

Détection de sursauts gamma ultra-longus et traitement d'images embarqué pour le télescope spatial SVOM/ECLAIRs

thèse présentée par Nicolas Dagoneau *le* 26 octobre 2020

sous la direction de Stéphane Schanne

au CEA Paris-Saclay / IRFU / DAp-AIM

en vue de l'obtention du doctorat de l'Université Paris-Saclay

école doctorale Astronomie et Astrophysique d'Ile de France



Plan de la présentation

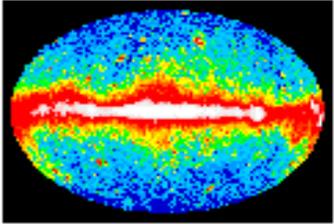
- I. Introduction : les sursauts gamma, la mission SVOM
- II. ECLAIRs et la détection des sursauts gamma
- III. Les problématiques de l'imagerie longue exposition grand champ à masque codé en rayons X durs
- IV. Traitement embarqué des images produites par ECLAIRs
- V. Application de l'imagerie longue exposition : détection de sursauts ultra-longes
- VI. Conclusion et perspectives

I. Introduction : les sursauts gamma et la mission SVOM

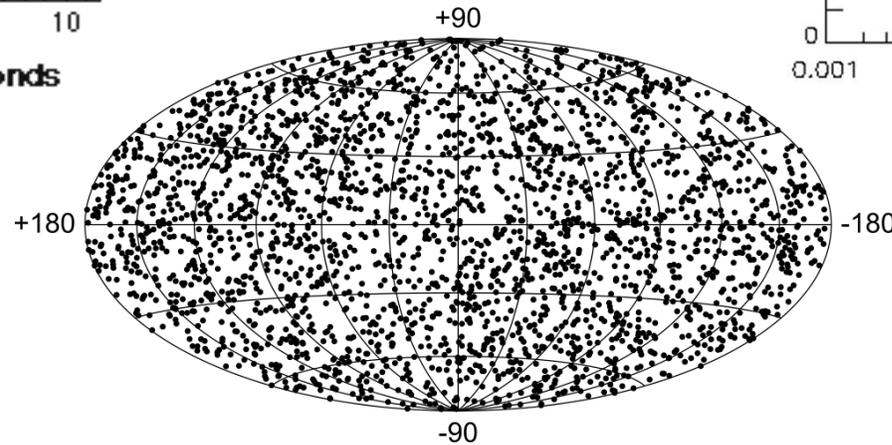
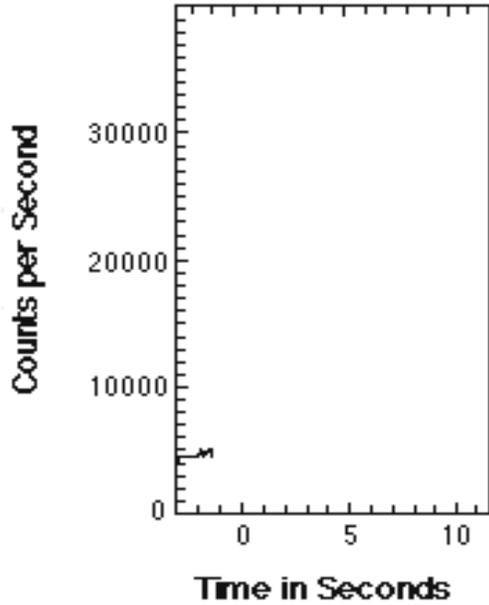
Les sursauts gamma : généralités

- 1973 : Découverte fortuite de l'émission prompte en gamma (*Klebesadel et al., 1973, Cline et al., 1973*).
- 1991 : Lancement de *CGRO* (instrument BATSE)
 - Les sursauts apparaissent de manière isotrope sur le ciel.
 - Identification de deux familles de sursauts différentes selon la durée T_{90} de l'émission prompte (*Kouveliotou et al., 1993*).
- 1997 : *BeppoSax* découvre l'émission rémanente des sursauts gamma en rayons X (*Costa et al., 1997, van Paradijs et al., 1997*).
- 1997 : Première mesure de la distance d'un sursauts gamma : GRB 970508 à $z = 0.835$ (*Metzger et al., 1997*).
- 2004 : Lancement de la mission *Swift*.
- 2013 : Une nouvelle famille de sursauts ultra-long ? (*Levan et al., 2013*)

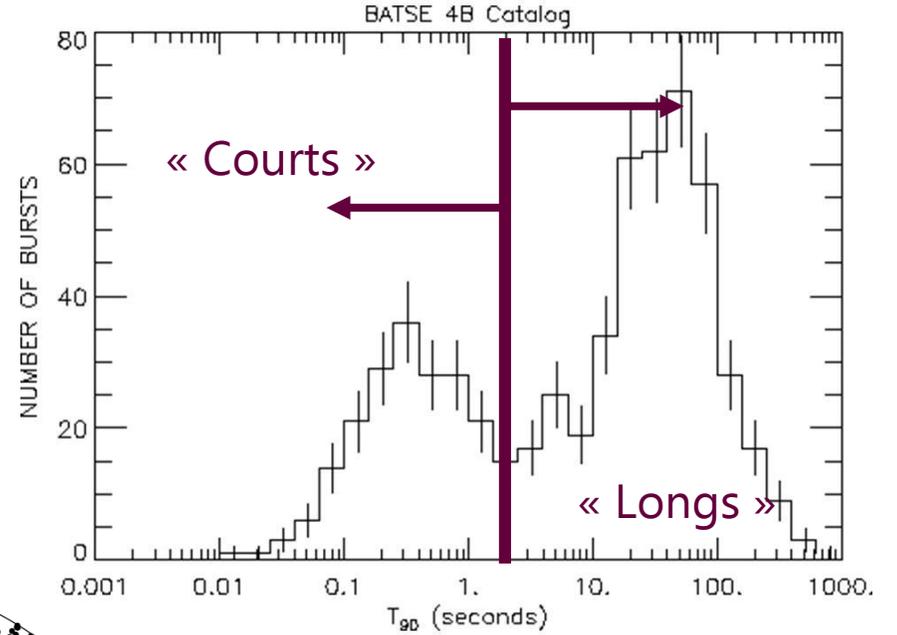
Les sursauts gamma : généralités



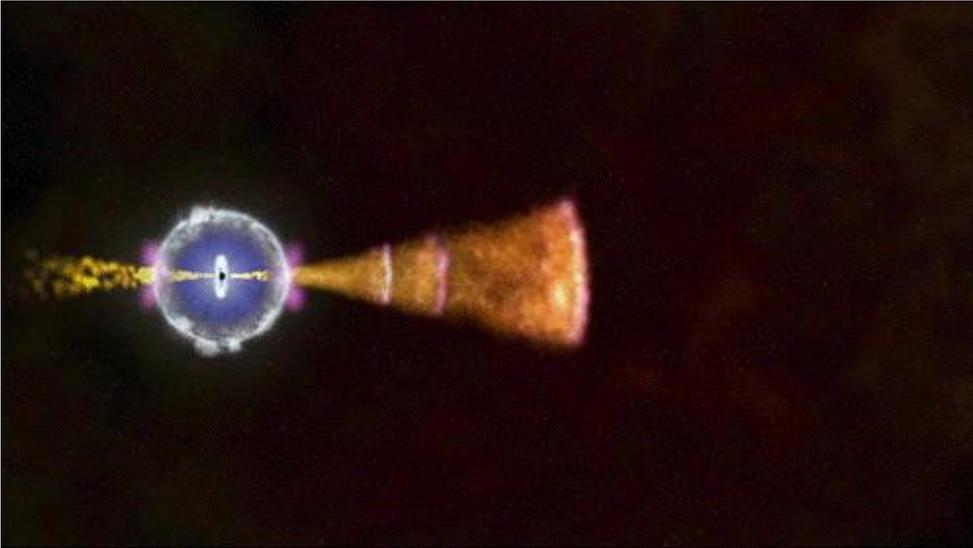
Exemple d'un sursaut détecté par CGRO/BATSE (20 keV – 1 MeV)



Position des 2704 sursauts détectés par CGRO/BATSE (20 keV – 1 MeV) (coordonnées galactiques)



Les sursauts gamma : modèle



Modèle de la « boule de feu »

Destins stellaires :

- Effondrement de certaines étoiles massives → sursaut « long ».
- Coalescence d'étoiles à neutrons → sursaut « court ».

Accélérateur de particules cosmique :

- Formation d'un trou noir et d'un jet de matière focalisé ultra-relativiste.
- Chocs dans le jet → émission « **prompte** » de photons gamma.
- Chocs avec le milieu interstellaire → émission « **rémanente** » dans toutes les longueurs d'onde (rayons X, visible, radio).

La mission multi-longueurs d'onde SVOM

Mission franco-chinoise dédiée aux sursauts gamma. Lancement : juin 2022.

Objectif : fournir une caractérisation complète des sursauts gamma (position, spectre, distance) et observer les sources du ciel transitoire en général.

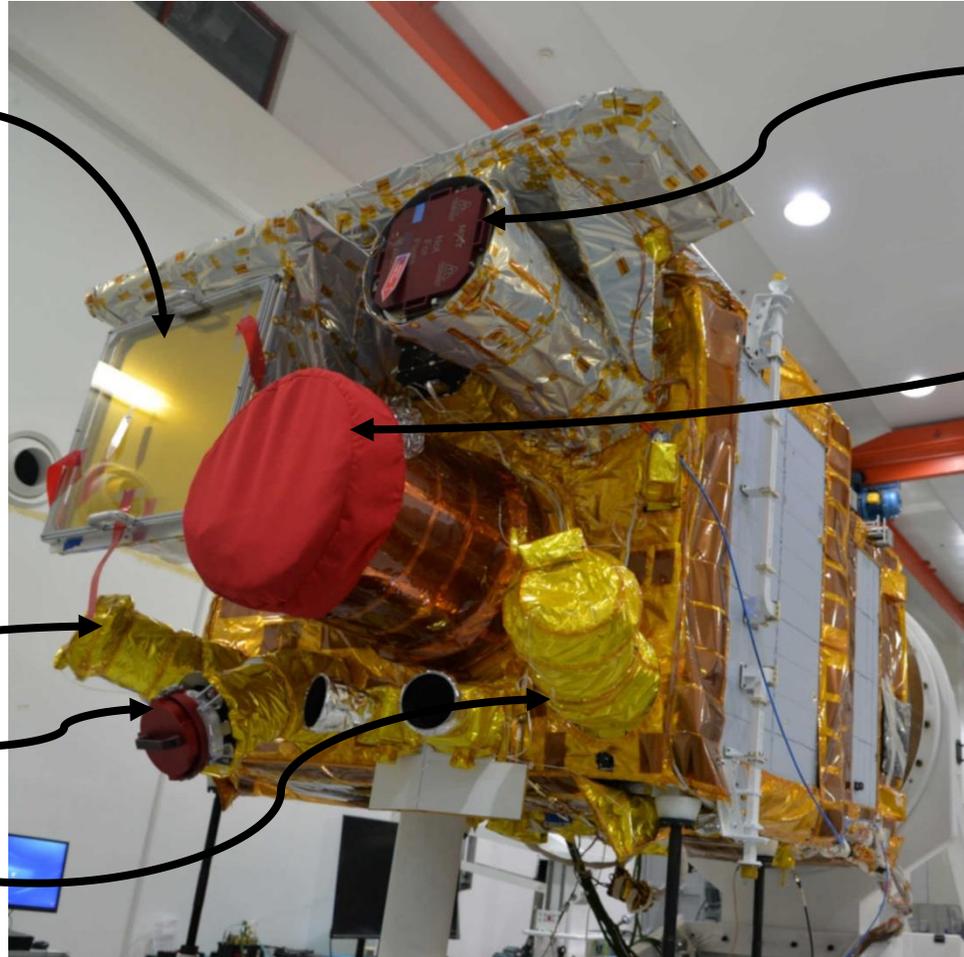
ECLAIRs (rayons gamma mous et X durs)

Repointage automatique pour observer les sursauts détectés par ECLAIRs avec MXT et VT.

GRM (rayons gamma)

Grand champ de vue pour observer l'émission prompte

Petit champ de vue pour observer l'émission rémanente



MXT (rayons X mous)

VT (visible)

Au sol :

- Réseau de transmission d'alertes (VHF)
- Télescopes de suivi (GFTs)
- Caméras grand angle (GWAC)

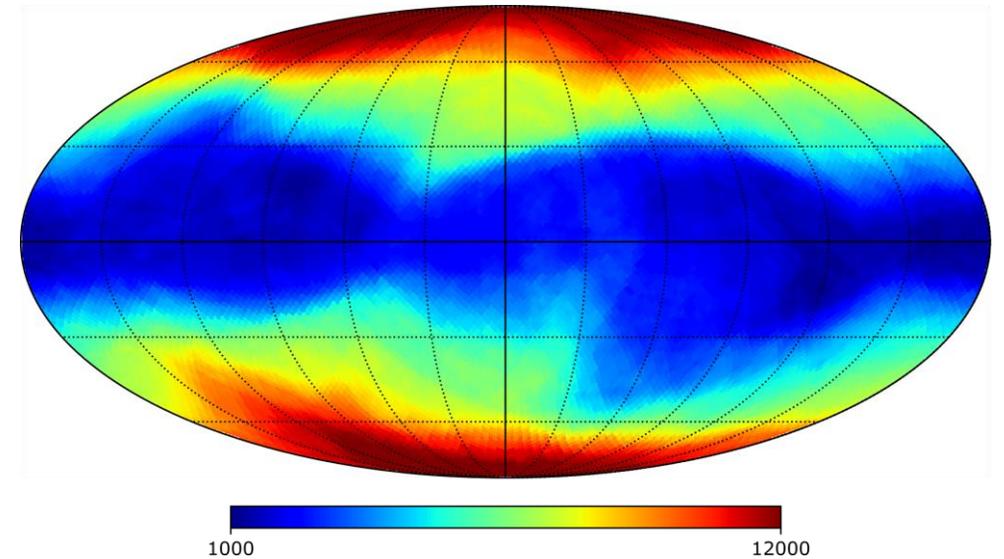
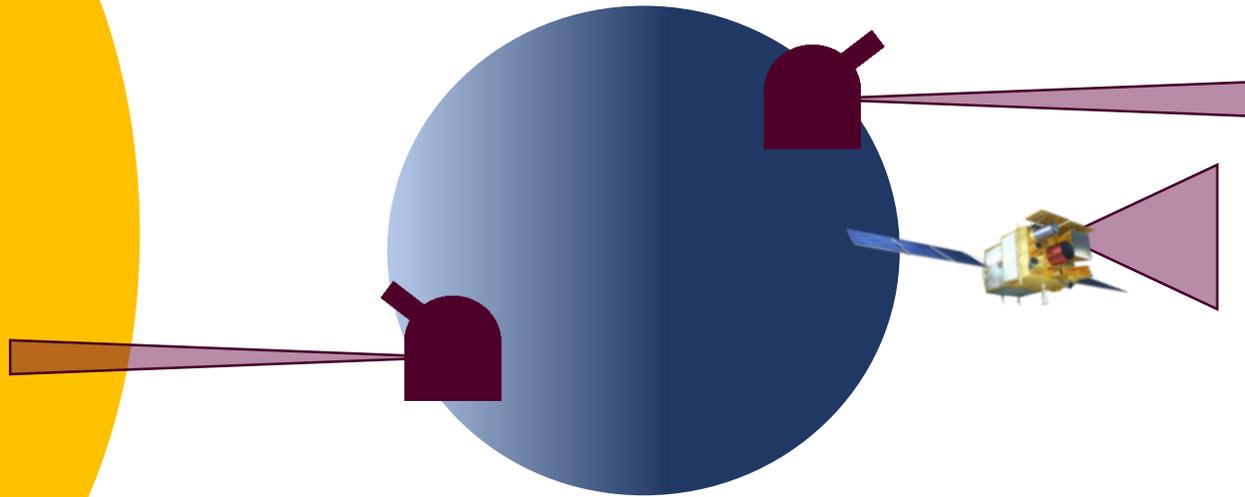


Inspiré de la mission *Swift* (2004-...)

