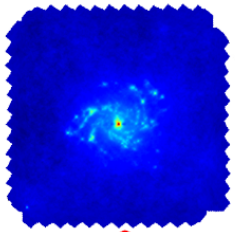
Problèmes inverses en imagerie et spectroscopie.

SF2A, Nice, 5 juin 2012

Pierre Chanial



?

Télescope

?

Bolomètres

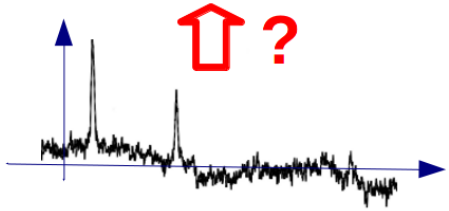
?

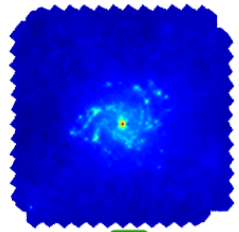
Électronique

?

Compression

?



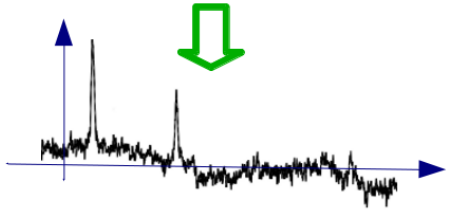


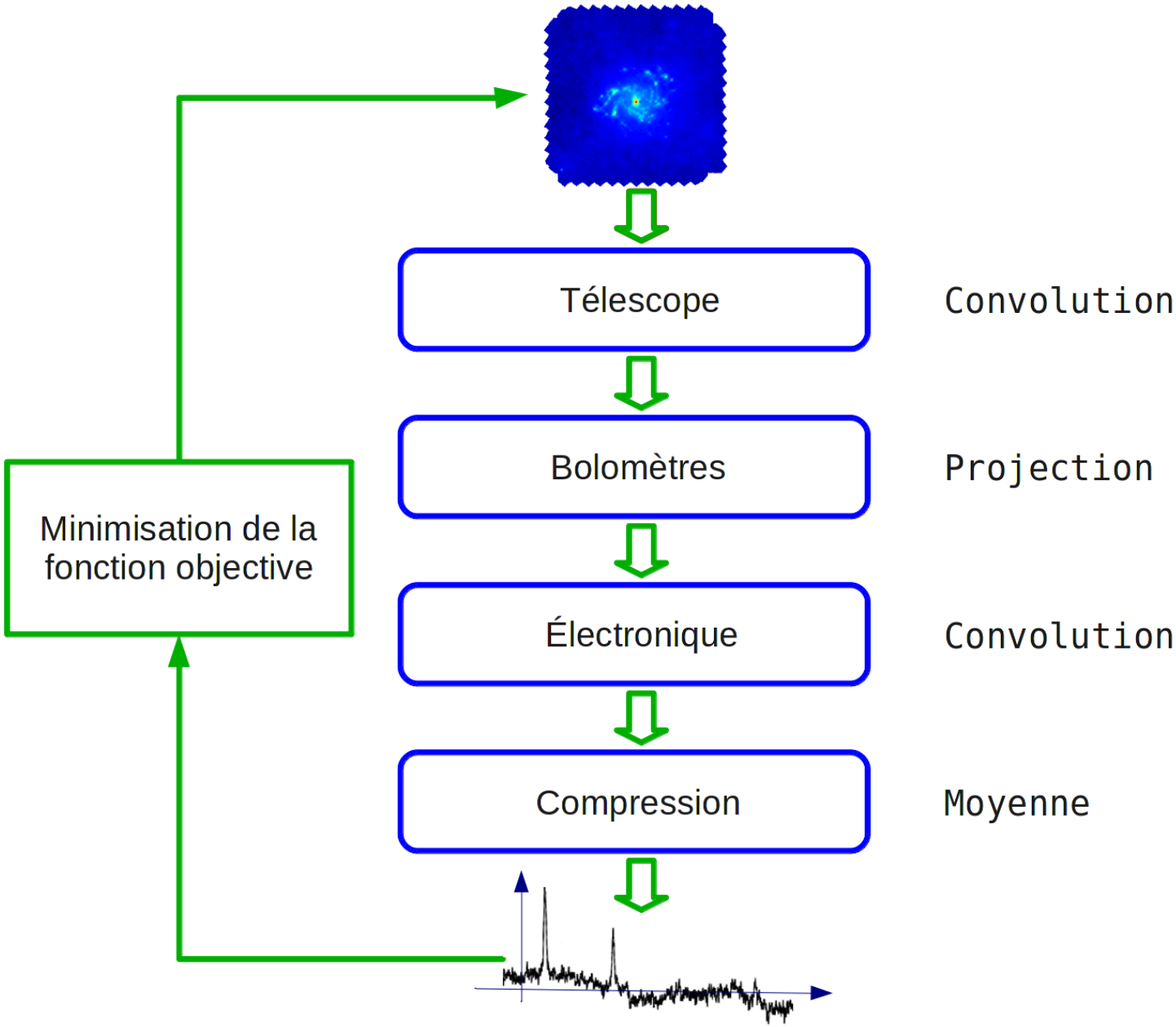
Télescope — Convolution

Bolomètres — Projection

Électronique — Convolution

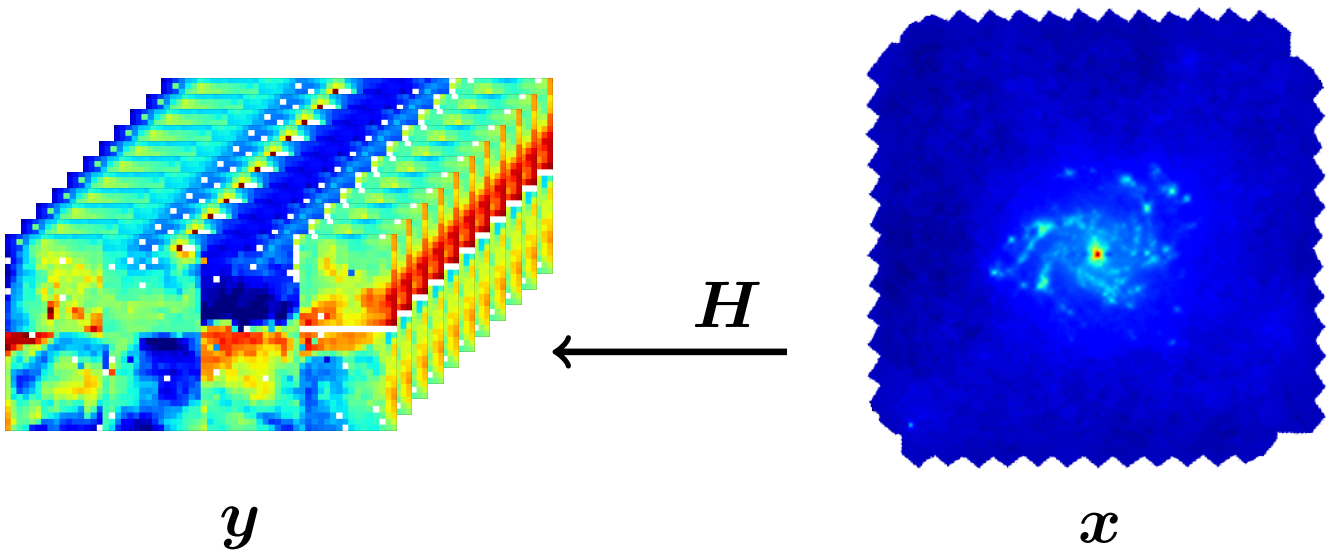
Compression — Moyenne




Télescope
Convolution
Bolomètres
Projection
Électronique
Convolution
Compression
Moyenne
Minimisation de la fonction objective

Toute science observationnelle doit résoudre un problème inverse

$$\boldsymbol{y} = \boldsymbol{H}\boldsymbol{x} + \boldsymbol{n}, \quad \boldsymbol{n} \sim \mathcal{N}(\boldsymbol{0}, \boldsymbol{N})$$



