HAL
open science

Réalisation de grands plans de détection pixélisés pour l'astronomie gamma : contribution à l'étude et à la réalisation du module XRDPIX pour l'instrument ECLAIRs sur la mission spatiale SVOM

Karine Lacombe

▶ **To cite this version:**

Karine Lacombe. Réalisation de grands plans de détection pixélisés pour l'astronomie gamma : contribution à l'étude et à la réalisation du module XRDPIX pour l'instrument ECLAIRs sur la mission spatiale SVOM. Instrumentation et méthodes pour l'astrophysique [astro-ph.IM]. Université Paul Sabatier - Toulouse III, 2019. Français. NNT : 2019TOU30326 . tel-03253433

HAL Id: tel-03253433

https://theses.hal.science/tel-03253433v1

Submitted on 8 Jun 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THÈSE

En vue de l'obtention du

DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par : *l'Université Toulouse 3 Paul Sabatier (UT3 Paul Sabatier)*

Présentée et soutenue le *28/11/2019* **par :**

Karine LACOMBE

Réalisation de grands plans de détection pixelisés pour l'astronomie gamma : contribution à l'étude et à la réalisation du module XRDPIX pour l'instrument ECLAIRs sur la mission spatiale SVOM

JURY

Jean-Luc ATTEIA	Directeur de thèse	IRAP - UPS
Philippe LAURENT	Rapporteur	APC
Sandro MEREGHETTI	Rapporteur	NAF IASF
Frédéric PIRON	Examinateur	LUPM
Jean-François OLIVE	Examinateur	IRAP - UPS
François LEBRUN	Examinateur	APC
Aline MEURIS	Examinatrice	CEA
Philippe GUILLEMOT	Invité	CNES

École doctorale et spécialité :
SDU2E : Astrophysique, Sciences de l'Espace, Planétologie
Unité de Recherche :
Institut de Recherche en Astrophysique et Planétologie (UMR 5277)
Directeur de Thèse :
Jean-Luc ATTEIA
Rapporteurs :
Philippe LAURENT et *Sandro MEREGHETTI*

Table des matières

Remerciements . . . 5
Résumé . . . 7
Abstract . . . 8

1 Introduction **9**

2 Imagerie des sources transitoires à haute énergie **24**
2.1 Pourquoi observer des sources transitoires ? . . . 24
2.1.1 Les sursauts gamma : un exemple de sources transitoires . . . 24
L'origine de ces flashs étonnants . . . 25
Pourquoi détecter des sursauts gamma ? . . . 28
Mesurer l'énergie des sursauts gamma . . . 29
Quelques définitions pour la suite . . . 31
2.1.2 Pourquoi faire de la spectro-imagerie de sources transitoires X/gamma ? . . . 31
2.2 La physique de détection . . . 34
2.2.1 Les interactions physiques avec la matière . . . 34
2.2.1.1 L'interaction des particules (légères, lourdes, chargées ou neutres) . 35
Les ceintures de Van Allen : un microcosme de particules chargées . . 36
Les particules α . . . 36
L'interaction des électrons . . . 37
L'interaction des neutrons . . . 38
2.2.1.2 L'interaction du rayonnement gamma avec la matière . . . 39
L'effet photoélectrique . . . 40
L'effet Compton . . . 41
La production de paires . . . 42
L'atténuation des rayonnements électromagnétiques . . . 42
2.2.1.3 Conclusion . . . 45
2.2.2 Les détecteurs de photons X et gamma et leur électronique de lecture . . . 46
2.2.2.1 Les diodes de germanium et les scintillateurs . . . 47
2.2.2.2 Des nouveaux photo-détecteurs : les SiPMs . . . 49
2.2.2.3 Les semi-conducteurs CdTe . . . 51
Principe et description . . . 52
Performance du CdTe . . . 53
Calcul du courant de fuite à partir de la densité de charges à l'équilibre 54
2.2.2.4 Conclusion . . . 61
2.3 L'instrumentation pour l'astronomie gamma . . . 61
2.3.1 Le comptage de photons . . . 62
Notion de seuil . . . 62
Amplification du signal détecté . . . 63
Statistique de comptage . . . 63
Rapport S/B . . . 64
Notion de temps mort . . . 65
2.3.2 La spectroscopie . . . 66

2.3.3 L'imagerie gamma . . . 68
2.4 Les paramètres de détection des sursauts gamma . . . 69
2.4.1 Les paramètres des instruments . . . 69
2.4.2 Les paramètres du ciel . . . 71
2.4.3 Les paramètres des sursauts . . . 72
2.5 Quelques simulations pour la détection de sursauts . . . 73

3 L'instrument ECLAIRs de la mission sino-française SVOM 78
3.1 Les instruments de SVOM . . . 80
3.1.1 Les instruments spatiaux de SVOM . . . 80
3.1.2 Le segment sol . . . 83
3.2 L'instrument ECLAIRs . . . 83
3.2.1 Le plan de détection, avec ses électroniques associées et la régulation thermique 84
3.2.2 Le masque codé et le blindage . . . 88
3.2.3 Les logiciels UGTS et Trigger . . . 90
3.3 Les performances scientifiques d'ECLAIRs . . . 93
3.3.1 La surface efficace . . . 93
3.3.2 Le champ de vue . . . 95
3.3.3 Le bruit de fond . . . 95
3.3.4 La sensibilité . . . 98
3.4 L'imagerie d'ECLAIRs . . . 100
3.4.1 La précision de localisation . . . 100
3.4.2 L'imagerie à bord . . . 102
3.5 Le déclenchement d'ECLAIRs . . . 103
3.5.1 Le déclenchement ou trigger en vol . . . 103
3.5.2 La configuration du déclenchement . . . 104
3.5.3 Le déclenchement au sol « Off-line » . . . 104
3.6 La spectroscopie d'ECLAIRs . . . 105
3.7 Les opérations en vol et de calibration d'ECLAIRs . . . 105
3.7.1 Les modes de fonctionnement d'ECLAIRs . . . 106
3.7.2 La commande/contrôle d'ECLAIRs . . . 107
3.8 Les types de données d'ECLAIRs . . . 108
3.9 La science d'ECLAIRs . . . 108
3.9.1 La science des sursauts gamma . . . 108
3.9.2 La science hors sursauts . . . 109
3.9.2.1 La détection des sources transitoires . . . 109
3.9.2.2 La surveillance du ciel . . . 109
3.10 Conclusion . . . 110

4 Développement du module XRDPIX 111
4.1 Description du détecteur hybride de la caméra ECLAIRs . . . 112
4.2 Caractéristiques physiques et techniques des composants de l'hybride . . . 113
4.2.1 Les détecteurs CdTe Schottky . . . 113
4.2.2 Les substrats . . . 116
4.2.3 La Céramique Détecteurs . . . 118
4.2.4 La Céramique ASIC . . . 119
4.2.5 Le module XRDPIX . . . 121
4.3 Le fonctionnement d'un XRDPIX . . . 126
4.3.1 Le fonctionnement analogique . . . 127
4.3.2 La communication avec l'électronique de lecture secteur . . . 129