Stratégie d'observation de la mission SVOM

Pour suivre un maximum de sursauts avec les grands télescopes au sol (et mesurer leur distance) :

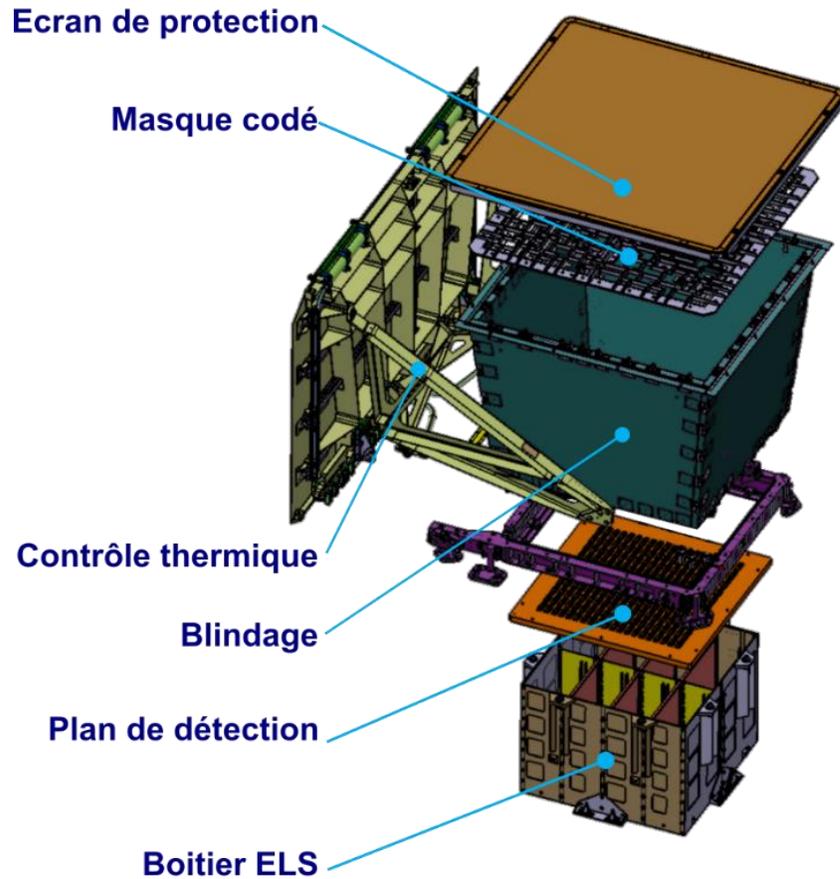
- Le satellite pointe toujours côté « nuit ».
 - Les pointages sont essentiellement dirigés vers les pôles galactiques.
- **la Terre traverse régulièrement le champ de vue = problématique pour l'imagerie.**



Durée de pointage (ks) en
coordonnées galactiques
pour un an d'observation.

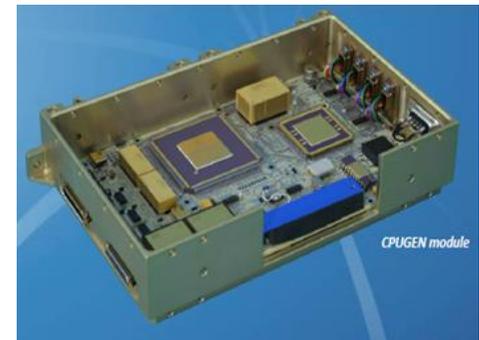
II. ECLAIRs et la détection des sursauts gamma

Le télescope ECLAIRs : l'instrument



- Télescope à masque codé (les rayons X sont difficile à focaliser)
 - Surface sensible détecteur : 1024 cm²
 - Détecteur : 80x80 pixels CdTe
 - Champ de vue total : ≈ 2 sr soit 1/6 du ciel
 - Imagerie entre 4 et 120 keV (énergie mesurée jusqu'à 150 keV)
 - Masque en Tantale (40% d'ouverture) autoporteur
 - Blindage PbCuAl
 - Taux de détection attendu : ≈ 60 GRBs/an
 - Localisation : meilleure que 12 arcmin pour 90% des cas
-
- Traitement embarqué par l'UGTS : déclenchement automatique (détection et position) → transmission alerte au sol et consigne de repointage.

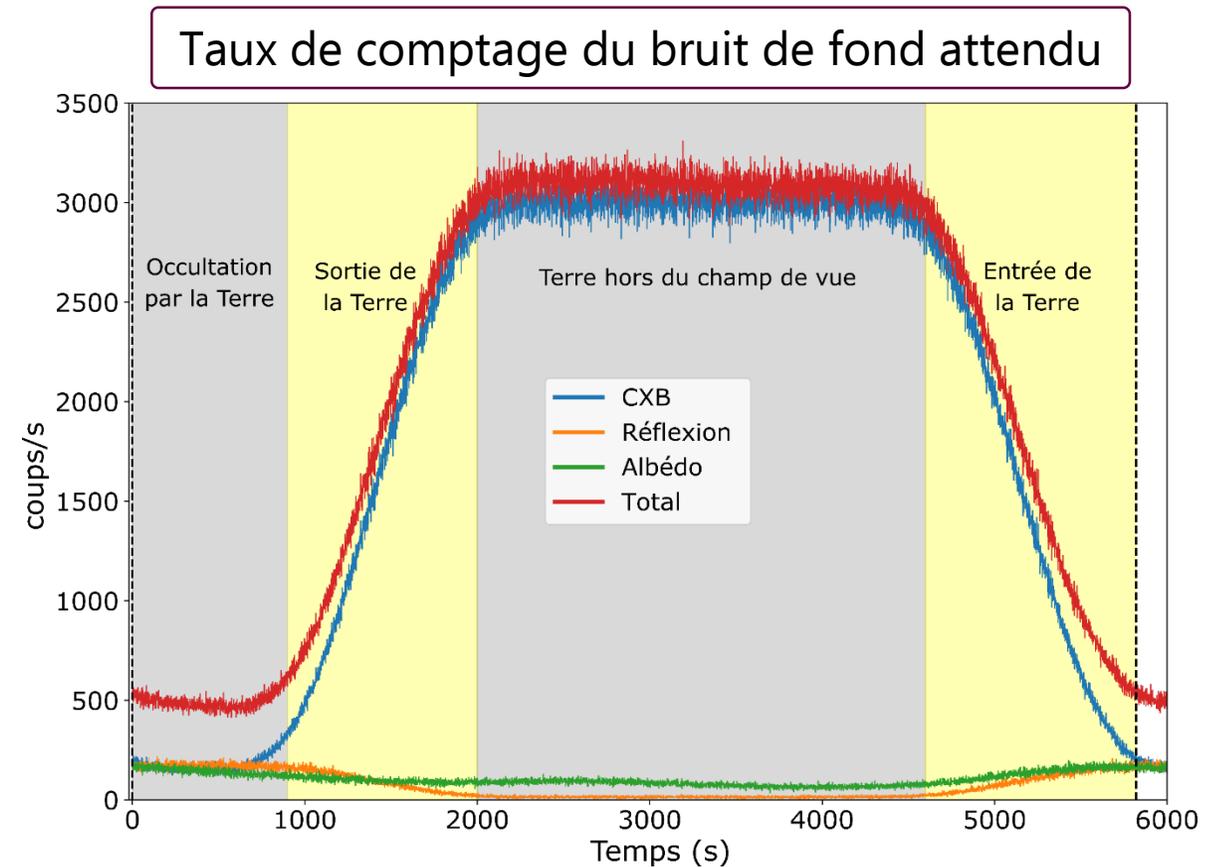
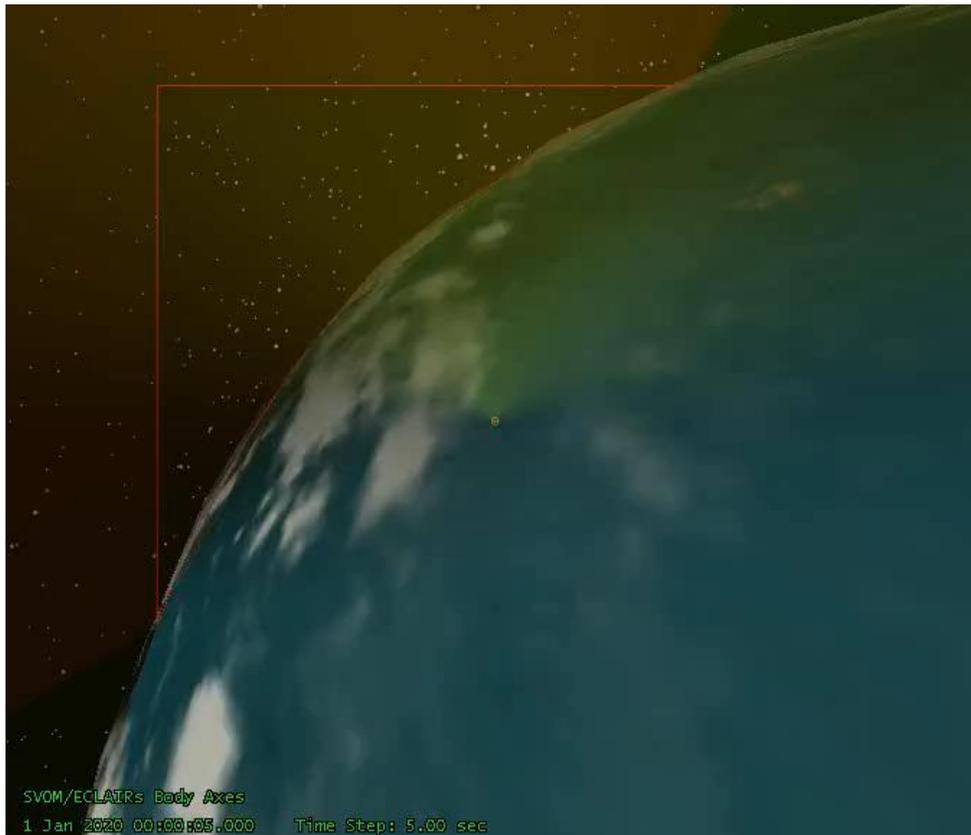
Unité de gestion et de traitement scientifique



Carte CPU (FPGA et processeur Léon 3)

Le télescope ECLAIRs: évolution temporelle du bruit de fond

- Bruit de fond : *Cosmic X-ray Background* (CXB : contribution des sources X distantes non résolues).
- Occultations fréquentes par la Terre → variation du taux de comptage et de la distribution sur le détecteur.



Mate et al. (2019)

Imagerie à masque codé

- Projection d'une ombre sur le détecteur : *shadowgramme*.
- Ombre unique pour chaque position d'éclaircement.
- Reconstruction de l'image du ciel à partir de l'image du détecteur :

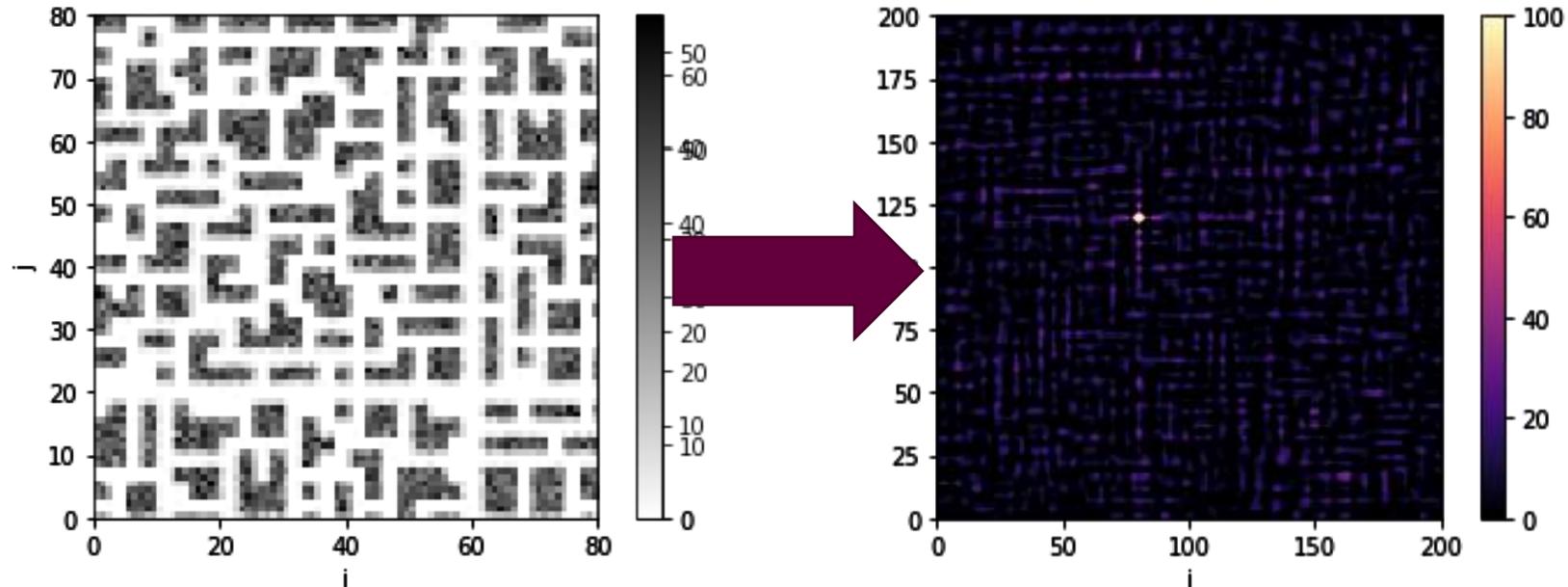
déconvolution.