$$\hat{\boldsymbol{x}} = \arg\min_{\boldsymbol{x}} \left\{ ||\boldsymbol{y} - \boldsymbol{H}\boldsymbol{x}||^2_{\boldsymbol{N}^{-1}} + \Psi(\boldsymbol{x}) \right\}$$

$\Rightarrow$ le modèle d'acquisition $\boldsymbol{H}$ doit être très rapide

Projet Tamasis/PACS

- Financé par ASTRONET: outils d'imagerie avancée
- Généricité et modularité : décomposition d'un modèle d'acquisition en opérateurs linéaires ou non-linéaires

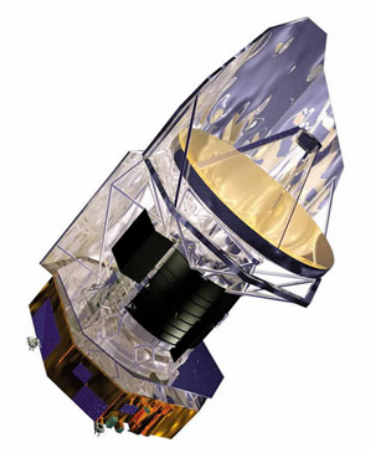
$\Rightarrow$ souplesse : le modèle d'acquisition est un simulateur et il est possible de sélectionner quels effets étudier

- Facilité d'utilisation : Python
- Rapidité : Fortran / librairies externes dédiées (BLAS, FFTW)
- Scalabilité : MPI (Message Passing Interface) et OpenMP
- Solveur : famille des Gradients Conjugués Préconditionnés
- 44000 lignes de code (dont 8100 de tests unitaires)

