté des astrophysiciens.

Références

- [1] M. Werner *et al.*, « The spitzer space telescope mission », *ApJS*, vol. 154, pp. 1, 2004.
- [2] G. H. Rieke *et al.*, « The multiband imaging photometer for spitzer », *ApJS*, vol. 154, pp. 25, 2004.
- [3] A. Coulais, F. Balleux, A. Abergel, J.-F. Giovannelli et J. See, « Correction par bloc des transitoires de la caméra infrarouge ISOPHOT C-100 avec un modèle non linéaire dissymétrique », in *Actes 18^e coll. GRETSI*, Toulouse, septembre 2001.
- [4] A. Coulais, J. Malaizé, J.-F. Giovannelli, T. Rodet, A. Abergel, B. Wells, P. Patrashin, H. Kaneda et B. Fouks, « Non-linear transient models and transient corrections methods for ir low-background photo-detectors », in *ADASS-13*, Strasbourg, octobre 2003.
- [5] B. I. Fouks, « Nonstationary behaviour of low background photon detectors », in *ESA SP-356 Photon Detectors for Space Instrumentation*, décembre 1992, pp. 167–174.
- [6] H. Carfantan et J. Idier, « Auto-calibration des barrettes CCD en imagerie satellite par une méthode bayésienne », Toulouse, avril 2001, CNES-CCT.
- [7] J. Nocedal et S. J. Wright, *Numerical Optimization*, Series in Operations Research. Springer Verlag, New York, 2000.
- [8] J. C. Gilbert, *Optimisation Différentiable: Théorie et Algorithmes*, Notes de cours. INRIA, Rocquencourt, 1999.
- [9] E. Polak, *Computational methods in optimization*, Academic Press, New York, NY, USA, 1971.
- [10] H. Dole, G. Lagache et J.-L. Puget, « Predictions for Cosmological Infrared Surveys from Space with the Multiband Imaging Photometer for SIRTf (MIPS) », *ApJ*, pp. 585–617, 2003.
- [11] K. D. Gordon *et al.*, « Reduction algorithms for the multiband imaging photometer for spitzer », *PASP*, p. 503, mai 2005.