$$\begin{aligned} D_{cnt} &\rightarrow S_{cnt} \\ D_{var} &\rightarrow S_{var} \end{aligned}$$

$$S_{snr} = S_{cnt} / \sqrt{S_{var}}$$



Modèle de vol du masque



Détection embarquée : *trigger image*

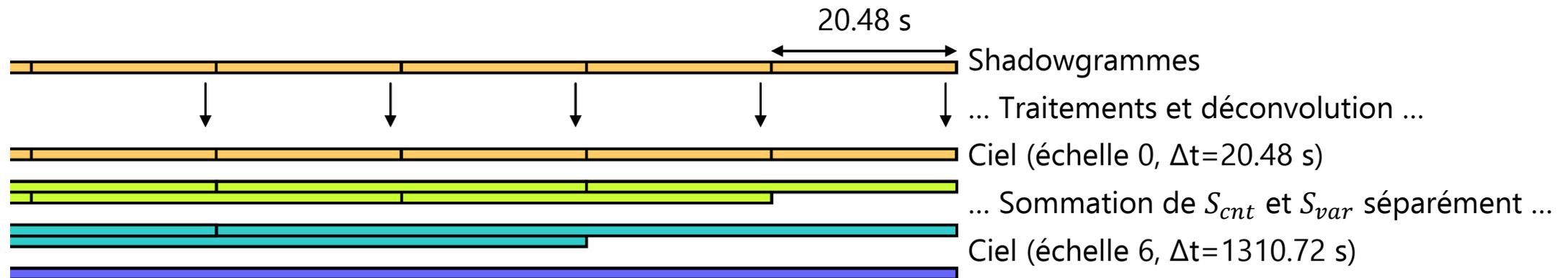
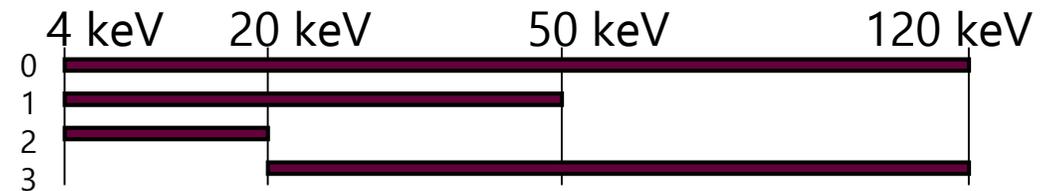
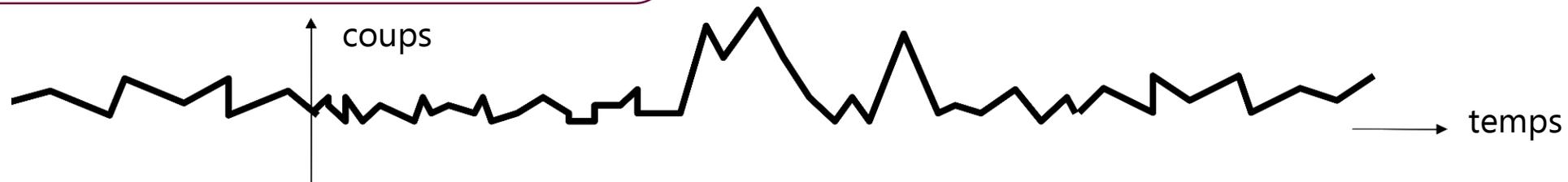
2 algorithmes de détection embarqués

- Trigger taux de comptage : 10 ms à 20 s (*non étudié dans la thèse*).
- Trigger image : 20 s à 20 min.

Nouveauté d'ECLAIRs : seuil bas à 4 keV

- 4 – 20/50 keV : sursauts mous, grand décalage spectral.
- 20 -120 keV : sursauts standards détectés par *Swift*/BAT.
- 4 -120 keV : sursauts peu intenses.

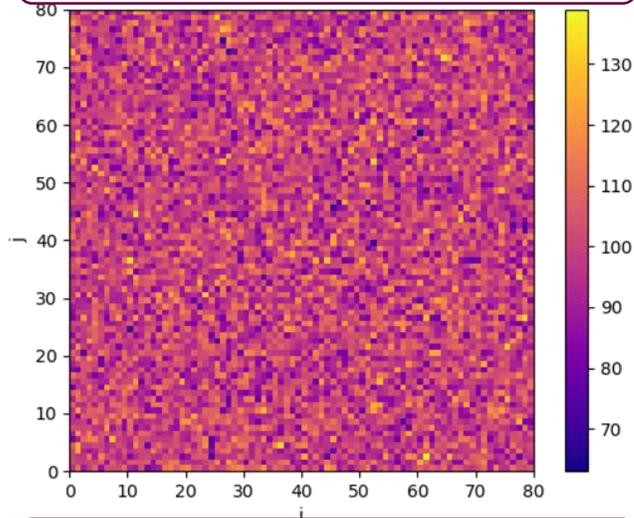
Chronogramme du trigger image



III. Les problématiques de l'imagerie longue exposition et les méthodes traditionnelles de correction

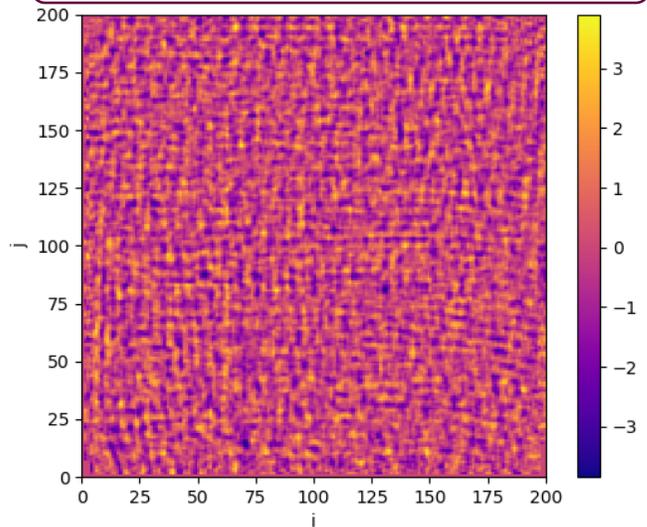
Cas idéal : bruit Poissonien uniforme sur le détecteur

Image du détecteur en coups



Hypothèse d'une distribution de Poisson
 $D_{cnt} = D_{var}$.

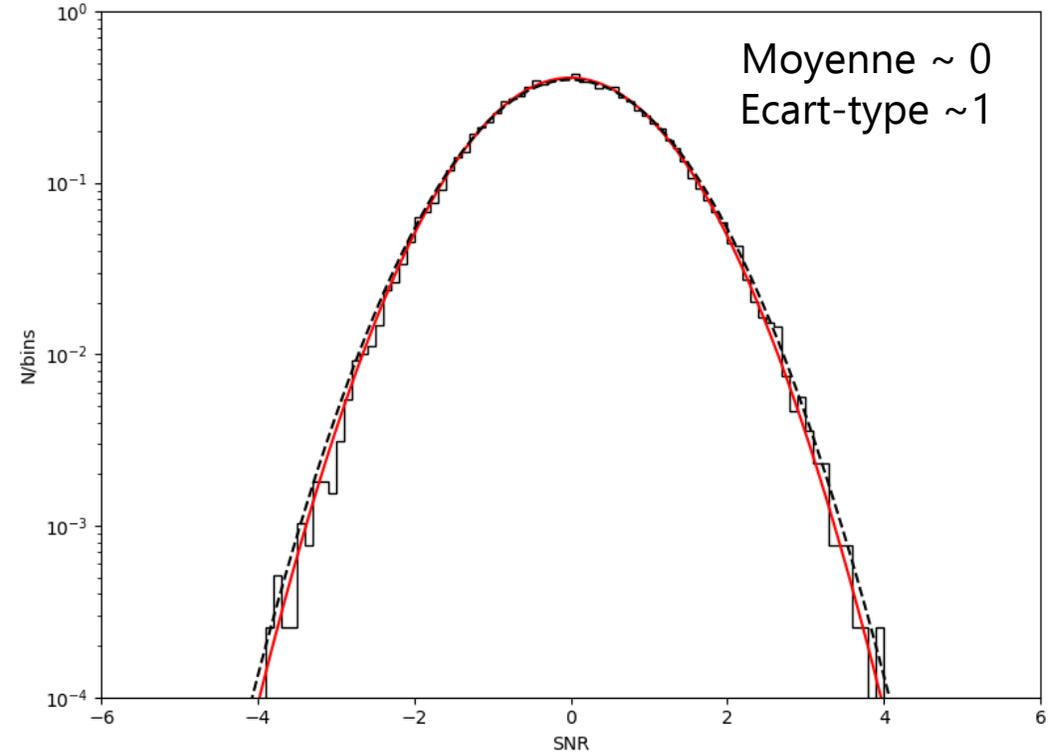
Image du ciel en SNR



Après déconvolution

$$S_{snr} = \frac{S_{cnt}}{\sqrt{S_{var}}}$$

Distribution du SNR des pixels du ciel

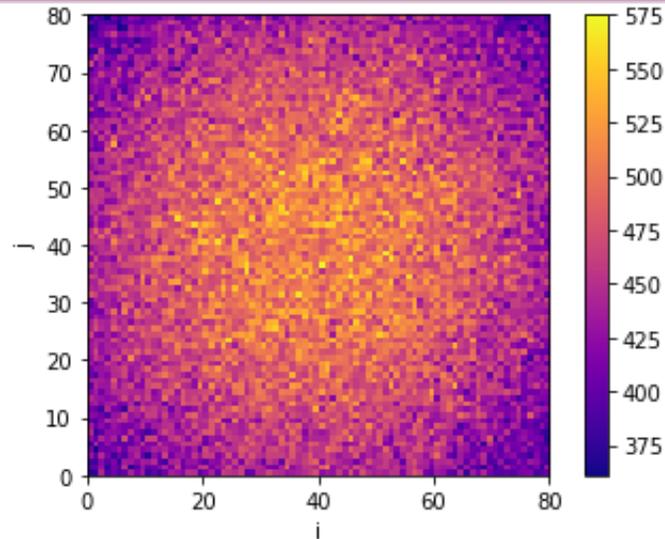


Seuil de détection à 3σ dans chaque pixel du ciel
pour $N(0,1) \rightarrow \mathbf{SNR = 5.4}$
Au début de ma thèse, seuil fixé à $\mathbf{SNR = 6.5}$
(configurable à bord) d'après une étude précédente.

CXB non uniforme sur le détecteur non corrigé : effet de la non correction

Sans Terre

Image du détecteur
en coups
(1000 s, 4-120 keV)



Avec Terre

Exposition du ciel
normalisée
(20 min)

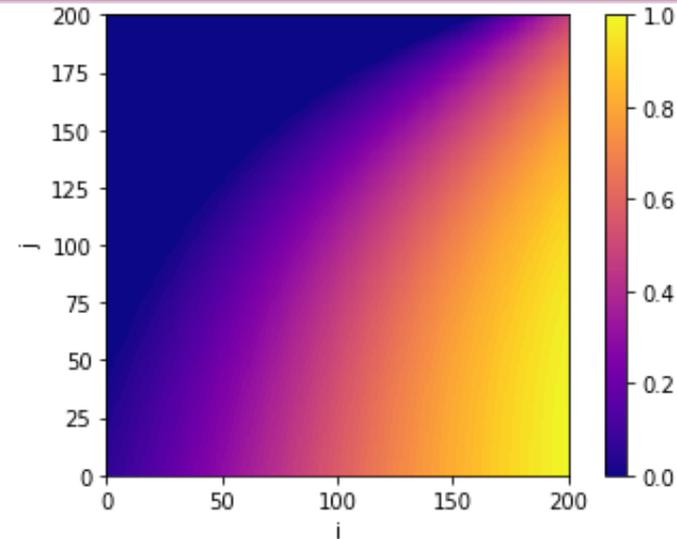
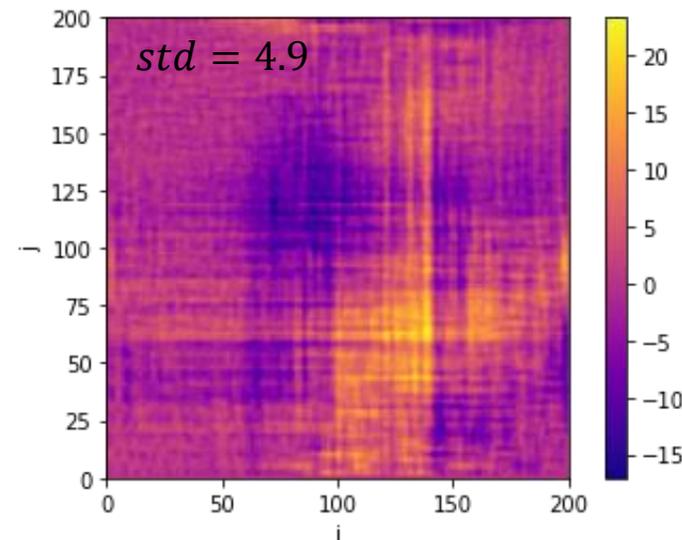
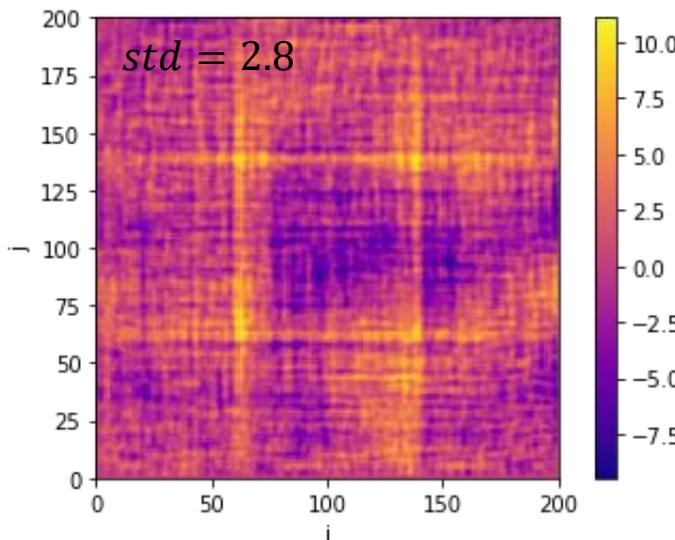


Image du ciel en SNR en ≈ 20 min : pas de corrections des 64 images de 20 s qui les composent.

La qualité des images se
dégradent en sommant
les images de 20 s non
corrigées.



Correction du bruit de fond : méthode traditionnelle par ajustement

Méthode traditionnelle pour l'imagerie à masque codée à grand champ de vue.

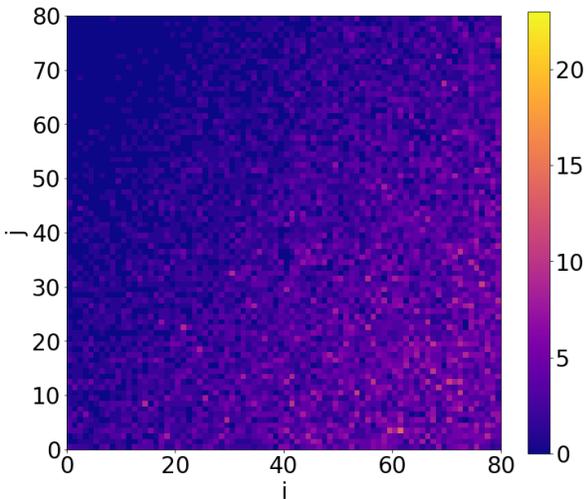
CXB : forme convexe sur le détecteur (Image du détecteur en coups, 1000 s, 4-120 keV, sans Terre).

$$M(i, j) = c_0 + c_1 \cdot i + c_2 \cdot j + c_3 \cdot i^2 + c_4 \cdot j^2 + c_5 \cdot i \cdot j$$
$$D_{cnt, clean} = D_{cnt} - M$$
$$D_{var, clean} = D_{var} + Var(M) \approx D_{cnt}$$

Méthode
implémentée dans le
logiciel embarqué.