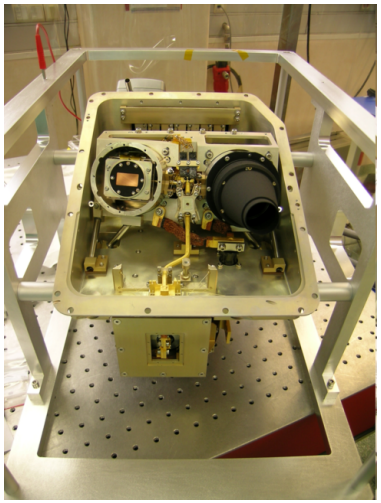
$\Rightarrow$ Module Herschel/PACS

$\Rightarrow$ Tamasis selectionné pour le simulateur *JWST*/MIRIM

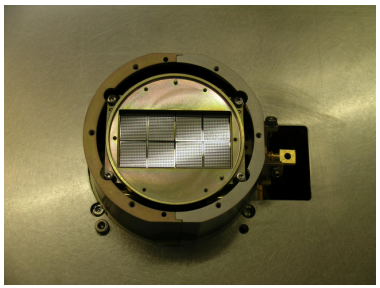
Exemple 1 : Photomètre *Herschel*/PACS



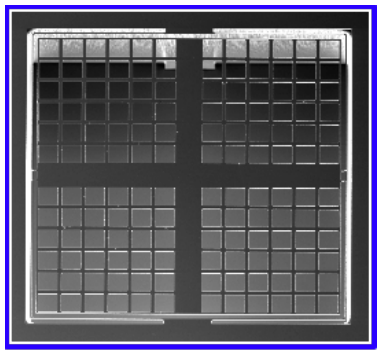
Miroir 3,5m



PACS $\approx$ 30 cm



matrix $= 1,5$cm

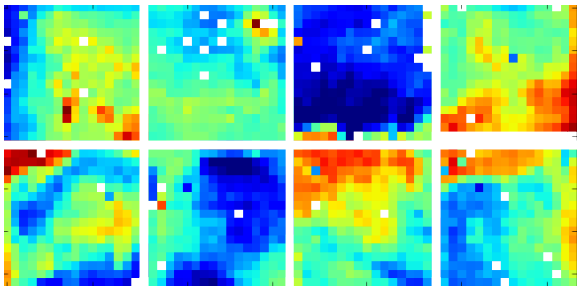


pixel $= 750\mu$m

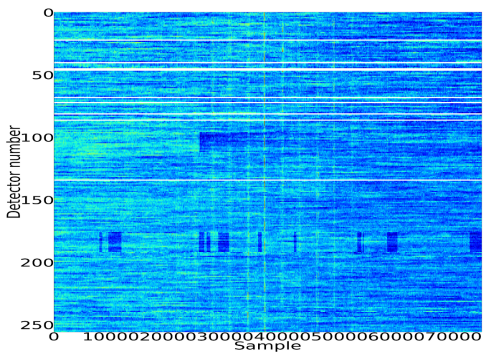
- **Mission:** formation stellaire, galactique, astrochimie
- **Technologie:** tableaux de bolomètres multiplexés, cryogénie 300 mK.
- **Tableaux:** 16×32, 32×64 pixels
- **Échantillonage:** 40 Hz
- **Filtres:** (μm) bleu: 60–85, vert: 85–130, rouge: 130–210
- **Résolution:** blue: 5.5", green: 6.7", red: 11"

Exemple 1 : Artéfacts PACS

- **Champ plat**



- **Glitches courts et longs**

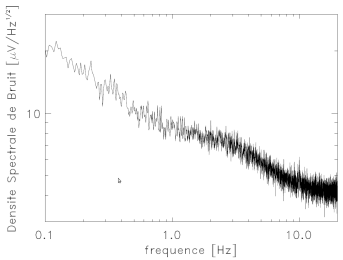


- **Compression avec perte**

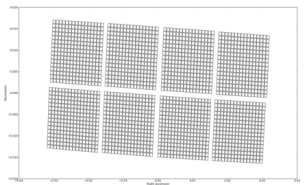


- **Réponse des bolomètres et de l'électronique**

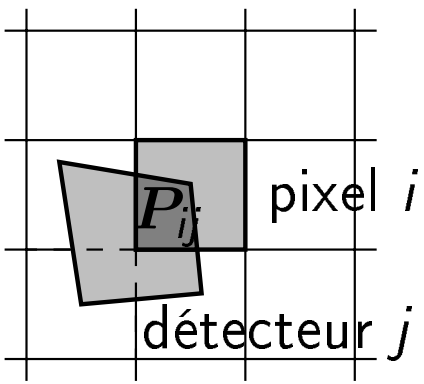
- **Bruit en 1/f**



- **Distortion**



- **Projection**



Exemple 1 : Photomètre *Herschel*/PACS

Modèle d'acquisition :