5 Performance du module XRDPIX 133

5.1 Notre source étalon : l'Americium 241 133
5.1.1 Les caractéristiques de la source de ^{241}Am 133
5.1.2 Un exemple de comptage avec la source radioactive ^{241}Am 136
5.2 Caractérisation des sous-ensembles Céramique Détecteurs et Céramique ASIC 137
5.2.1 Les sources de bruit 137
5.2.2 Les performances des Céramiques Détecteurs 143
5.2.3 Les performances des Céramiques ASIC 150
5.2.4 L'étude du couplage des sous-ensembles 157
5.3 Les performances des XRDPIX 161
5.3.1 Les performances des XRDPIX modèles de vol 165
5.3.1.1 La résolution spectrale des modules XRDPIX FM 167
5.3.1.2 Le seuil bas en énergie des modules XRDPIX FM 174
5.3.1.3 Le comptage des modules XRDPIX FM 181
5.3.1.4 Quelques corrélations 185
5.3.2 Des études spécifiques sur un module XRDPIX FM 187
5.3.2.1 L'évolution des performances à plus basse température d'un XRDPIX 188
5.3.2.2 L'effet du temps de polarisation sur la résolution et sur le comptage d'un XRDPIX 190
5.3.3 Quelques performances de la caméra prototype 192
5.3.3.1 Les performances du ProtoDPIX selon plusieurs configurations (HT ; tp) 195
5.3.3.2 L'évolution dans le temps de la résolution et du taux de comptage . 196

6 Perspectives instrumentales pour le futur 201
6.1 Les problématiques des grands télescopes 203
6.1.1 Les grandes surfaces 203
6.1.2 Un grand champ de vue 203
6.1.3 La gamme d'énergie 203
6.1.4 La résolution angulaire et le nombre de pixels 204
6.1.5 La modularité 205
6.1.6 Le multiplexage 206
6.2 Parmi les télescopes du futur : un Super ECLAIRs ! 206
Réflexion sur un autre type de détecteur de sources transitoires 213
6.3 Epilogue 215

Figures 228

Tableaux 243
A.1 Exemple d'utilisation des tables du NIST 245
A.2 Procédure de mise en route de la caméra d'ECLAIRs 246
A.3 Table des critères pris en compte pour le classement des XRDPIX 247
A.4 BIPM de ^{241}Am 248
A.5 Combinaison des sélections pour la sélection XRDPIX finale 249
A.6 Liste des 25 modules XRDPIX à positionner sur la caméra de vol - ELS01 250
A.7 Définition du point de fonctionnement 251
A.8 Consommation des modules XRDPIX 254

Remerciements

Je tiens à exprimer mes remerciements aux membres du jury qui ont accepté d'évaluer mes travaux de thèse. Merci au président du jury, Jean-François Olive, et aux examinateurs Aline Meuris, Frédéric Piron et François Lebrun pour leurs conseils et leur soutien. Merci infiniment aux rapporteurs, Messieurs Sandro Mereghetti et Philippe Laurent, d'avoir procédé à une lecture très soigneuse de mon manuscrit, et qui m'ont aiguillée vers des améliorations pertinentes. Merci à Philippe Guillemot, de son intérêt dans mes travaux de thèse et de sa présence encourageante à ma soutenance.

J'adresse mes sincères remerciements à mon directeur de thèse Jean-Luc Atteia pour sa disponibilité, son expertise, son humour et son amitié ; il m'a permis un accès plus large au monde de la recherche, en particulier celui de l'Astrophysique, d'affirmer mes réflexions, d'approfondir mes connaissances, et de faire face à ma grande timidité !

Je remercie mes collègues du projet ECLAIRS : ma collègue et amie Carine Amoros, qui m'a secondée les derniers mois de rédaction de ce manuscrit, pour mener les activités d'AIV/AIT, devenues intenses en cette phase de projet, mon collègue électronicien Vincent Waegebaert, mon chef de projet pendant près de dix ans, Roger Pons, qui m'a soutenue dans mes choix techniques, dans mes stratégies de développement et de tests des modules XRDPIX, et qui m'a poussée à mener à bien mes idées, pourtant nombreuses et parfois même farfelues !

Je tiens aussi à remercier mon jeune collègue Idriss Belkacem qui, s'il ne travaillait pas au CNRS comme instrumentaliste, pourrait faire une carrière d'humoriste, allégeant mon travail quotidien par ses blagues et autres animations comiques ! Je remercie ma collègue et amie Pascale Ramon, qui maîtrise la langue française comme personne, et qui m'a beaucoup aidée à la rédaction de mes articles, Baptiste Houret pour sa patience, son aide technique et surtout pour son soutien sans faille. Je remercie également mon ancien collègue du LATMOS, Mustapha Meftah, pour ses conseils amicaux.

Je suis reconnaissante envers l'équipe SAFRAN à Valence (où je suis partie quelques fois en mission !), en particulier le chef de projet Jean-Luc Orlandini, qui a été pour moi un collaborateur de choix, conciliant les aspects techniques avec une relation humaine enrichissante, ainsi que Françoise Merle, pour sa prévenance et qui a su me conseiller sur les aspects financiers et Jean-Bernard Dezord, pour son expertise de technologue et nos nombreux échanges techniques.

Mes remerciements vont aussi en direction des collègues devenus retraités et amis, Michel Ehanno, qui m'a transmis son expertise, en particulier dans le domaine de la spectroscopie, et avec qui tout a commencé, ainsi que Jacques Landé et Gilbert Rouaix, grâce auxquels j'ai perfectionné mes compétences, notamment en électronique analogique, et acquis quelques notions de mécanique, toujours dans une ambiance amicale et rendue plus légère grâce à eux.

Merci beaucoup à ma famille et mes amis, qui m'ont encouragée à concrétiser ce désir de thèse : mes parents Sylvette et Michel, mes sœurs Sophie, Stéphanie et Estelle, mon ancien collègue devenu ami proche, Kévin Sarcelle, mes amies d'enfance et de fac, Marie Daubas et Christine Etchebarne, et ma mamie, qui a toujours cru en moi (même si c'était pour des métiers artistiques !).