Exemple en présence de Terre :

Image du détecteur en coups (20 s, 4-120 keV)



Modèle du détecteur en coups

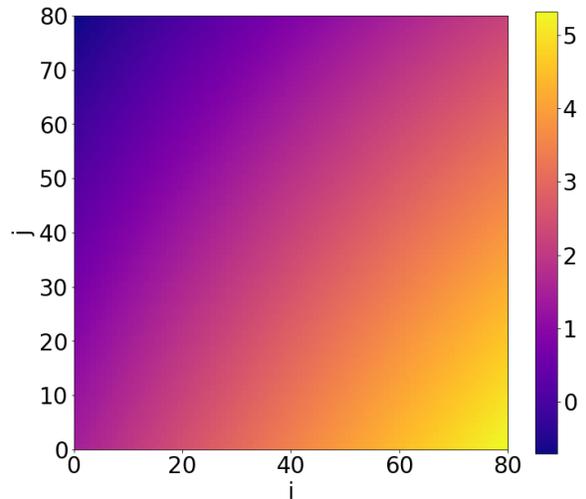


Image du détecteur corrigée en coups

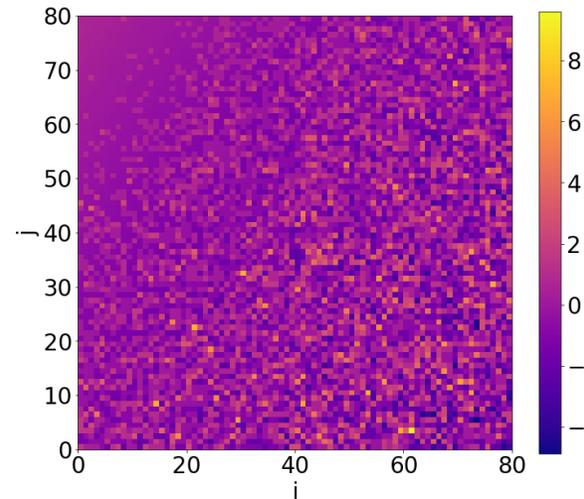
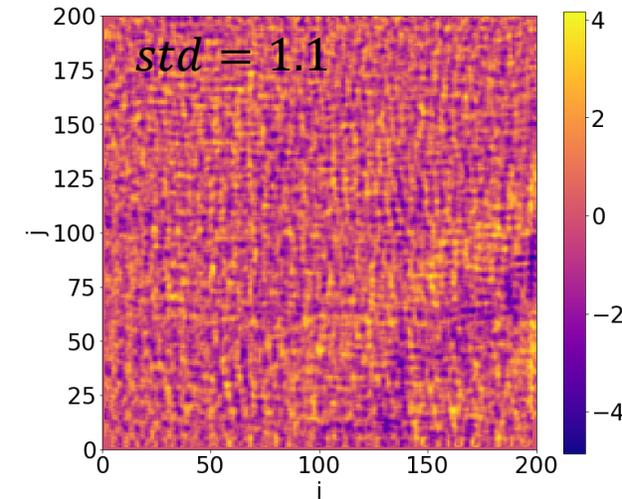
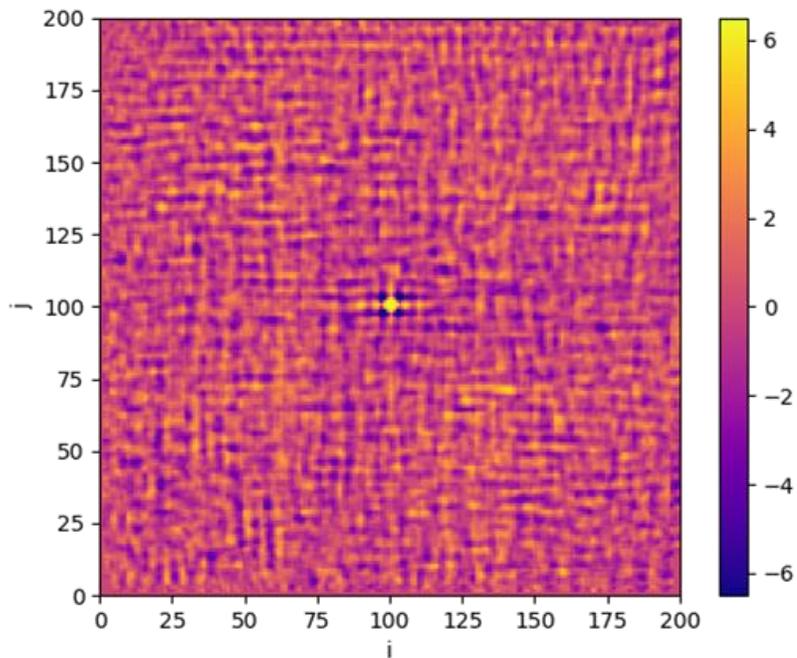


Image du ciel en SNR (20 min)



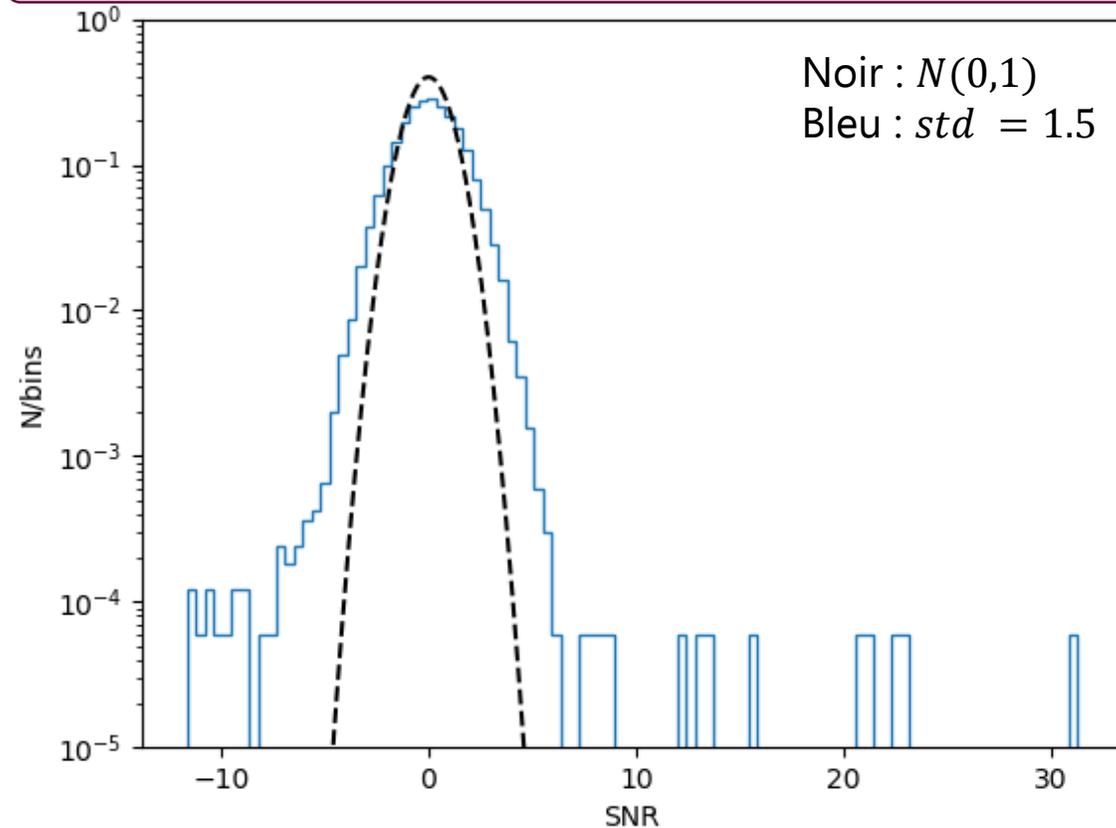
Source connue dans le champ de vue non corrigée : effet de la non correction

Image du ciel en SNR
(20 s, 4-120 keV)



Echelle tronquée à $SNR = 6.5$
Flux de la source : 1.5 ph/s/cm²

Distribution du SNR des pixels du ciel



Valeurs de SNR importantes qui se « détachent » + élargissement de la distribution (bruit de codage dans toute l'image) → masquer les pixels affectés par la source ne suffit pas.

Catalogue de sources



MAXI (ISS)

Construction d'un catalogue (1793 sources) :

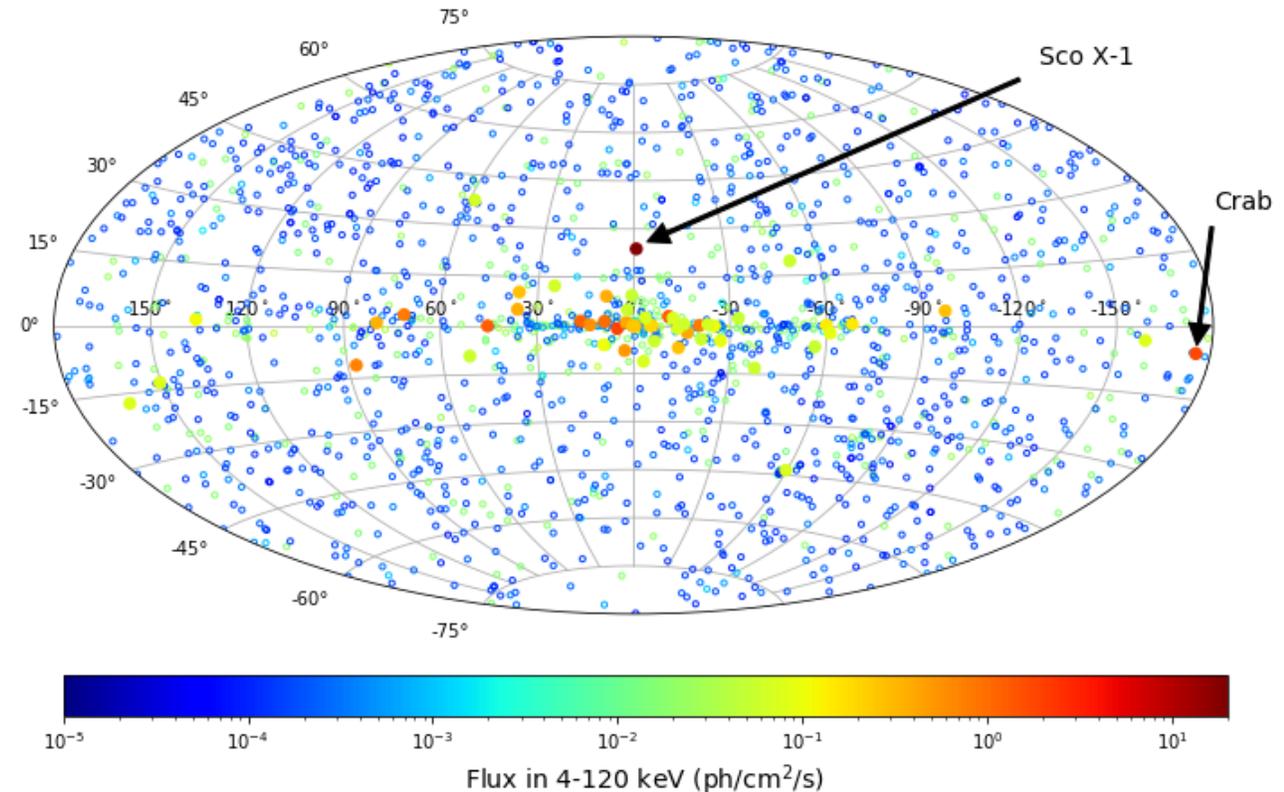
- MAXI/GSC (2-20 keV) (standard online products)
- Swift/BAT (14-195 keV) (Oh et al., 2018)
- Essentiellement des binaires X.

En partie embarqué dans le logiciel de l'UGTS

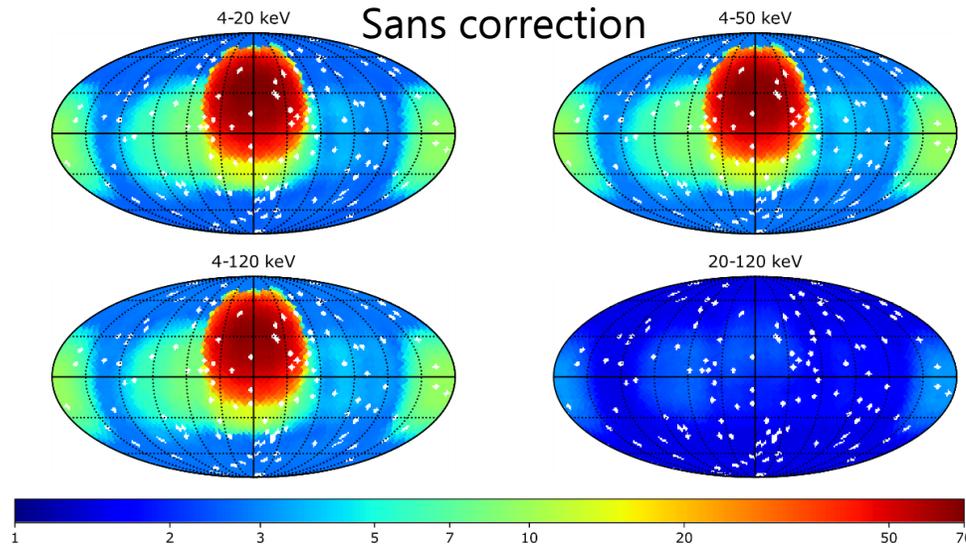
Etude de l'influence des sources :

- Génération de spectres (loi de puissance simple ou brisée) à partir de flux moyens.
- Simulation des sources dans le champ de vue.

Carte en coordonnées galactiques des sources du catalogue



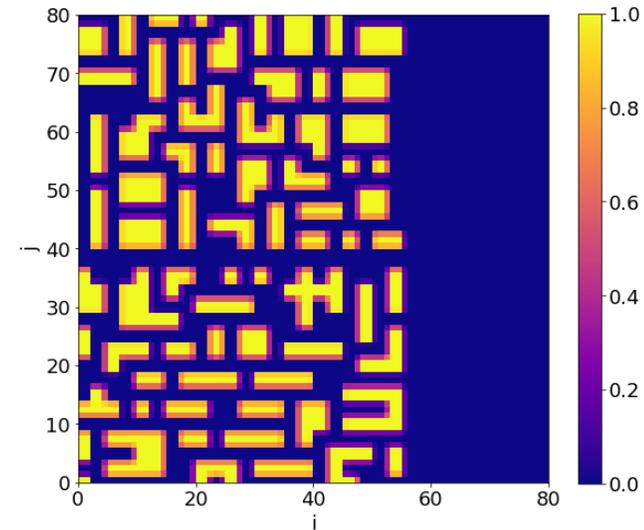
Ecart-type du SNR des images du ciel en 20 min.