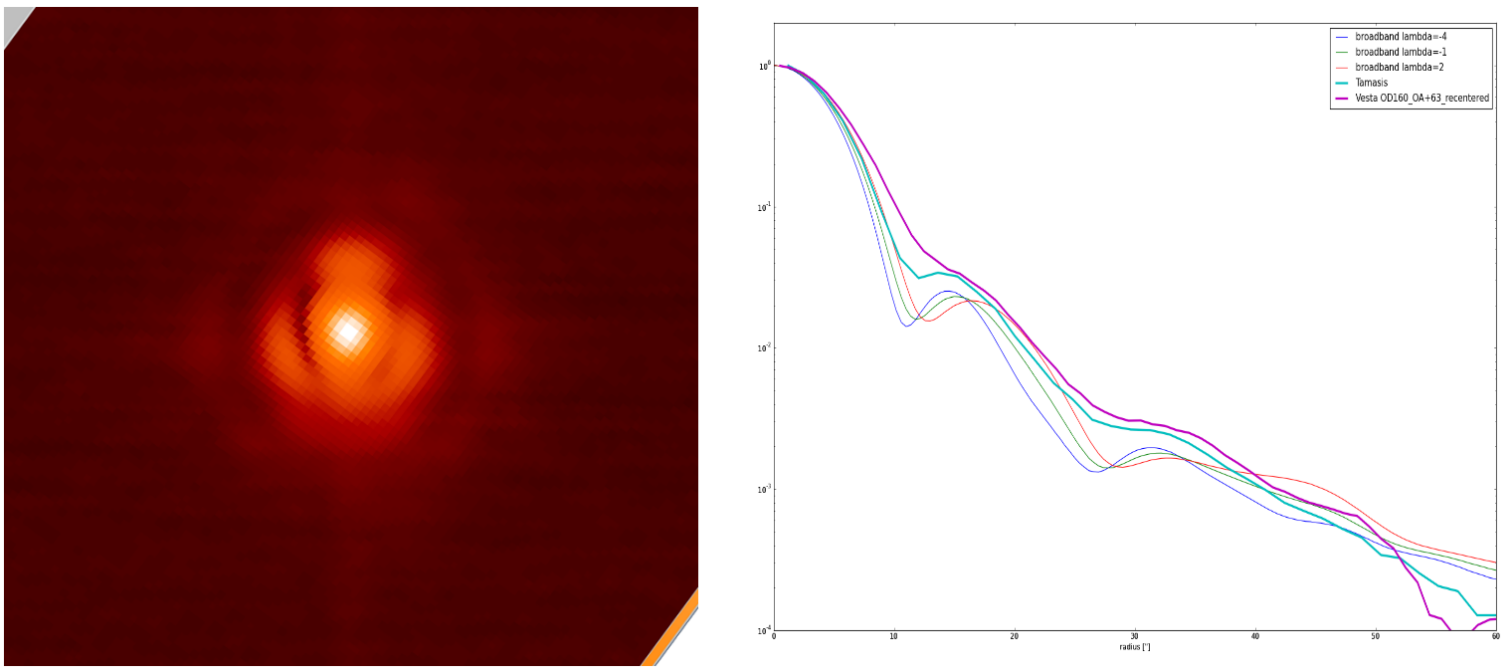
```
H = MaskOperator(mask_glitch) *
    DiagonalOperator(flatfield, broadcast='rightward') *
    CompressionAverageOperator(compression_factor) *
    ConvolutionTruncatedOperator(...) *
    ProjectionOperator(...)
```

Fonction objective :

$$J(x) = \underbrace{||Hx - y||^2_{N-1}}_{\substack{\text{vraisemblance} \\ \text{attache aux données}}} + \underbrace{\lambda \left(||D_x(x)||^2 + ||D_y(x)||^2 \right)}_{\substack{\text{A priori de douceur sur la carte} \\ \text{Gradient suivant les lignes et les colonnes}}}$$