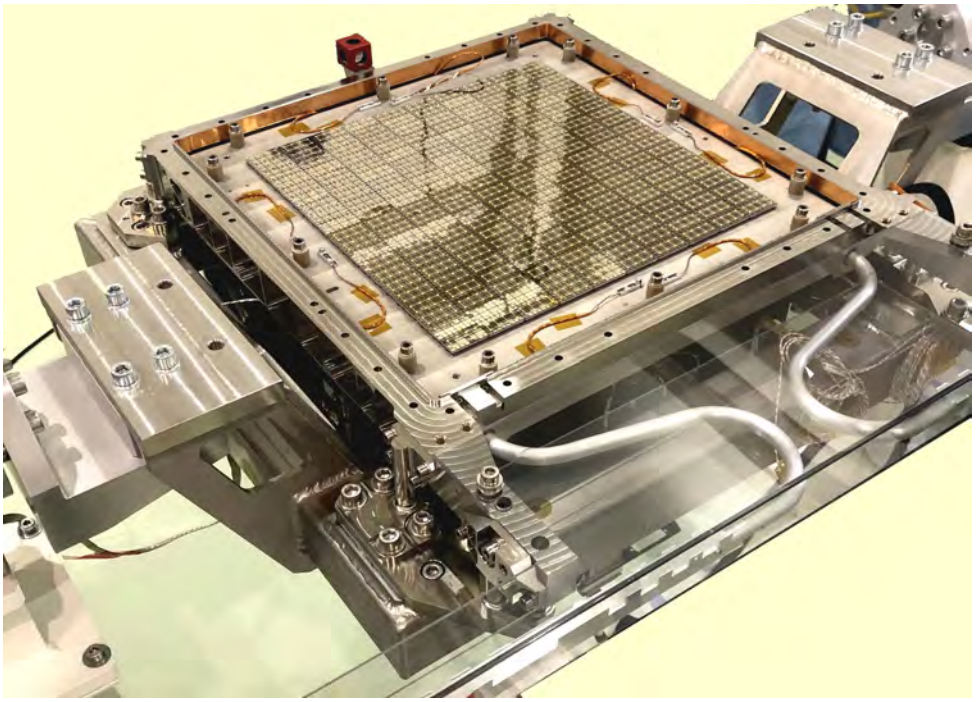
Un grand merci à tous mes collaborateurs des équipes du projet ECLAIRs, et des autres : les collègues de l'IRAP (Jean-Pascal Dezalay, Laurent Bouchet, Nicole Briat, Sélim Benguesmia, Jean-Michel Glorian, Wilfried Marty, Damien Rambaud, Marie Larrieu, Yves Daydou, Michel Dupieux,...), ainsi que ceux des laboratoires de l'APC (Alain Givaudan et Cyril Lachaud) et du CEA à Saclay, je pense notamment à Olivier Limousin, passionné comme moi

par la physique des semi-conducteurs, qui m'a beaucoup aidée en partageant son savoir sur les détecteurs CdTe, Olivier Gevin, avec qui j'ai pu découvrir la partie ASIC, Bertrand Cordier pour sa confiance et son intérêt dans mes travaux, et Henri Triou, dont la bonne humeur me contamine à chacune de nos rencontres.

Une pensée aussi aux familles de mes collègues de l'IRAP qui sont partis trop tôt...Pierre, Laurent, Anne-Marie, Claude.

Merci aux ingénieurs du CNES, pour leurs discussions et les nombreux échanges sur les exigences techniques du domaine spatial. Tous n'ont cessé de m'encourager durant ces cinq années d'études, durant lesquelles j'ai dû porter la double « casquette » d'Ingénieure de Recherche et de Doctorante. Merci à Olivier Simonella, Karine Mercier, Laurent Perraud, Martine Jouret, et tant d'autres qui ont participé au projet SVOM depuis le début. J'ai une pensée toute particulière pour François Gonzalez, qui m'a accordé sa confiance, même dans les moments les plus critiques du projet ECLAIRs.

Enfin, je suis maman, et je veux remercier mes enfants, qui, même si pour eux l'école ne devrait pas être obligatoire et même s'ils ne comprennent toujours pas pourquoi je me suis lancée dans cette aventure à mon âge, m'ont apporté leur joie et leur amour quotidiens.



Bon voyage spatial petits modules XRDPIX !

Résumé

ECLAIRs, l'imageur à rayons X dur de la mission sino-française SVOM, est dédié à la détection et à la localisation en quasi temps réel de sources transitoires cosmiques dans la plage d'énergie allant de 4 à 150 keV. Cet instrument est une caméra grand champ, munie d'un plan de détection pavé de 6400 détecteurs Schottky CdTe, qui permet de créer des images du ciel en rayons X durs grâce à un système de localisation appelé « masque codé ». Les travaux exposés dans ce manuscrit détaillent la conception, la réalisation et la mesure des performances de modules hybrides de 32 détecteurs lus par un ASIC (appelés modules XRDPIX), qui constituent les briques de base du plan de détection, et qui permettent d'atteindre des performances inégalées pour ce type d'instrument avec un seuil en énergie égal à 4 keV.

Après avoir posé la problématique de détection des sources cosmiques transitoires en rayons X, en s'appuyant sur le contexte astrophysique de la mission SVOM, puis détaillé son instrument principal, j'expose, dans ce mémoire de thèse, mon travail sur la réalisation de grands plans de détection pixélisés pour l'astronomie gamma, avec en particulier ma contribution à l'étude et à la réalisation du module XRDPIX. Le développement des modules XRDPIX, fait appel à la fois à une conception faible bruit et à l'utilisation de technologies innovantes. Les détecteurs CdTe sont polarisés jusqu'à -450 V et régulés à basse température (nominalement $-20°$C) afin de minimiser le courant de fuite et de limiter les effets de polarisation. Le seuil bas en énergie requis pour la mission spatiale est atteint grâce à une caractérisation approfondie des éléments constituant les 200 XRDPIX de vol, qui forment la caméra ECLAIRs.

Je présente de façon détaillée les caractéristiques physiques et technologiques de ces modules, les différentes étapes de leur développement, en justifiant les solutions et les compromis techniques qui ont jalonné leur fabrication.

Ensuite, en me basant sur un échantillon statistique abondant, obtenu lors des nombreux tests et qualifications réalisés sur plusieurs centaines de modules et sous-modules, j'expose les résultats de mesures qui démontrent les excellentes performances du module XRDPIX, en termes de résolution spectrale, de seuil bas en énergie, de gain et de comptage. Des études annexes sont également montrées, afin de compléter la validation des XRDPIX par l'analyse de l'influence de divers paramètres physiques sur les performances, comme par exemple la température.

En conclusion, grâce à ces analyses de données abondantes, et à des modélisations du bruit total équivalent, je propose des réglages optimaux pour deux paramètres de configuration clés : la valeur de polarisation pour la haute tension et le peaking time, qui permettent d'obtenir le seuil en énergie de 4 keV exigé par la mission SVOM, avec une bonne uniformité sur l'ensemble du plan de détection.

Finalement, je présente ce retour d'expérience, couplé à l'étude des paramètres clés qui déterminent la sensibilité d'un imageur grand champ dans le domaine des X durs (surface de détection, gamme d'énergie, champ de vue,...), ce qui m'amène à proposer des pistes pour la réalisation d'instruments ambitieux qui permettront des gains significatifs en sensibilité dans le futur.