Correction des sources : méthode traditionnelle par ajustement

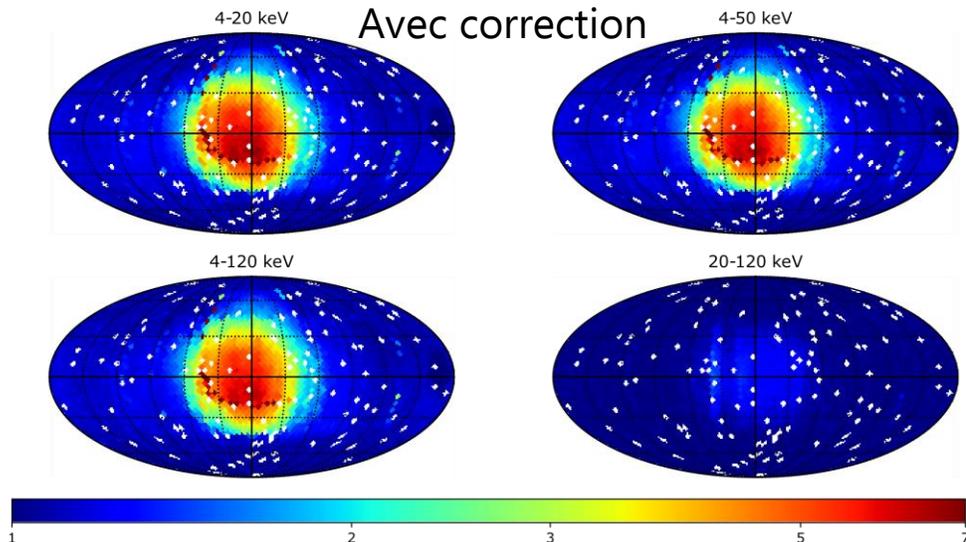
A partir d'un catalogue de source embarqué (positions dans le ciel)

- Positions dans l'image du ciel (en pixel).
- Construction de la « fonction d'illumination » de chaque source.
- Fonction ajoutée au modèle à ajuster.



Exemple d'une fonction d'illumination (source hors axe)

Ecart-type du SNR des images du ciel en 20 min.



En 20 min :

Sans correction, l'écart-type atteint des valeurs > 50 dans le centre galactique et la région de Sco X-1.

Avec correction, écart-type réduit à < 7 .

Différence selon la région du ciel pointée : le seuil de détection en SNR ne peut pas être unique (temps d'exposition et échelle de temps) → Comment fixer le meilleur seuil pour chaque région du ciel pointée ?

**IV. Traitement embarqué des images produites par ECLAIRs :
nouvelles méthodes et comparaison avec la méthode traditionnelle.**

Nouvelle méthode (jamais utilisée en imagerie à masque codé embarquée)

CXB : forme convexe sur le détecteur grand échelle

**Méthode
implémentée dans le
logiciel embarqué.**

$$D_{cnt, clean} = D_{cnt} - D_{grandes\ echelles}$$
$$D_{var, clean} = D_{cnt}$$



Pas d'hypothèse sur la forme du bruit de fond sur le détecteur.

Calcul des différentes échelles avec l'algorithme à trous 2D (*Starck et Murtagh, 2002*).

Ondelettes 2D : algorithme à trous

Filtrage (filtre de taille 3) : $h_3 = \left\{ \frac{1}{4}, \frac{1}{2}, \frac{1}{4} \right\}$

$$D_s(i, j) = \sum_{m=-l}^l \sum_{n=-l}^l H(m, n) \cdot D_{s-1}(i + 2^{s-1}m, j + 2^{s-1}n)$$

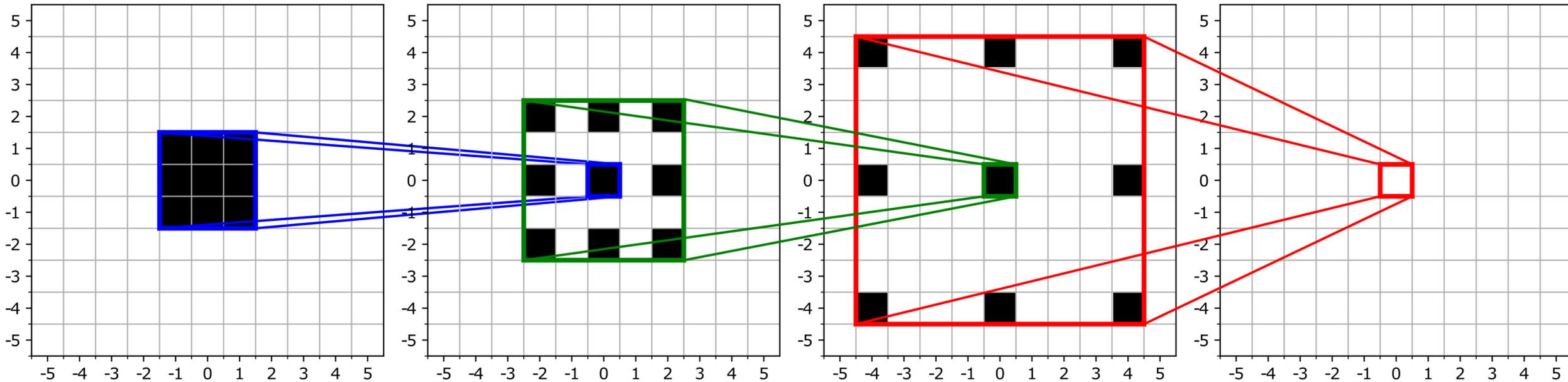
$$H = h \times h$$

Image détecteur brute

$s = 1$

$s = 2$

$s = 3$



Autre choix de filtre possible : $h_5 = \left\{ \frac{1}{16}, \frac{1}{4}, \frac{3}{8}, \frac{1}{4}, \frac{1}{16} \right\}$

Correction du bruit de fond : ondelettes

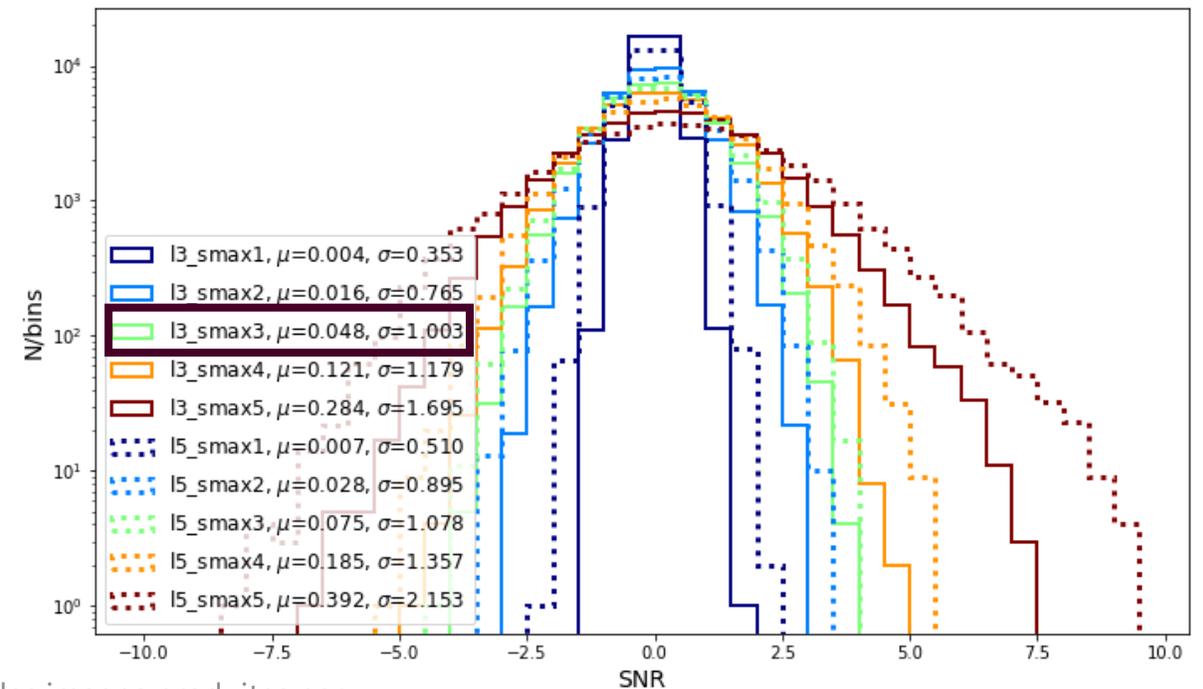
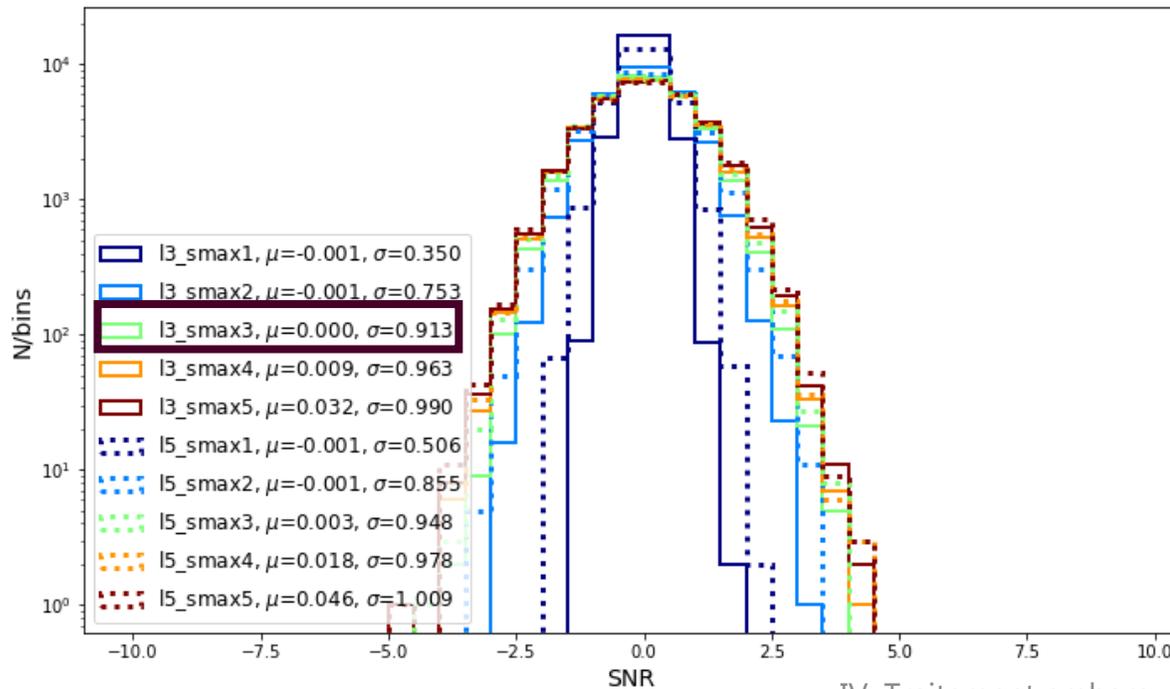
2 paramètres (configurables) pour la méthode :

- Taille du filtre (3 ou 5)
- Nombre de lissages

Paramètres retenus :

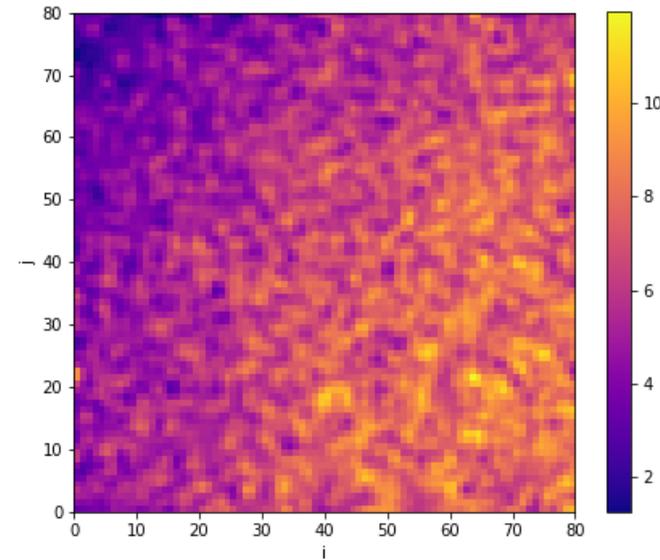
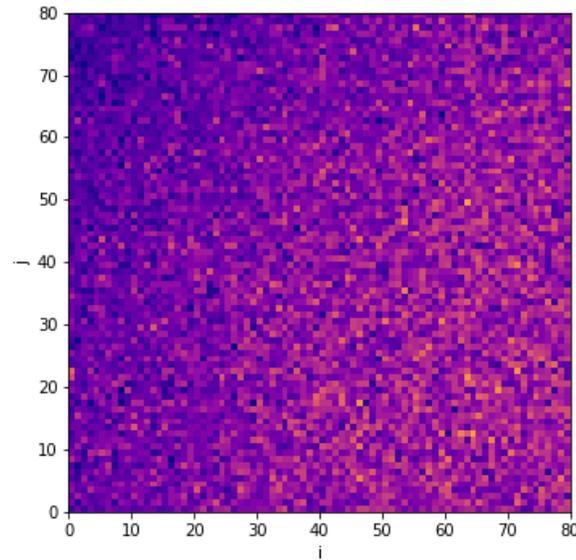
- Lissage maximal x3 (conserve les échelles dont la taille caractéristique est de 1, 2 ou 4 pixels)
- Filtre de taille 3

Ecart-type du SNR du ciel pour 20s (gauche) et 20 min (à droite) après correction.