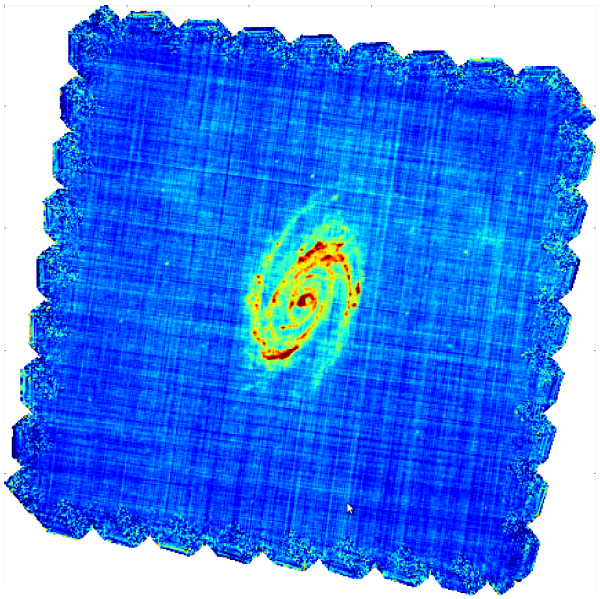
Algorithme : gradient conjugué

Reconstruction des hautes fréquences spatiales

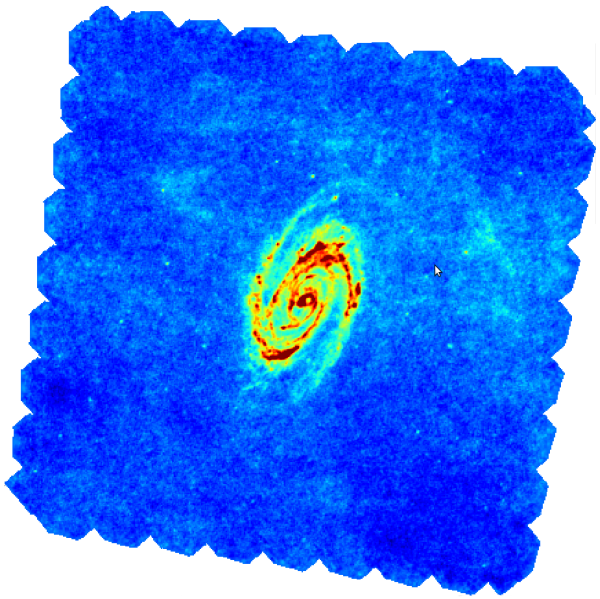


PSF du canal rouge de PACS

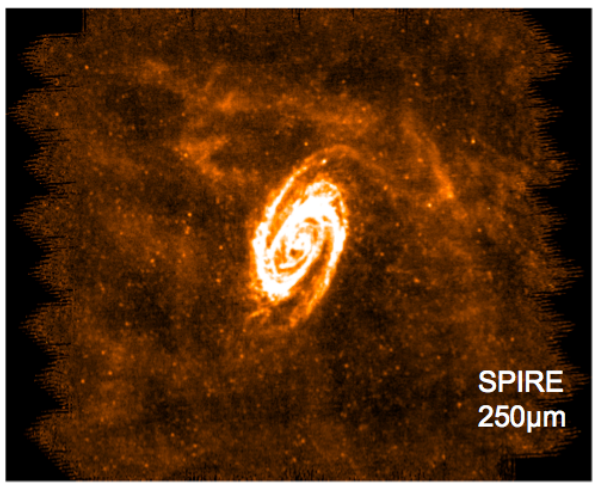
Reconstruction des basses fréquences spatiales



"Pipeline"

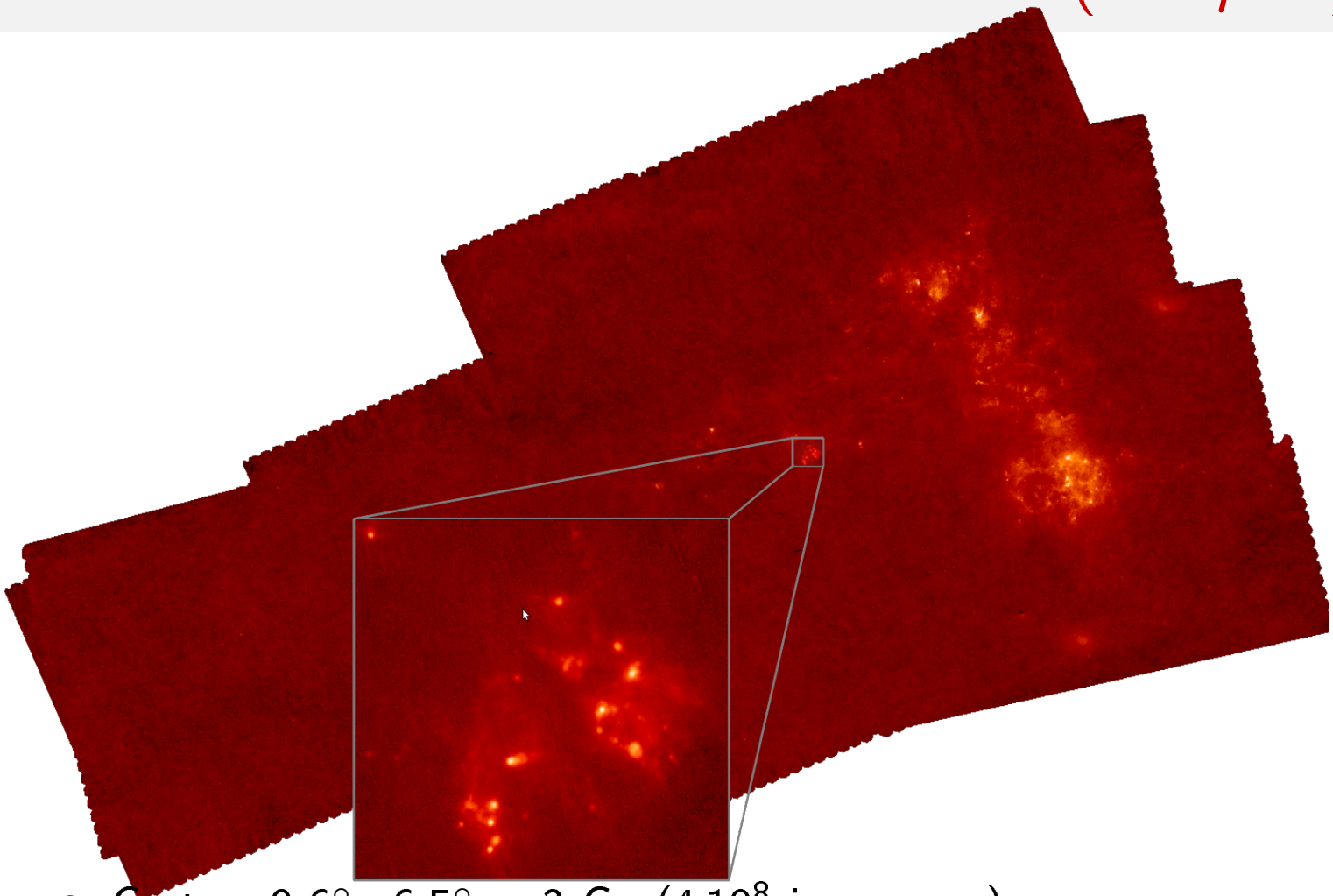


Tamasis RLS



- Suppression des artéfacts
- Les structures sont réelles

Données volumineuses PNM (100μm)