Abstract

ECLAIRs, the hard X-ray coded-mask imaging and trigger telescope onboard the Sino-French SVOM mission, is dedicated to the near real-time detection and localization of cosmic transient sources in the energy range between 4 and 150 keV. This instrument is a wide-field camera, equipped with a detection plane surfaced with 6400 Schottky CdTe detectors, which makes it possible to create images of the sky in hard X-rays thanks to a localization system called a « coded mask ».

In this manuscript I describe the innovating design and the development of « XRDPIX modules», hybrid matrices of 32 detectors read by a dedicated ASIC, which constitute the elementary bricks of the detection plane, and which make it possible to obtain unprecedented performance for this type of instrument with a low energy threshold better than 4 keV. Then I discuss the industrial production, some examples of technical issues encountered and finally, the performance measurements at each stage of development.

After posing the problem of detection of X-rays transient cosmic sources, by relying on the astrophysical context of the SVOM mission, then detailed its main instrument, I present my work in the realization of large pixelated detection planes for gamma astronomy, with in particular my contribution to the study and realization of the XRDPIX detection module. The development of XRDPIX involves both a very low noise design and the use of innovative technologies. CdTe detectors are biased down to -450 V and regulated at low temperature (nominally $-20°$C) to minimize leakage current and limit bias effects. The low energy threshold required for the space mission is reached thanks to an in-depth characterization of the elements constituting the 200 XRDPIX modules, for building the ECLAIRs camera.

I outline in detail the physical and technological characteristics of these detection modules, the different stages of their development, justifying the solutions and the technical compromises that have marked their manufacture.

Based on significant statistical data, obtained during numerous tests and qualifications stages carried out on a hundred models, I then present the results of measurements which demonstrate the excellent performance of the XRDPIX module, in terms of spectral resolution, low energy threshold, gain and counting. Additional studies are also shown, in order to complete the validation of XRDPIX by analyzing the influence of various physical parameters on performance, such as temperature, for example.

In conclusion, thanks to these analyzes of profuse data, and simulations of total equivalent noise, I propose optimal settings for two key configuration parameters : the bias value for the high voltage and the peaking time, which achieve the energy threshold of 4 keV required by the SVOM mission, with good uniformity over the entire detection plan.

Finally, this experience feedback, coupled with the study of the key parameters which determine the sensitivity of a wide field imager in the hard X domain (detection surface, energy range, field of view, etc.) allows me to propose avenues for the realization of ambitious instruments that will allow significant gains in sensitivity in the future.

Chapitre 1

Introduction

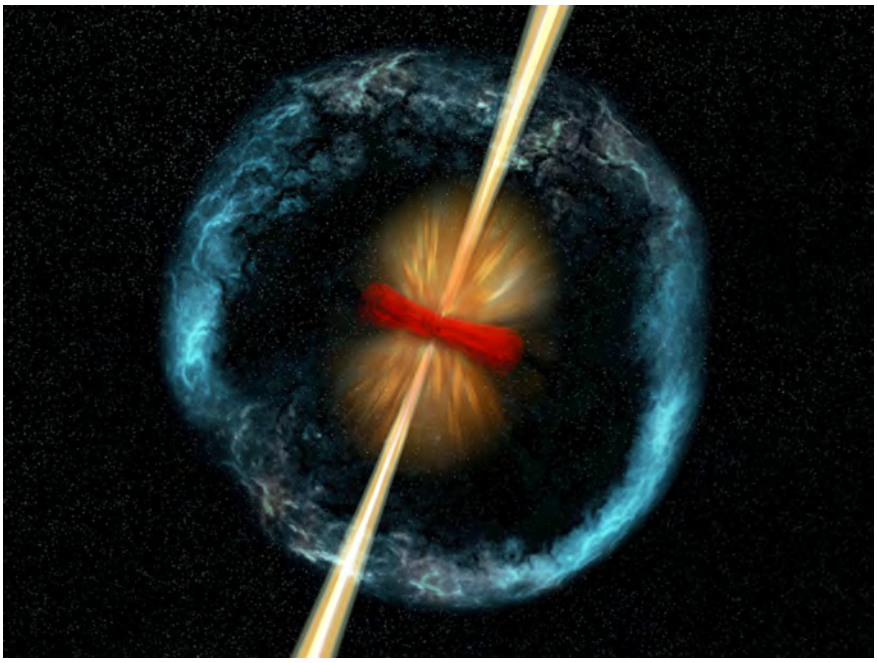


FIGURE 1.1 – Illustration des conséquences d'une fusion d'étoiles à neutrons, comprenant la génération d'un sursaut gamma. Au centre se trouve un objet compact - soit un trou noir, soit une étoile à neutrons massive - avec un jet relativiste représenté en jaune. Crédit : NASA/CXC/M.Weiss

L'astronomie est une quête continue pour la compréhension des corps célestes : certains semblent avoir toujours été là, d'autres, plus furtifs, sont observables grâce aux ondes électromagnétiques qu'ils émettent brièvement. Les astrophysiciens ne s'arrêtent pas à la simple contemplation de ces sources : ils cherchent à les localiser de façon précise, à comprendre les phénomènes qui les produisent, à mesurer les propriétés des rayonnements qu'elles émettent, comme leur flux ou leur polarisation. Un but majeur les unit : comprendre l'Univers.

Pendant des siècles, l'observation du ciel s'est basée sur la collecte des photons visibles, avec l'addition d'images célestes et de spectres sur plusieurs décennies. Toutefois, de nombreux objets brillent intensément hors du spectre visible, avec par exemple des disques de

plasma autour d'étoiles effondrées qui, élevés à de très hautes températures, rayonnent dans les domaines X et gamma.

Plus récemment, l'Astrophysique s'est ouverte aux « nouveaux-messagers » que sont les rayons cosmiques, les neutrinos et les ondes gravitationnelles, dont les premiers signaux ont été observés très récemment, en 2015.

Chacun des grands domaines du spectre électromagnétique nous informe sur des régions où règnent des conditions physiques particulières. Par exemple le domaine des hautes énergies peut révéler l'existence de particules accélérées (les rayons cosmiques) dont l'origine reste à élucider. Il est néanmoins difficile d'observer depuis le sol des astres actifs hors du domaine visible car l'atmosphère terrestre constitue un écran opaque à la plupart des rayonnements qu'ils produisent. En effet, les rayonnements de longueurs d'ondes inférieures à celles du domaine visible, sont totalement absorbés dans la haute atmosphère terrestre. Les photons des domaines ultra-violet, X et gamma sont alors inaccessibles depuis le sol et leur détection nécessite l'utilisation de ballons stratosphériques, ou de satellites artificiels. C'est seulement à partir des années soixante, en pleine guerre froide durant laquelle la conquête spatiale opposait les États-Unis à l'Union Soviétique, que les astronomes ont eu l'opportunité d'envoyer des télescopes dans l'espace.