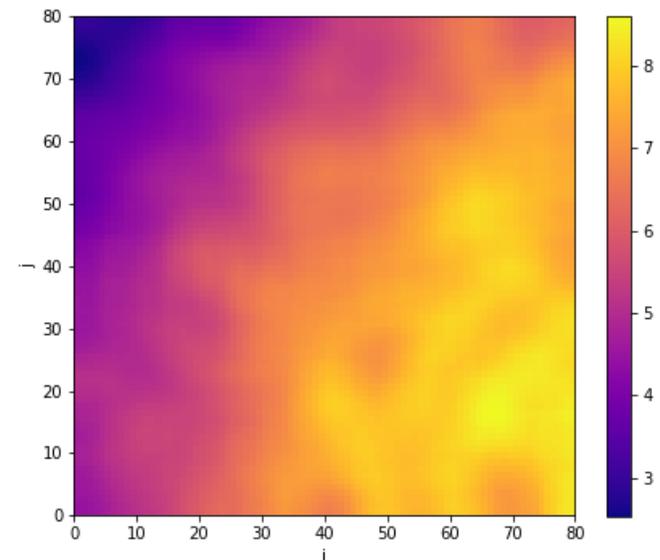
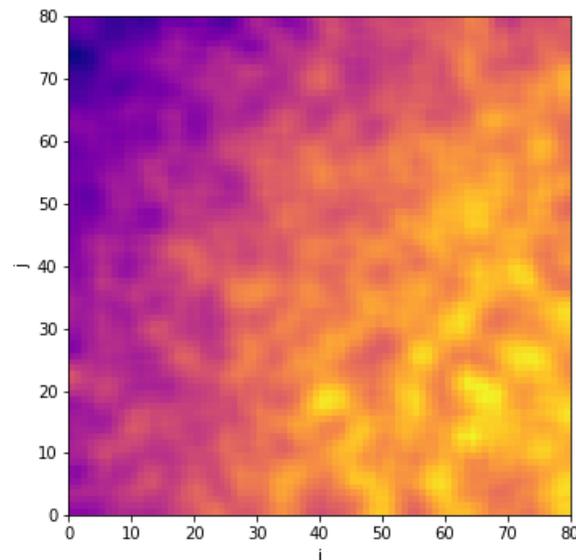
Correction du bruit de fond : ondelettes (avec Terre)

Image
détecteur
brute (20 s,
4-120 keV)



Echelle
 $s = 1$

Echelle
 $s = 2$



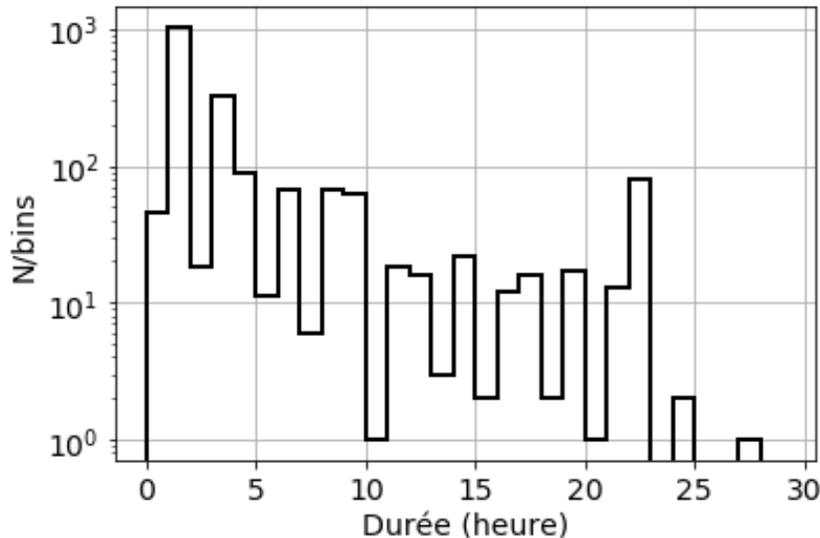
Echelle
 $s = 3$

Performances des méthodes : simulation d'une année d'observation

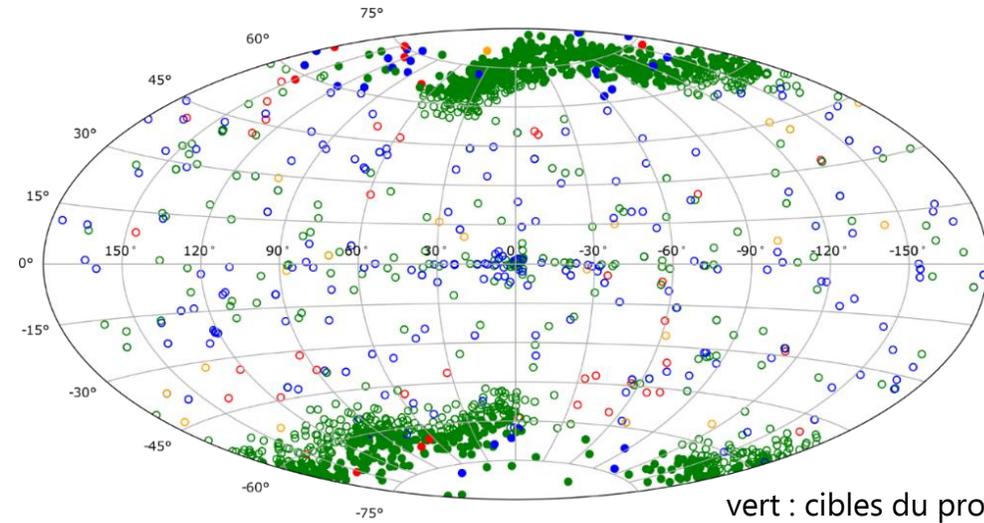
Dagoneau et al., in prep.

Scénario d'un an de pointage de SVOM → simulation de toutes les images d'une année.

Distribution des durées des pointages



Positions des pointages en coordonnées galactiques.



vert : cibles du programme Général
bleu : cibles d'opportunité nominale
orange : cibles d'opportunité exceptionnelle
rouge : suivi d'un sursaut-gamma

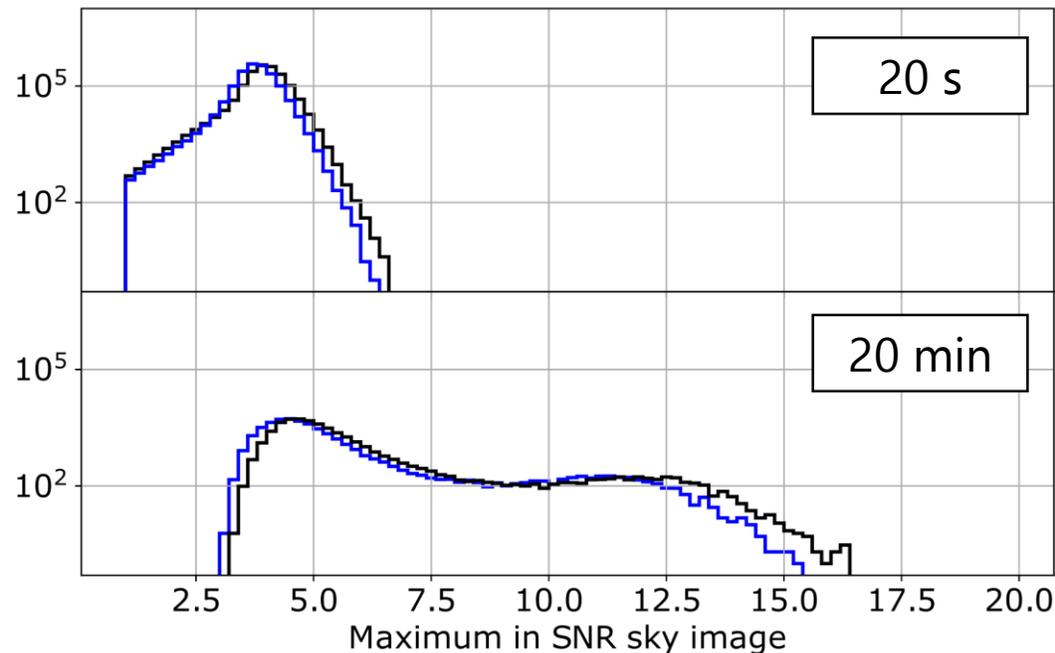
1919 pointages stables dans l'année :

- Projection du CXB et des sources → images du détecteur toutes les 20 s
- Correction du CXB (ajustement ou ondelettes) et des sources (ajustement des modèles)
- Reconstruction de l'image du ciel (20 s) par déconvolution
- Construction des échelles de temps (40 s, 80 s, ..., 20 min)
- Analyse (écart-type et maximum du SNR dans toutes les images).

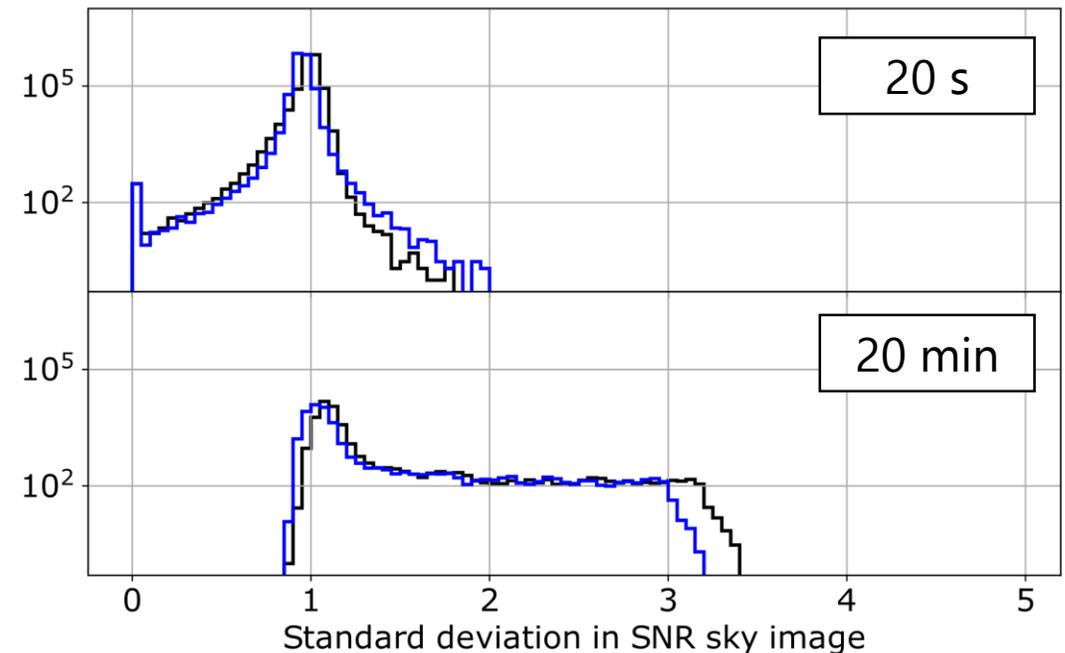
IV. Traitement embarqué des images produites par
ECLAIRS

Performances des méthodes : maximum et écart-type du SNR

Distribution de **Max SNR** pour toutes les images de 20 s et 20 min sur 1 an d'observation, CXB corrigé par **ajustement** ou **ondelettes**.



Distribution de **Std SNR** pour toutes les images de 20 s et 20 min sur 1 an d'observation, CXB corrigé par **ajustement** ou **ondelettes**.



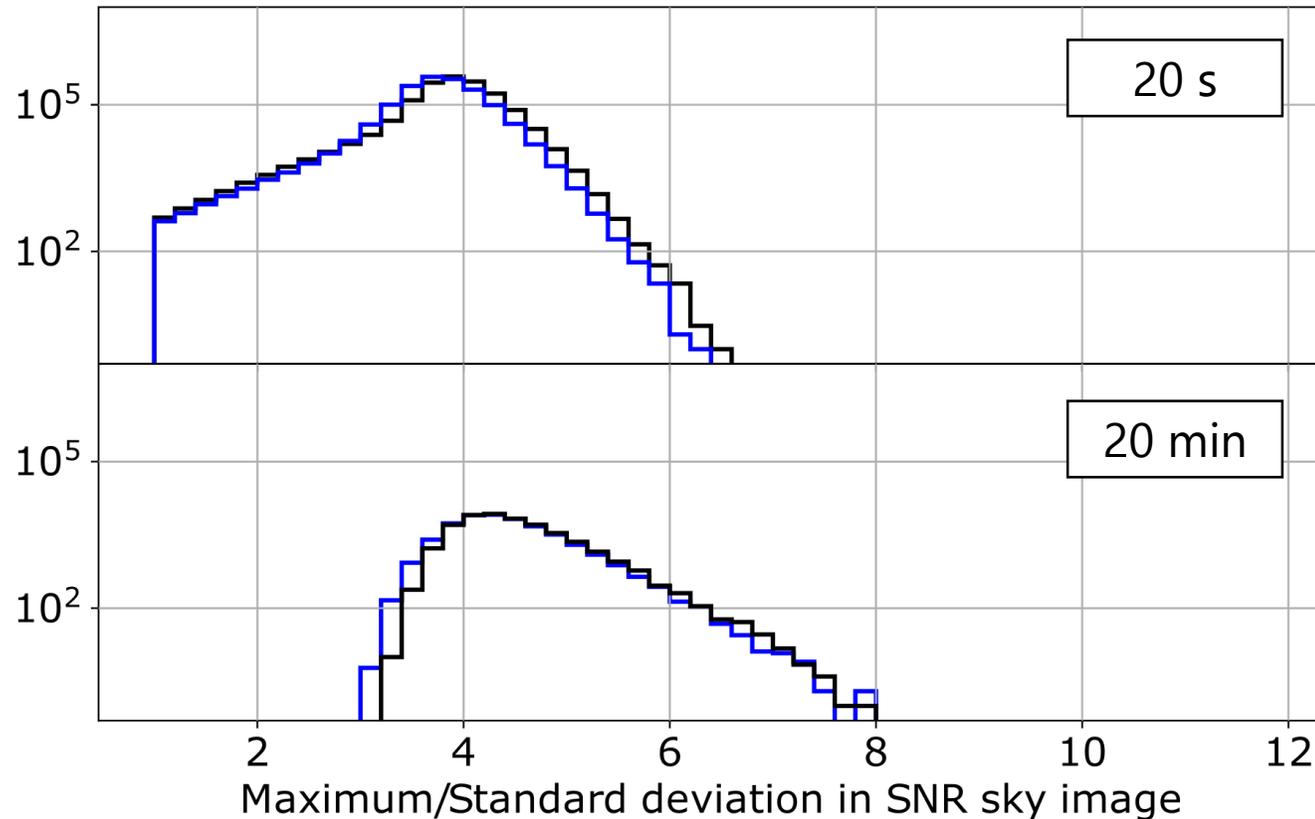
Fixer un seuil en SNR impose un seuil trop sévère en 20 min ($SNR \approx 17$).

→ Utilisation de l'écart-type pour définir un seuil sur la valeur $(Max\ SNR)/(Std\ SNR)$.

Performances des méthodes : seuil en SNR adaptatif

Méthode
implémentée
dans le logiciel
embarqué.

Distribution de **(Max SNR)/(Std SNR)** pour toutes les images de 20 s et 20 min sur 1 an d'observation, CXB corrigé par **ajustement** ou **ondelettes**.



Performances similaires pour la méthode de correction du CXB par ajustement et avec les ondelettes.

Le seuil de détection $SNR = 6.5$ n'est pas toujours applicable en 20 min
→ **adaptation dynamique en fonction de la qualité de l'image :**

$$\frac{Max(SNR)}{Std(SNR)} > Seuil$$

En 20 s : *seuil* = 6.5

En 20 min : *seuil* = 8

Nombre d'images de 20 s : 1 510 545

Nombre d'images de 20 min : 44 895

Conclusion sur les méthodes de traitement d'images

- Une nouvelle méthode utilisant des **ondelettes** : pas besoin de faire d'hypothèse sur la forme spatiale du CXB sur le détecteur → **implémenté à bord**.
- Correction des sources essentielle pour réduire l'écart-type du SNR des images du ciel.
- Qualité des images du ciel différente selon la direction de pointage (centre galactique et Sco X-1 vs pôles).
- Seuil en SNR adaptatif en fonction de l'écart-type du SNR → **implémenté à bord**.