- Carte : $9{,}6° \times 6{,}5° \approx 3$ Go ($4\,10^8$ inconnues)
- TOD : 69h, 2048 détecteurs$\times 1.3\,10^6$ lectures $= 2.6\ 10^9$ échantillons
- Matrice de pointage : 2.4 To (1 détecteur intersecte 10 pix. de ciel)
- Hardware : CCRT/Titane, 2048 cœurs, 256 processeurs, 1h12.

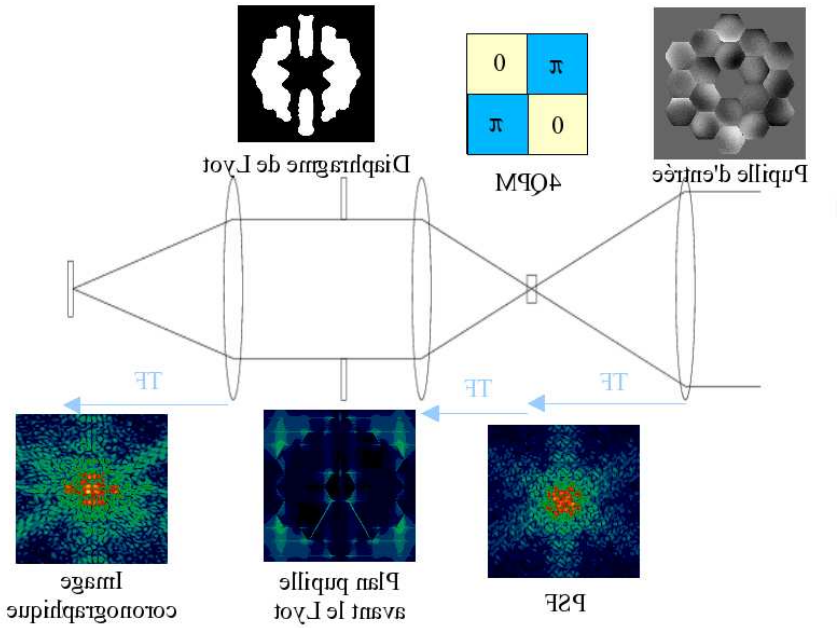
Optimisations

- calculs préparatoires avant les itérations
- règles de simplifications algébriques
- gestionnaire de mémoire (pile) : aucune création de tableau pendant les itérations
- algorithme pour minimiser le nombre de variables temporaires lors de la composition et de l'addition
- opérateurs in-situ/ex-situ
- possibilité de réduction in-situ
- partition par bloc : crucial pour tirer profit du cache

$\Rightarrow$ gain $\times$180 (pipeline standard PACS, Java)

$\Rightarrow$ gain $\times$2,4 (MADmap v1, C pur, scalaire)