Depuis, un ciel nouveau est apparu et les télescopes terrestres et spatiaux se complètent pour offrir une vision de l'univers sur plus de vingt décades du spectre électromagnétique. Nous comprenons alors que l'astronomie des hautes énergies est une science jeune et étroitement liée aux progrès technologiques utiles à la satellisation de nouveaux télescopes.

Le domaine de recherche discuté dans ce manuscrit concerne la détection des sources transitoires à X-durs : nous consacrerons notre étude à la réalisation de grands plans de détection pixélisés pour l'astronomie gamma, en s'intéressant à la problématique de développement des détecteurs spatiaux spécifiques à ce domaine. Nous prendrons l'exemple de l'instrument ECLAIRs de la mission sino-française SVOM, télescope contemporain dont nous connaissons bien les caractéristiques techniques et les contraintes imposées par le défi technologique que représente la construction d'un tel instrument. Nous aborderons les difficultés liées à sa conception et à sa technologie et ouvrirons notre étude à la perspective d'un détecteur de nouvelle génération, doté d'une plus grande sensibilité.

Notre travail se situe dans la gamme des longueurs d'ondes les plus courtes du spectre électromagnétique, correspondant aux photons les plus énergétiques. C'est ainsi que les rayons X et gamma, caractérisés par leur énergie dépassant le kiloélectronvolt (keV), sont au cœur de ce mémoire de thèse.

Les photons X et gamma ont des origines différentes : les premiers sont dus à des transitions quantiques des électrons les plus liés aux atomes (spectres de raies et continus) quand les photons gamma sont dus à des transitions nucléaires (spectre d'émissions discontinu). Toutefois, ils peuvent être aussi induits par l'accélération ou la décélération de particules chargées. Contrairement aux photons du rayonnement visible qui sont focalisés via un système optique, les propriétés physiques des photons X et gamma les rendent particulièrement difficiles à collecter. C'est ainsi que les astronomes doivent intégrer ces contraintes dans la mise en œuvre des télescopes dédiés à leur observation.

Tout d'abord, les rayons gamma ont une longueur d'onde très inférieure aux distances interatomiques (de l'ordre de quelques 10^{-10} m dans un cristal) rendant quasi impossible toute réflexion spéculaire ou diffraction, si bien que la notion de « concentrateur de lumière » ne peut pratiquement pas s'appliquer. Il faut donc jouer sur la surface collectrice pour augmenter péniblement la sensibilité de la caméra, proportionnelle à la racine carrée de la surface.

Ensuite, à puissance rayonnée égale, un astre actif émet bien moins de quanta de rayonnement dans le domaine gamma que dans le domaine visible par exemple, chaque photon emportant une très grande quantité d'énergie. Ce faible nombre de photons émis, ajouté à la grande difficulté à les concentrer, conduisent à des temps d'exposition très longs pour permettre la détection précise d'objets célestes. Enfin, les télescopes embarqués, en plus d'imposer de fortes contraintes technologiques, sont soumis aux particules du rayonnement cosmique et aux particules piégées dans les ceintures de radiation de la Terre. Il en résulte un bruit de fond élevé, que seuls des blindages épais, passifs ou actifs, peuvent diminuer. Ce bruit provient, soit du rayonnement cosmique lui-même, capable de déclencher des signatures similaires à celle des photons que l'on souhaite étudier, soit de la production de photons ou de particules secondaires. De par l'étendue spectrale du rayonnement gamma, il n'est pas simple de trouver le détecteur adéquat, qui réponde aux exigences de sensibilité sur l'ensemble du spectre ; c'est pourquoi, en divisant ce dernier en plusieurs bandes spectrales, nous pouvons choisir la technologie idéale à notre observation parmi moult détecteurs de natures différentes. Par exemple, parmi les rayons gamma de basse énergie, nous pouvons étudier des photons qui s'étendent sur plusieurs décades, avec des énergies entre 10 keV et 10 MeV.

Face à tous ces obstacles, réaliser des images de sources transitoires célestes émettant des photons très pénétrants pour en faire le spectre sur deux décades, et qui plus est depuis l'espace, est un vrai challenge !

Le détecteur de *SVOM*/ECLAIRs, qui sera décrit en détail dans les chapitres suivants (3 et 4), est basé sur un semi-conducteur, le tellurure de cadmium (CdTe), qui permet de couvrir une gamme large en énergie, et qui a démontré ses performances sur la caméra ISGRI, du télescope IBIS monté à bord du satellite *INTEGRAL* et ensuite sur le détecteur de *SWIFT*/BAT. *SVOM*, en reprenant le flambeau des découvertes passées, va observer de nombreuses sources transitoires : des sursauts gamma, mais aussi des sources binaires X et des « soft gamma repeaters ».

Après un chapitre général sur les sursauts gamma et une présentation des mécanismes de détection du rayonnement gamma et des techniques d'imagerie dans le domaine des rayons X durs, nous décrirons l'instrument ECLAIRs depuis ses objectifs scientifiques jusqu'à son développement et son fonctionnement détaillé. Nous poursuivrons sur un chapitre consacré au module de base de la caméra, appelé « XRDPIX », en analysant ses propriétés de détection pour terminer sur une question fondamentale pour les astronomes :

Quels seront les télescopes du futur ?

La réponse pouvant faire l'objet d'un grand nombre de théories et de propositions de nouvelles missions, nous limiterons l'étendue de l'étude en tentant de répondre plutôt à cette question :

Pourquoi développer des instruments spatiaux à masque codé pour la détection des sursauts gamma ?

Dans cette section introductive, nous faisons un petit tour dans le passé avec la description des instruments et missions clés qui ont échelonné l'histoire des sursauts gamma.

Découverts dans les années 60, les sursauts gamma sont longtemps restés énigmatiques [Klebesadel et al., 1973]. Quelle est leur origine ? Comment et pourquoi apparaissent-ils dans le ciel ? Autant de questions qui ont stimulé leur étude, grâce notamment à des instruments tels que BATSE de la mission spatiale CGRO (Compton Gamma-Ray Observatory) [Fishman, 2013] [Paciesas et al., 1999]. Ce remarquable instrument dédié à l'étude des rayons gamma, a détecté plus de 2000 sursauts durant ses dix années d'observation (1991-2001).