→ **Traitements essentiels pour la détection de sursauts faibles dans des images longue durée.**

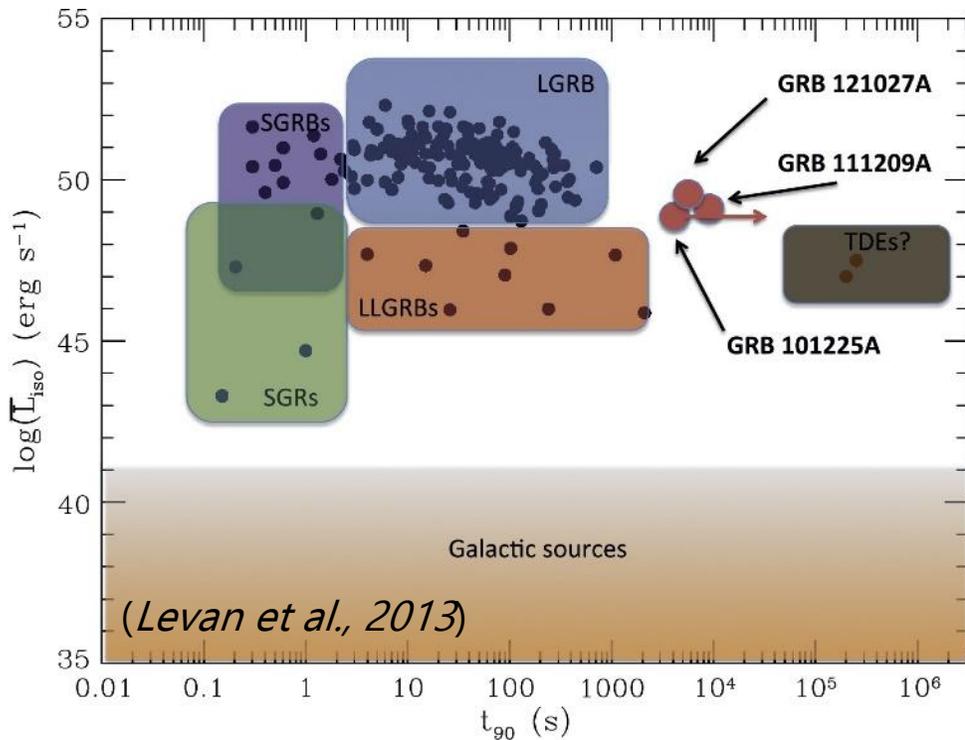
→ **Exemple : détection de sursauts gamma ultra-long.**

V. Application de l'imagerie longue pose : détection de sursauts ultra-longs

*Dagoneau et al., 2020
Experimental Astronomy, vol 50, issue 1*

Sursauts gamma d'ultra-longue durée

- Une nouvelle famille de sursauts ? Ou juste la queue de distribution des sursauts longs ?
- Progéniteurs différents : étoile bleue supergéante à faible métallicité, formation d'un magnétar ?
- Ils « ressemblent » aux sursauts longs : émission rémanente et association avec des supernovae.



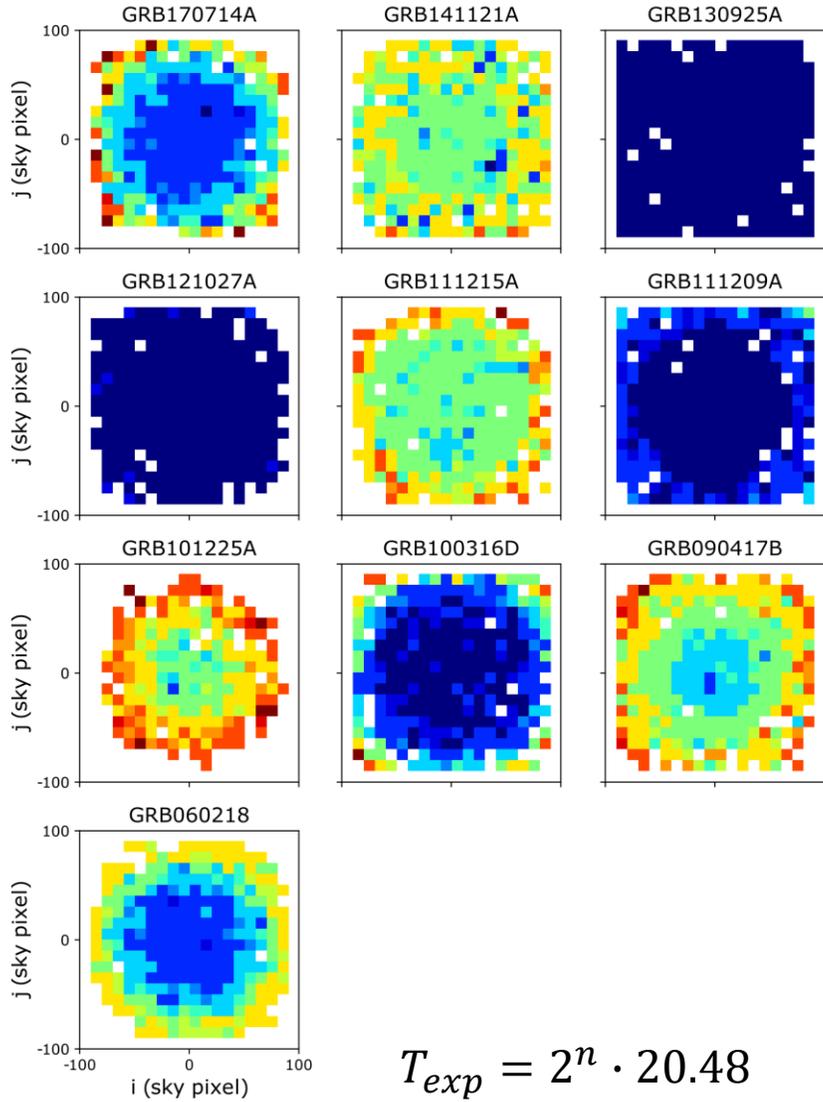
Echantillon de 10 événements détectés par *Swift*/BAT et classés comme « ultra-longs » dans la littérature (durées issues de *Levan et al., 2015* et *Virgili et al., 2013*).

GRB	T_{90}	z_0
GRB 170714A	459	0.793
GRB 141121A	481	1.47
GRB 130925A	5000	0.348
GRB 121027A	6000	1.773
GRB 111215A	373	2.1
GRB 111209A	13000	0.677
GRB 101225A	7000	0.847
GRB 100316D	1300	0.0591
GRB 090417B	2130	0.345
GRB 060218	2100	0.03342

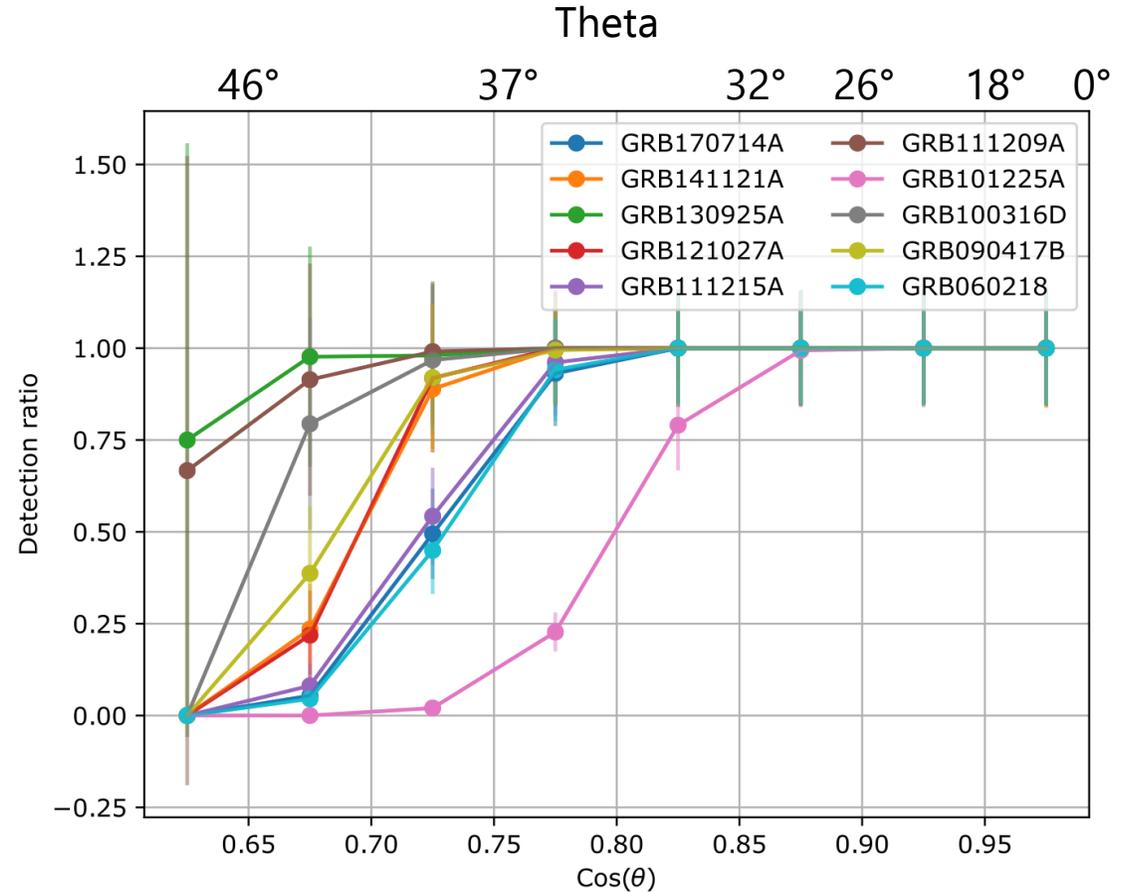
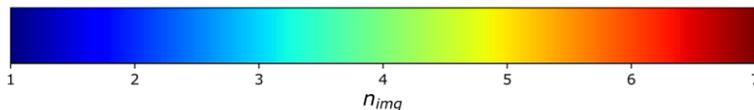
Etude de la détectabilité de ces sursauts par ECLAIRs → Simulation à 1000 positions isotropes dans le champ de vue.

Détection par le *trigger* image

Les 10 sursauts sont toujours détectés au centre du champ de vue d'ECLAIRS.



$$T_{exp} = 2^n \cdot 20.48$$

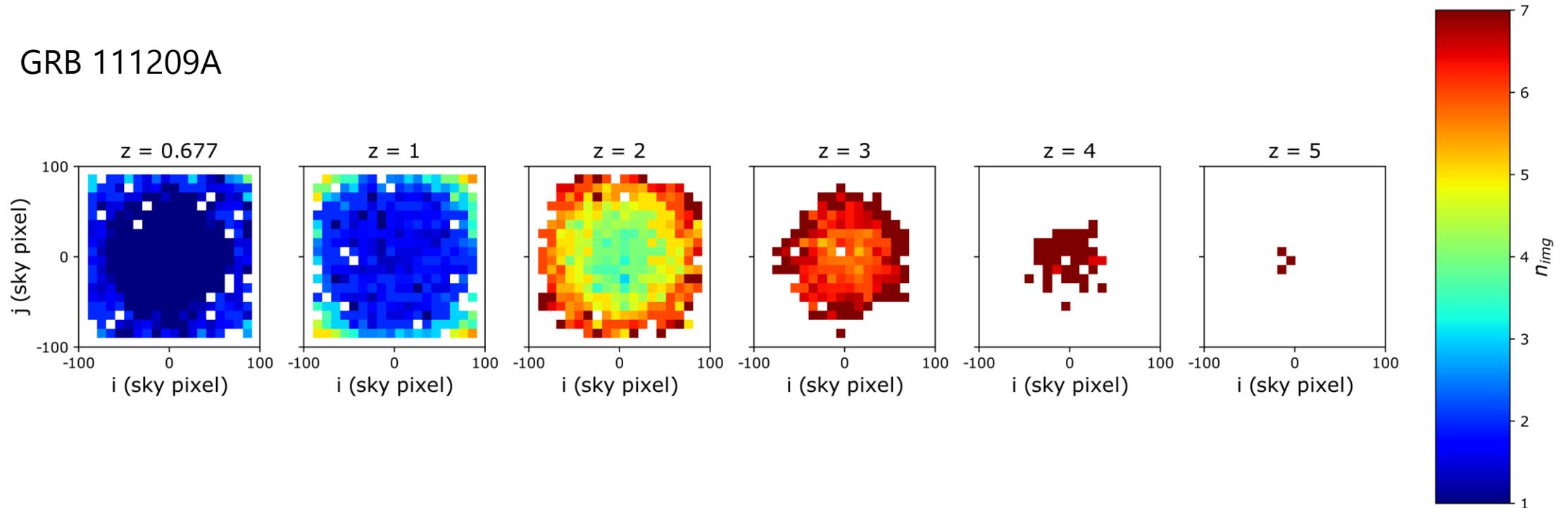


Détection par le *trigger* image en fonction de la distance

Transport de la courbe de lumière et du spectre à une plus grande distance

(code *movegrb*, Antier, Bocquier, Daigne)

GRB 111209A

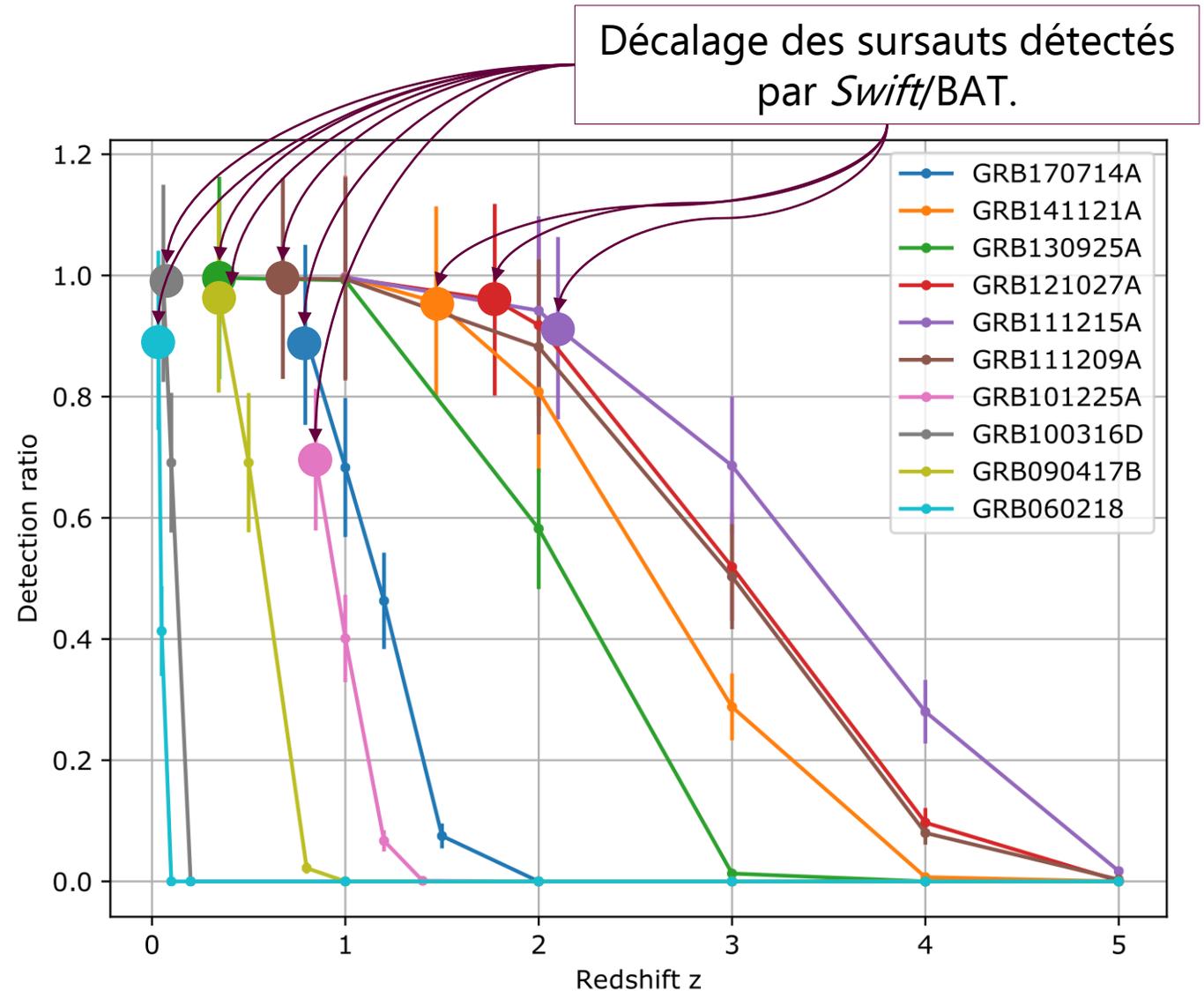


Les détections se concentrent au centre du champ de vue et sur les tranches de temps les plus longues.