Exemple 2 : Coronographe *JWST*/MIRIM

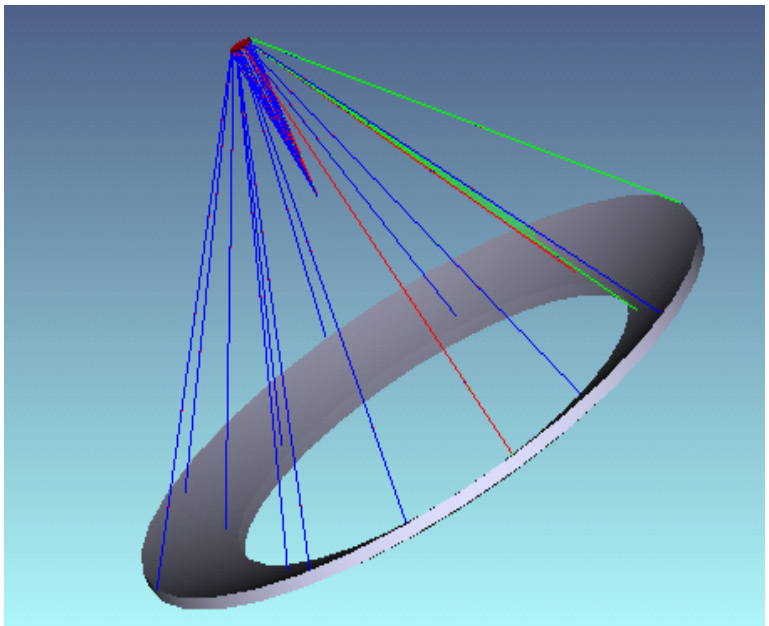


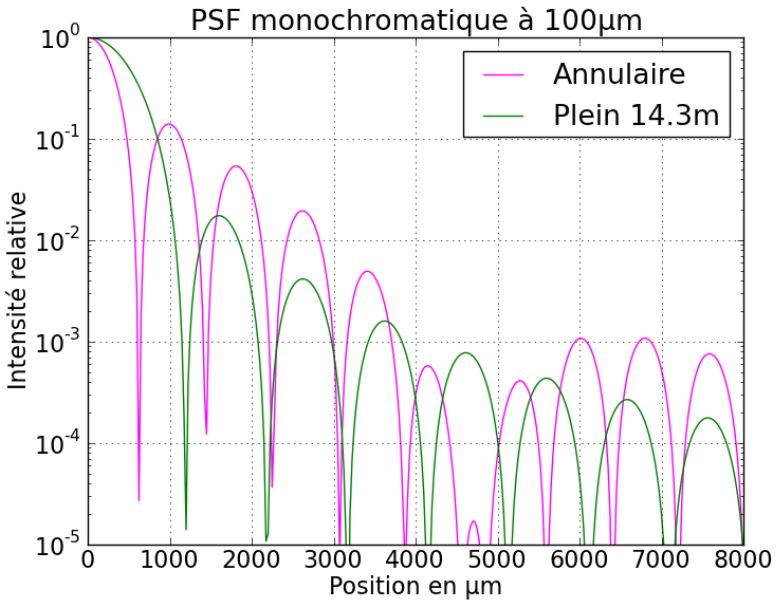

```
fft = FftOperator((1024,1024))
phasemask = DiagonalOperator(...)
lyot = DiagonalOperator(...)
shift = RollOperator((512,512))

H = shift * fft * lyot * fft * phasemask * fft

sky = aperture_circular((1024,1024), diameter=100)
output = H(sky)
```

Exemple 3 : Télescope annulaire





- Hybride imageur / interféromètre
- Diamètre extérieur : 20m, intérieur : 14m
- Gain en résolution : 2×, par rapport à un primaire plein
- Perte en SNR : 3×

Exemple 3 : Télescope annulaire

Modèle d'acquisition :

```
H = ProjectionOperator(...) * ConvolutionOperator(...)
```

Fonction objective :

$$J(x) = \underbrace{||Hx - y||^2_{N^{-1}}}_{\substack{\text{vraisemblance} \\ \text{attache aux données} \\ \text{continue, différentiable}}} + \underbrace{\iota_C(x)}_{\substack{\text{indicatrice sur le convexe } C = [0, +\infty[\\ \text{contrainte de positivité} \\ \text{non-continue, non-différentiable}}}$$

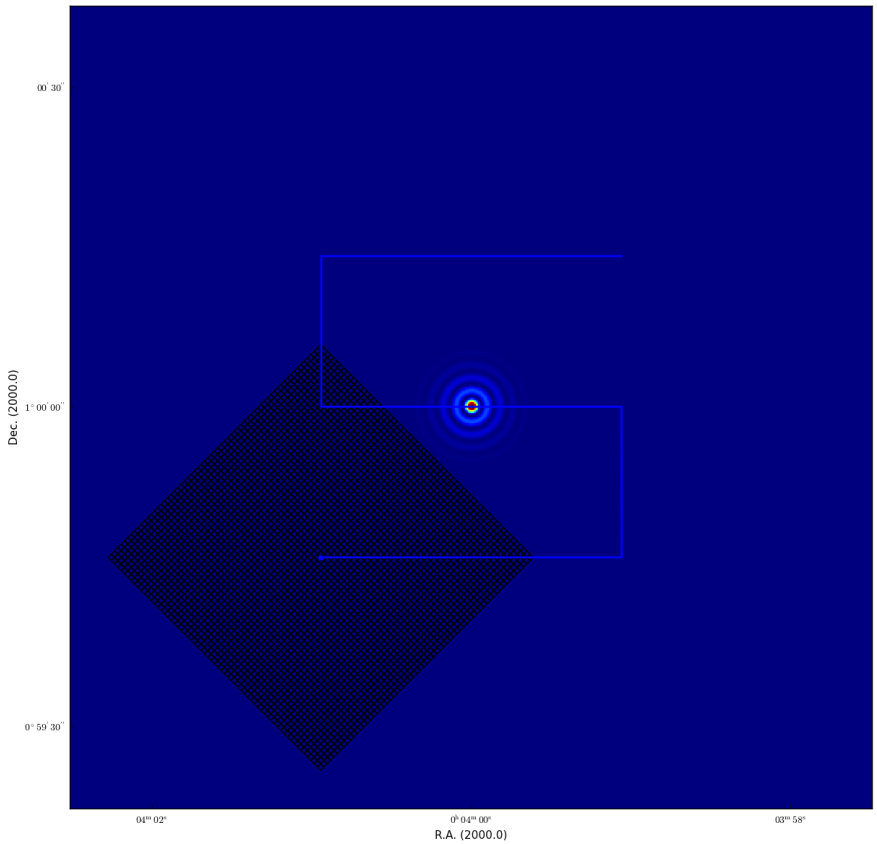
Algorithme : gradient proximal de Beck-Teboulle (FISTA)