CGRO était un satellite dédié à l'observation des phénomènes astrophysiques à haute

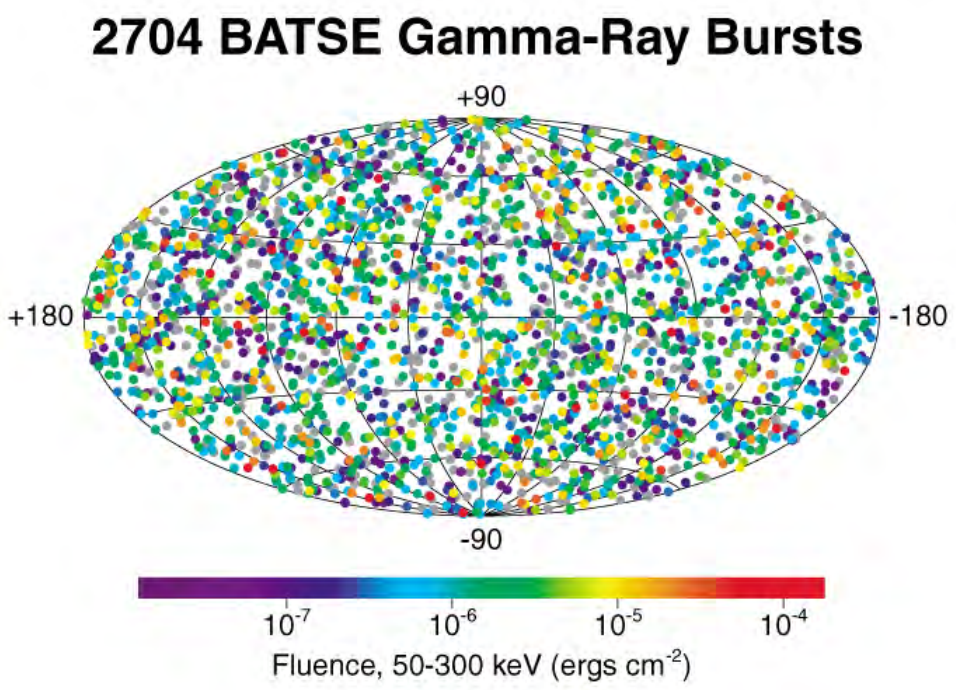


FIGURE 1.2 – Distribution de la fluence de 2704 sursauts détectés par l'instrument BATSE. Credit : NASA/BATSE

énergie, qui a fonctionné près de dix ans (1991-2000). Il comportait quatre instruments dont BATSE, qui emportait huit détecteurs constitués d'un cristal scintillateur de 50 cm de diamètre lu par un photomultiplicateur. Les détecteurs ont tous des orientations différentes, ce qui permet de reconstruire grossièrement la direction d'arrivée des sursauts en comparant le flux reçu sur chacun des détecteurs.

BATSE détecte les rayons gamma avec une grande sensibilité au regard des précédents télescopes ayant volé dans l'espace avant 1990. Ses études se sont étendues aux phénomènes célestes très énergétiques : éruptions solaires, rayons gamma, pulsars, explosions nova et supernova, disques d'accrétion de trous noirs, émissions de quasar et interactions des rayons cosmiques avec le milieu interstellaire. Beaucoup de découvertes, attendues ou complètement nouvelles, ont été faites par les instruments de l'observatoire Compton ; pourtant, il est intéressant de noter que *CGRO*/BATSE, s'il fait partie des premiers instruments dédiés à la détection de sursauts, n'utilise pas de masque codé pour localiser ces derniers.

De façon plus globale, nous allons poursuivre cette introduction en présentant l'ensemble des instruments de *CGRO*, à commencer par l'instrument EGRET, qui a produit une carte du ciel dans la gamme d'énergie supérieure à 100 MeV, dominée par l'émission des interactions entre les rayons cosmiques et le gaz interstellaire le long du plan de notre galaxie, la Voie lactée (Fig. 1.4). Certaines sources ponctuelles de cette carte sont des pulsars gamma apparaissant le long du plan galactique, et *CGRO* a permis d'en détecter cinq. Les pulsars du Crabe et Geminga se trouvent près de l'anticentre galactique, sur la droite de la carte fournie par EGRET, de la figure 1.4. L'une des principales découvertes faites par EGRET sont les blazars, qui sont un type de quasar extrêmement compact et brillant, qui émet majoritairement dans la gamme d'énergie de 30 MeV à 30 GeV. Ces objets se trouvent à des distances cosmologiques,

FIGURE 1.3 – Image du CGRO en orbite autour de la Terre. Credit : NASA

et sont constitués d'une galaxie elliptique géante active accueillant dans leur noyau un trou noir supermassif émettant un jet relativiste pointé en direction de la Terre.

Un autre instrument important à bord du *CGRO* est le télescope Compton baptisé COMPTEL, qui a fourni une carte de tout le ciel, et qui illustre ainsi la puissance de l'imagerie dans une gamme d'énergie entre 1 et 30 MeV [Diehl et al., 1997]. Cette carte révèle des concentrations exceptionnellement élevées de l'isotope radioactif ^{26}Al dans le plan de notre galaxie (Fig. 1.5). COMPTEL se compose de deux détecteurs, un scintillateur liquide (NE-213) dans la partie supérieure, et des cristaux de NaI (Iodure de sodium) dans la partie inférieure de l'instrument, qui vont interagir avec les rayons gamma pour produire de la lumière visible. Le rayonnement gamma est détecté par deux interactions successives : le photon incident produit d'abord une diffusion Compton dans le détecteur supérieur (effet décrit dans le chapitre 2), puis il est totalement absorbé dans le détecteur inférieur. Les positions des interactions sont alors déterminées et les pertes d'énergie mesurées, ce qui permet d'utiliser les propriétés de l'interaction Compton pour reconstruire la direction d'arrivée du photon incident sur de très grands cercles de la sphère céleste, avec une largeur qui dépend de la précision de la reconstruction de l'énergie. La position de la source est obtenue en croisant les cercles de nombreux photons.

Les observations de l'instrument OSSE (Oriented Scintillation Spectrometer Experiment) ont abouti à une autre cartographie de la région du centre galactique, qui a révélé l'émission d'un rayonnement gamma à énergie de 511 keV, provenant de l'annihilation de positrons avec des électrons dans le milieu interstellaire. Le quatrième et dernier instrument du CGRO, que nous allons étudier de façon plus approfondie dans ce manuscrit, se nomme BATSE, pour Burst and Transient Source Experiment.