Détection par le *trigger* image en fonction de la distance

Fraction de détection des 10 sursauts **ultra-longs** en fonction du redshift (par rapport au 1000 simulation).

Les sursauts visibles le plus loin avec ECLAIRs sont aussi les plus brillants vu par Swift/BAT.



Estimation du taux de détection pour ECLAIRs : méthode

Pour chaque instrument (BAT et ECLAIRs) :

- Calcul de l'horizon z_h de chaque sursaut (décalage spectral pour lequel le sursaut n'est plus visible dans le centre du champ de vue).
- Calcul du nombre de sursauts à une distance inférieure à l'horizon.

$$N(< z_h) \propto \int_0^{z_h} SFR(z) \cdot \frac{1}{1+z} \cdot \frac{dV(z)}{dz} \cdot dz \text{ avec } SFR \text{ taux de formation stellaire (Atteia et al., 2017)}$$

- Rapport entre ce nombre pour BAT et ECLAIRs.

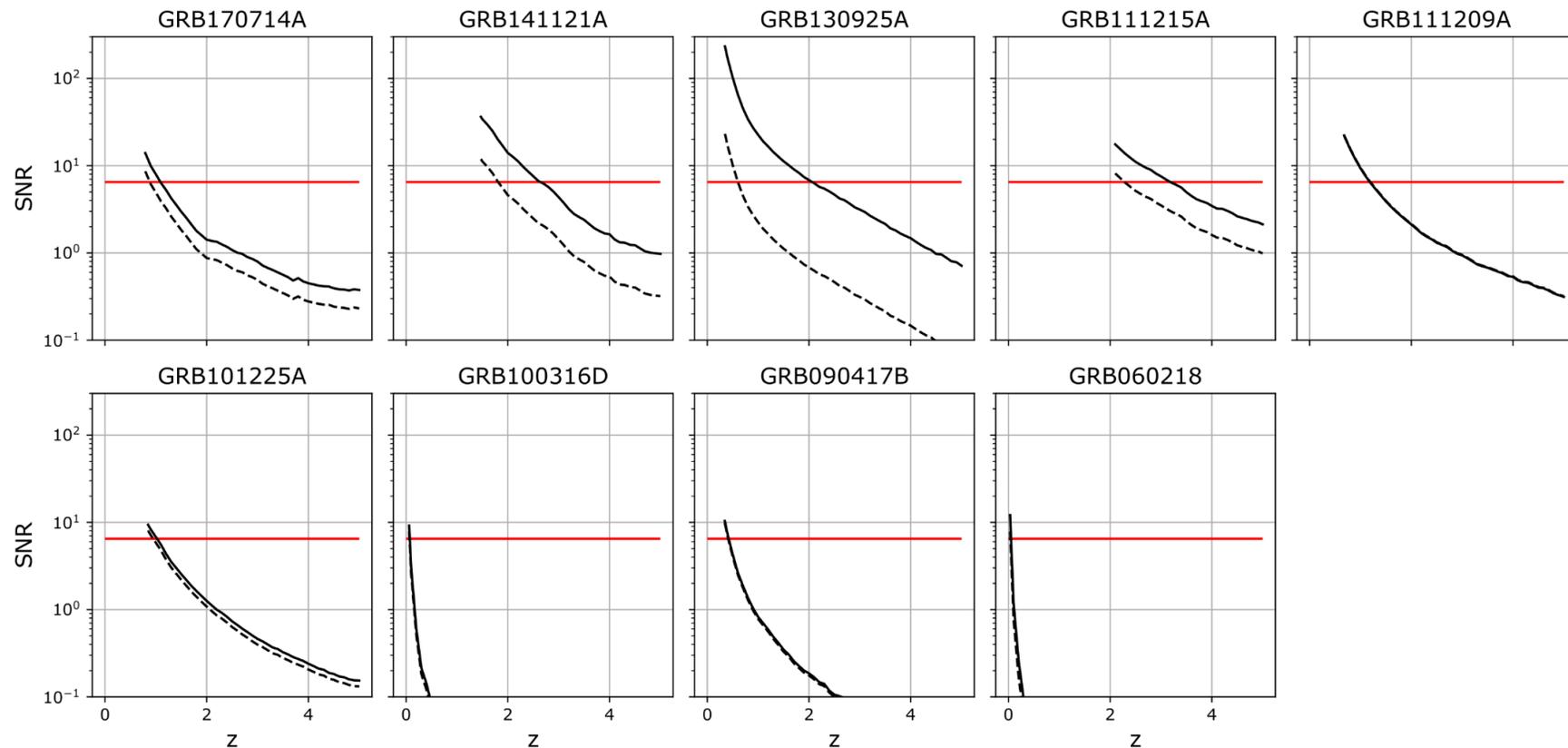
$$R = \frac{N(< z_h, ECLAIRs)}{N(< z_h, BAT)}$$

- pour chaque sursaut : combien de fois plus de sursauts de ce type ECLAIRs peut détecter par rapport à BAT.

Horizon de *Swift*/BAT : z_h, BAT

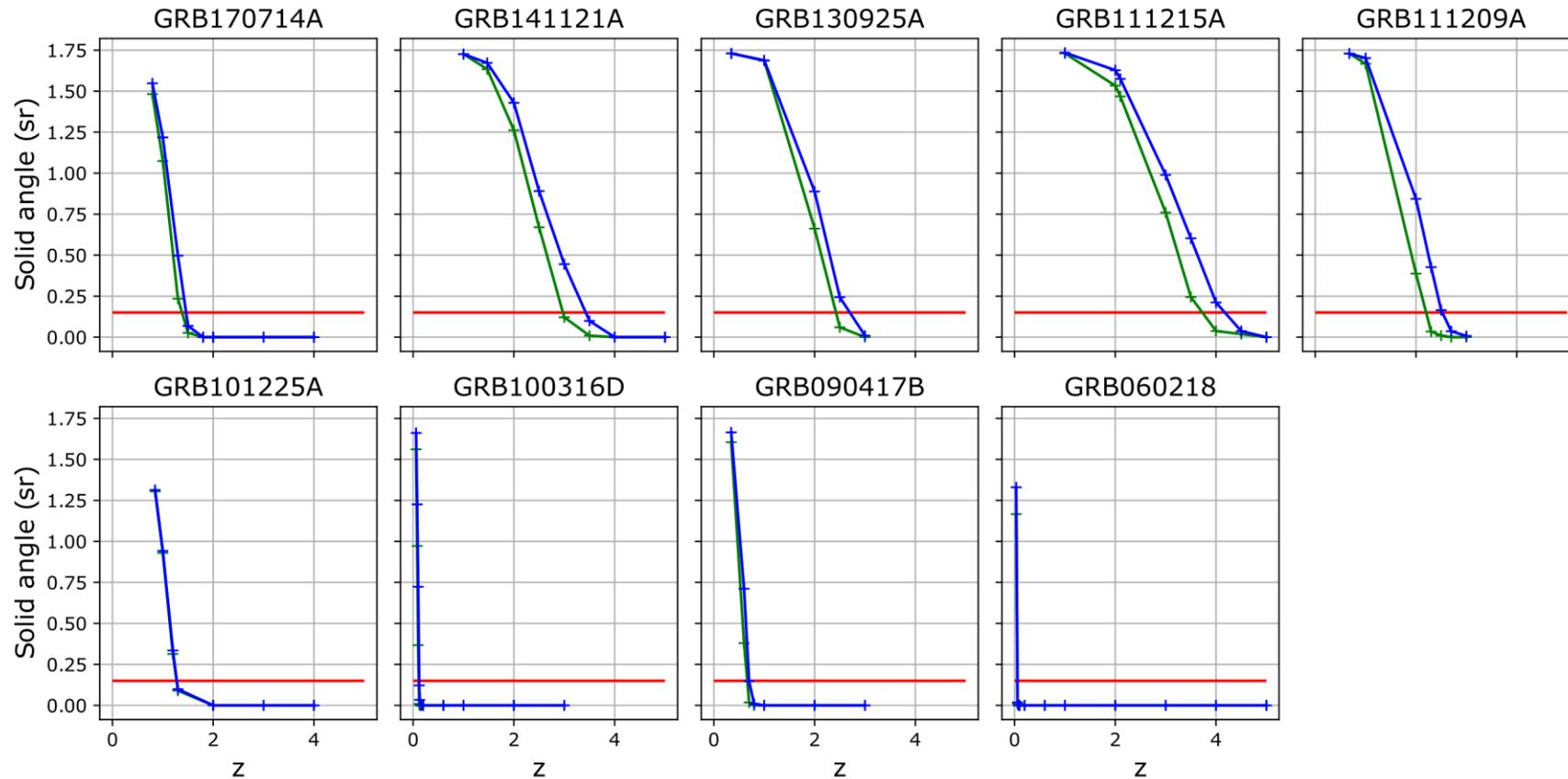
- Transport des courbes de lumière de BAT en fonction de z .
- Estimation du SNR de *Swift*/BAT dans l'axe pour chaque z .
(même seuil de détection qu'ECLAIRs : 6.5).

$$SNR_{fcfov}(z) = SNR(z_0) \cdot \frac{N_{ph}(z_0)}{N_{ph}(z)} \cdot \frac{1}{f_{coding}}$$



Horizon de ECLAIRs : z_h , *ECLAIRs*

- Simulation au décalage z .
- Durée d'exposition restreinte (encadrement de la durée de déclenchement de *Swift*/BAT : valeur *below* et *above*).
- Horizon atteint lorsque le sursaut n'est plus détecté que dans le champ de vue totalement codé.



Estimation du taux de détection pour ECLAIRs : méthode

Nom	Échelle de temps (s)	$z_{h,below}$	$z_{h,above}$	R_{below}	R_{above}
GRB 170714A	163.84 - 327.68	$1.38^{+0.12}_{-0.08}$	$1.46^{+0.04}_{-0.16}$	$1.76^{+0.36}_{-0.23}$	$2.00^{+0.12}_{-0.47}$
GRB 141121A	163.84 - 327.68	$2.97^{+0.03}_{-0.47}$	$3.43^{+0.07}_{-0.43}$	$1.16^{+0.01}_{-0.23}$	$1.32^{+0.02}_{-0.15}$
GRB 130925A	40.96 - 81.92	$2.43^{+0.07}_{-0.43}$	$2.70^{+0.30}_{-0.20}$	$1.30^{+0.06}_{-0.36}$	$1.52^{+0.20}_{-0.15}$
GRB 111215A	163.84 - 327.68	$3.73^{+0.27}_{-0.23}$	$4.18^{+0.32}_{-0.18}$	$1.13^{+0.05}_{-0.05}$	$1.20^{+0.04}_{-0.02}$
GRB 111209A	40.96 - 81.92	$2.20^{+0.10}_{-0.20}$	$2.52^{+0.18}_{-0.02}$	$3.64^{+0.27}_{-0.56}$	$4.49^{+0.44}_{-0.06}$
GRB 101225A	655.36 - 1310.72	$1.27^{+0.03}_{-0.07}$	$1.28^{+0.02}_{-0.08}$	$1.71^{+0.09}_{-0.22}$	$1.72^{+0.07}_{-0.24}$
GRB 100316D	40.96 - 81.92	$0.11^{+0.01}_{-0.01}$	$0.12^{+0.00}_{-0.02}$	$2.78^{+0.73}_{-1.07}$	$3.43^{+0.09}_{-1.71}$
GRB 090417B	163.84 - 327.68	$0.66^{+0.04}_{-0.06}$	$0.70^{+0.00}_{-0.10}$	$3.75^{+0.62}_{-0.95}$	$4.37^{+0.01}_{-1.57}$
GRB 060218	40.96 - 81.92	$0.06^{+0.00}_{-0.02}$	$0.06^{+0.00}_{-0.02}$	$0.54^{+0.14}_{-0.36}$	$0.56^{+0.12}_{-0.39}$

Somme : $17,77^{+2,38}_{-4,03}$ | $19,41^{+1,11}_{-3,91}$

Rapport global avec un seuil bas différent de 4 keV :

- 7 keV : $1,10^{+0,16}_{-0,24}$
- 10 keV : $0,97^{+0,18}_{-0,29}$

- 9 sursauts détectés par Swift/BAT
- Environ 18 détectés par ECLAIRs
- Rapport global : $1,97^{+0,26}_{-0,45}$.
- Corrections :
 - Temps d'observation efficace d'ECLAIRs (avec Terre et SAA) : 56% vs 75% pour BAT.
 - Champ de vue 2.04 sr vs 2.3 pour BAT.
 - **Ratio global** : $1,30^{+0,17}_{-0,30}$

Seuil bas sujet à un biais instrumental.

Conclusion et Perspectives

Conclusion

- Caractérisation des perturbations pour l'imagerie longue exposition (CXB modulé par la Terre et sources connues)
 - élargissement de la distribution du SNR et maxima à haut SNR.
- Etude des méthodes de traitement (correction et analyse des images) dont une **nouvelle méthode à base d'ondelettes** (*Dagoneau et al., in prep*) qui ne demande pas d'hypothèse sur la forme du CXB → **implémentées dans le logiciel embarqué.**
- Construction d'un catalogue de sources connues (*Dagoneau et al., 2020, A&A*) (caractérisation de l'influence et préparation de la correction à bord) → **utilisé par le logiciel embarqué.**
- Application à l'imagerie longue exposition : gain par rapport à *Swift*/BAT pour ces sursauts détectés par Swift (*Dagoneau et al., 2020, ExpAstron*) .
- SVOM ouvre un espace de découverte grâce à son seuil bas et à sa capacité d'imagerie longue exposition.

Perspectives personnelles: post-doc à l'APC (équipe pipeline sol ECLAIRs)

Avant le lancement :

- Interface entre logiciel embarqué et pipeline sol (ondelettes).
- Préparation des outils pour la phase de mise à poste : validation des performances et réglages des paramètres de déclenchement.
- Etude de l'imagerie très longue pose avec les données au sol (interface programme « Core » pour les sursauts gamma et « General » pour le ciel transitoire) : différences d'image.

Après le lancement :

- Traitement des premières données : analyse des méthodes d'imagerie en condition réelle.
- Re-traitement des données brutes au sol pour ajuster les paramètres de déclenchement.

Merci