- fait appel à l'opérateur proximal du terme non-différentiable

$$\text{prox}_f(x) = \underset{y \in \mathbb{R}^N}{\arg\min} \left\{ f(y) + \frac{1}{2}||x - y||^2 \right\}$$

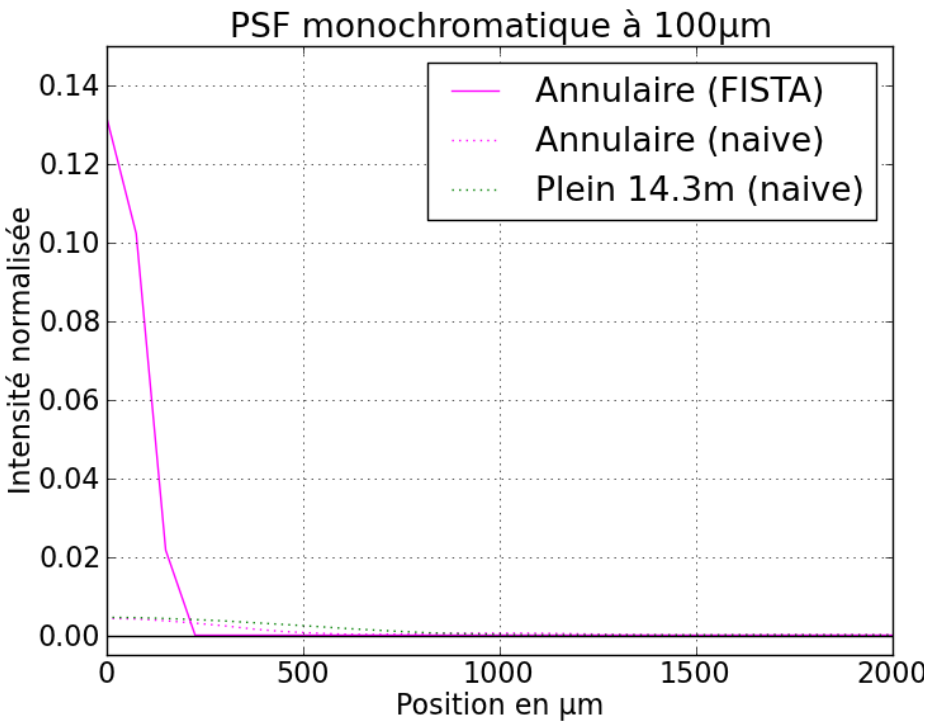
- preuve de convergence en $O(1/n^2)$ si le gradient du terme différentiable est β-Lipschitz. Ici, $\beta = 2\lambda_{\max}(H^{\mathrm{T}} N^{-1} H)$

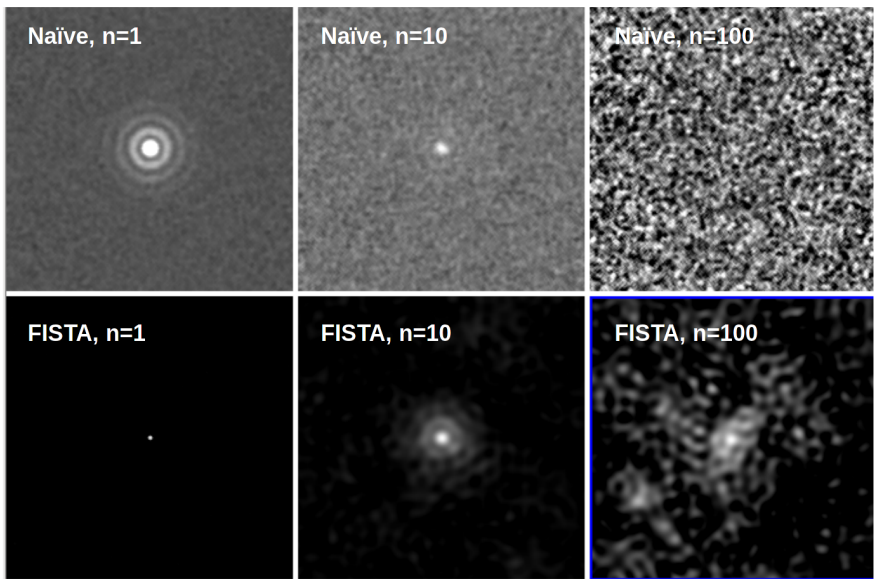
Exemple 3 : Télescope annulaire



Protocole observationnel

Exemple 3 : Télescope annulaire





Conclusions

Intérêt de l'approche problème inverse

- nécessité d'une excellente connaissance du processus d'acquisition
- le plus tôt possible dans la mission pour accompagner la phase de calibration
- se doter de moyens de calculs
- complexification des missions, mesures de - en - directes
- prise en compte des sous-systèmes, contrôle des erreurs
- développement en plein essor des techniques de minimisation de fonctions non-différentiables et non-continues

Disponible :
http://pchanial.github.com/pyoperators
http://pchanial.github.com/tamasis-map