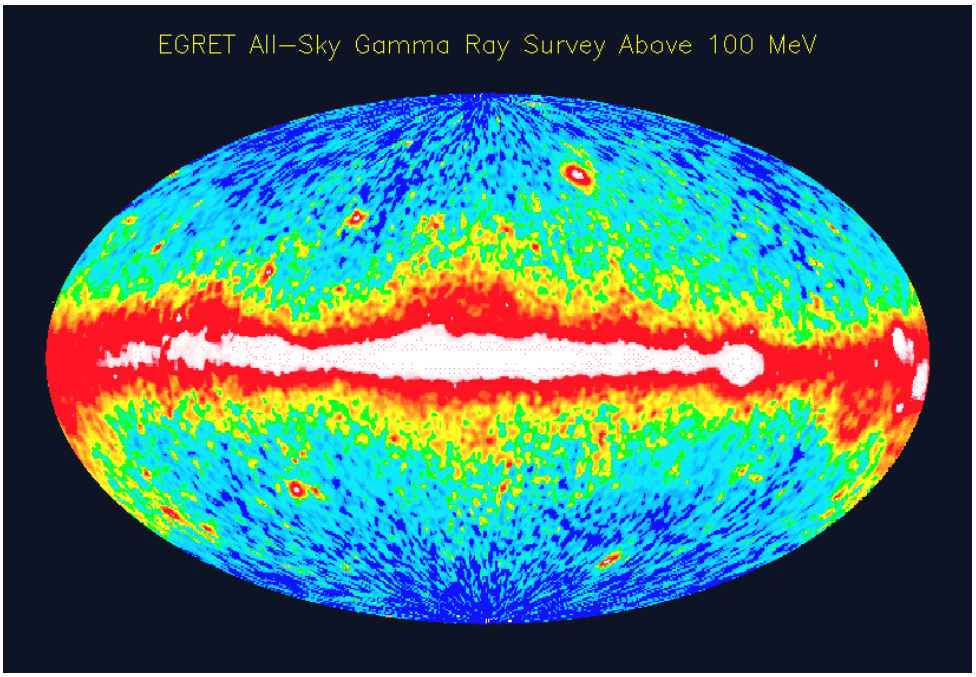


FIGURE 1.4 – Carte du ciel du rayonnement gamma observé par EGRET dans la gamme d'énergie au dessus de 100 MeV. Credit : NASA

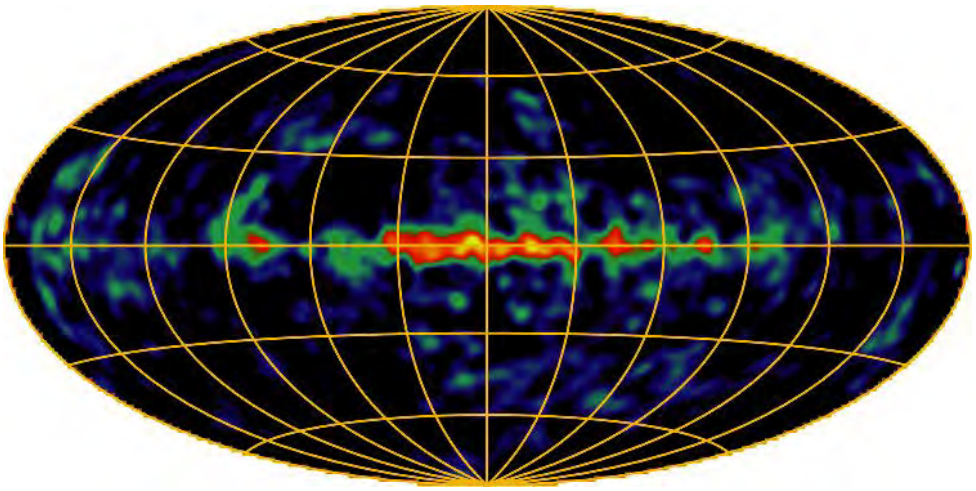


FIGURE 1.5 – Carte du ciel de l'^{26}Al détecté par COMPTEL / Credit : COMPTEL Collaboration.

Parmi ses multiples objectifs scientifiques, il a étudié les phénomènes qui nous intéressent particulièrement, les mystérieux sursauts gamma, ces flashs très brefs de rayons gamma qui se produisent de façon imprévisible, n'importe où dans le ciel, dont nous reparlerons par la suite. Grâce à la carte de BATSE, il a pu être démontré que les sursauts, contrairement aux objets galactiques qui se regroupent près du centre ou du plan de la galaxie, pouvaient survenir dans toutes les directions (1.2).

La localisation approximative des sursauts a été faite en comparant le flux reçu sur chacun des huit détecteurs qui ont tous une orientation différente et donc une surface exposée par rapport à la source différente. Cela permet de retrouver la position des sursauts à plusieurs degrés près. Sa grande taille (2000 cm^2 par détecteur) est nécessaire parce que le nombre d'interactions des photons gamma est directement lié à la surface du détecteur. Comme le nombre de photons gamma des sources célestes est très faible par rapport au nombre de photons optiques, de grands instruments sont nécessaires pour détecter un nombre significatif de rayons gamma dans un laps de temps raisonnable.

FIGURE 1.6 – Image d'un modèle de BEPPOSAX. Credit : Mike Peel

A partir du milieu des années 90, le satellite *BeppoSAX* [Boella et al., 1997] a permis d'observer des rémanences X, qui suivent les sursauts gamma. Ainsi, le 30 avril 1996, le lanceur Atlas-Centaur envoyait ce satellite de presque 1,5 tonne dans l'espace pour réaliser des images au moyen de 8 instruments spécifiques. Chacun d'eux était sensible à un intervalle spectral précis pour obtenir des images sur une grande partie de la bande X (de quelques keV à 300 keV).

Six de ces détecteurs avaient accès à une région limitée du ciel mais pouvaient fournir des images précises, atteignant une résolution d'une minute d'arc. Les deux autres balayaient une région du ciel plus large (40 x 40°) mais avec une résolution angulaire inférieure (Fig 1.6).

La présence de détecteurs complémentaires constituait l'un des points forts de *BeppoSAX*,

véritable observatoire spatial. Les deux instruments grand angle pouvaient détecter la présence dans le ciel de sources intéressantes et suggérer ainsi l'opportunité de réorienter le satellite, afin d'amener ces sources dans le champ de vue des télescopes X, qui pouvaient fournir des images plus précises. Si cette stratégie était fructueuse pour les observations, elle exigeait de réagir rapidement, et de bien coordonner les opérations du satellite. L'apparition d'un sursaut gamma dans le champ de vue d'un instrument de *BeppoSAX* produisait un signal d'alarme qui était communiqué à la Terre assez rapidement, ce qui amenait la possibilité de modifier ou pas le plan d'observation établi pour le satellite, c'est à dire s'il fallait le réorienter afin d'amener la source responsable de l'alerte à l'intérieur des champs de vue des télescopes X. Il est remarquable que les équipes responsables du satellite aient pu agir pour réorienter en quelques heures à peine un satellite qui n'avait pas été conçu pour cela.

Une fois les informations préliminaires sur l'étoile variable ou le sursaut gamma reçues, il fallait entreprendre les recherches d'une contrepartie optique ou radio de ces derniers. La découverte de la luminescence résiduelle des sursauts gamma a constitué une surprise qui a ouvert la voie à des découvertes fondamentales sur leur nature et sur la quantité d'énergie qu'ils dégagent. Les observations des sursauts gamma ont revêtu une importance déterminante, en partie inattendue, dans le succès de la mission.

De plus, *BeppoSAX* a observé les restes de l'explosion d'une supernova, grâce notamment aux images X, ainsi que des sources célestes en dehors de notre galaxie. Cette mission a apporté des preuves expérimentales supplémentaires de l'existence de trous noirs, et a pu mettre en évidence la présence de nombreuses sources nouvelles, que l'on ne distinguait pas auparavant du rayonnement X de fond (CXB), qui est aujourd'hui moins mystérieux. Enfin, *BeppoSAX* a contribué à l'étude de plusieurs sources galactiques et extragalactiques dans le domaine des rayons X. La fin des observations et la fin opérationnelle de *BeppoSAX* date de 2002.

Le satellite *HETE-2*, lancé en octobre 2000, est dédié à l'observation des rayons gamma dans une large gamme d'énergie de 2 keV à 400 keV. L'instrument fourni par l'IRAP (ex-CESR) était le détecteur FREGATE, un spectromètre gamma travaillant dans la gamme d'énergie [6 - 400 keV], que nous pouvons voir sur la figure 1.7.

HETE-2 a permis de confirmer l'existence de sursauts gamma mous, préalablement découverts par *BeppoSAX*, satellite décrit précédemment. Il a pu être ainsi étudié la dureté d'une population de sursauts gamma en fonction de leur fluence, comme nous pouvons le voir sur la figure 1.8. De plus, en 2005, suite à des observations de *HETE-2*, il a pu être établi la position précise d'un sursaut court, renseignant sur les caractéristiques des galaxies contenant ce type de sursauts, et très différentes de celles des galaxies contenant les sursauts gamma longs [Fox et al., 2005].

Une avancée majeure a alors été réalisée sur la connaissance des sursauts ; c'est ainsi que deux classes de sursauts gamma ont été définies : des « X-Ray Flashes » et des « X-Ray-Rich Gamma-Ray Bursts », sursauts qui forment avec des sursauts gamma « classiques », un phénomène unique dont la gamme d'énergie peut s'étendre typiquement de quelques keV à plusieurs MeV. Le recoupement des données de FREGATE et du WXM (autre instrument de *HETE-2*, permettant la détection des rayons X d'énergie [2 - 25] keV) a permis une étude étendue en énergie des spectres de sursauts de rayonnement gamma mou, qui représentent près des trois quarts des bursts détectés par *HETE-2*.

En conclusion de cette analyse [Barraud et al., 2003] [Sakamoto, 2005], il semble que ce type de sursauts aient les mêmes caractéristiques temporelles et spectrales que ceux détectés par BATSE à plus haute énergie.

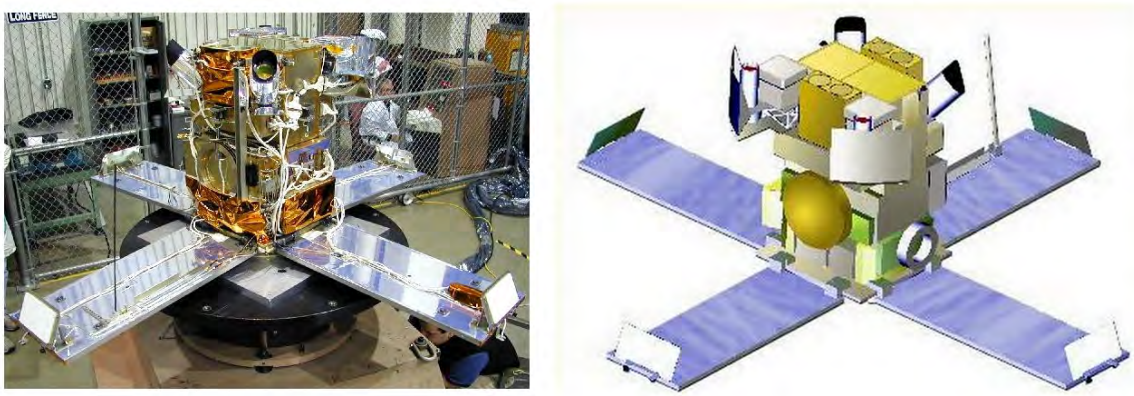


FIGURE 1.7 – Le satellite HETE-2. Credit : NASA

Ces instruments précurseurs ont pu détecter les sursauts gamma, et montrer l'importance de leur étude, avec un bémol pour certains : une localisation peu précise (dans le cas de BATSE) ou peu rapide (*BeppoSAX*). Au vu du besoin d'obtenir des localisations qui soient à la fois rapides et relativement précises, la nécessité de grands plans de détection pixelisés, surmontés de masques codés, est apparue incontournable.

Nous allons terminer ce chapitre introductif avec la présentation de trois instruments développés sur ce principe, dont l'instrument ECLAIRs (qui sera détaillé dans le chapitre 3), de manière à comprendre leurs atouts : une forte sensibilité et une localisation fine.

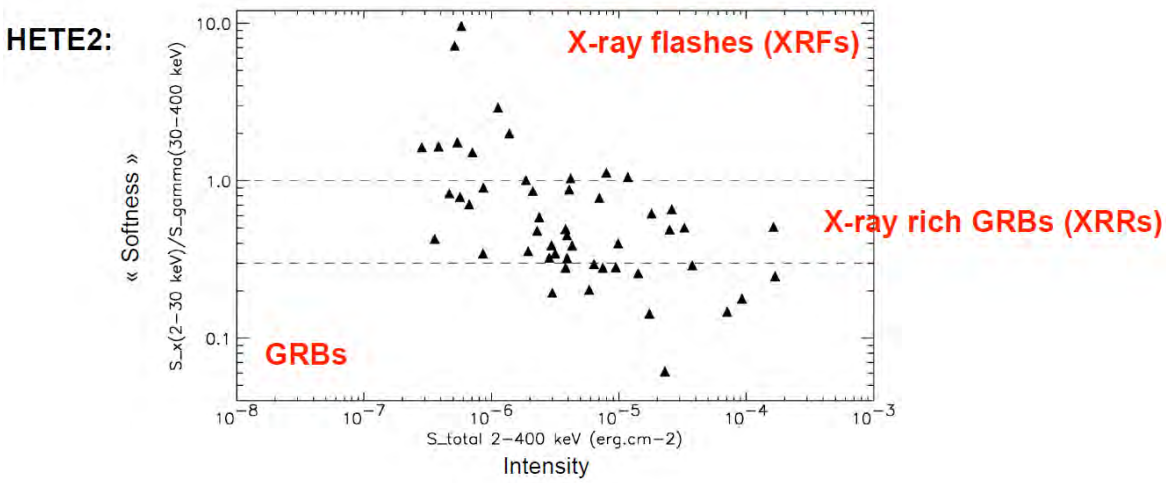


FIGURE 1.8 – Dureté en fonction de la fluence de sursauts gamma détectés par la mission *HETE-2*. Credit : C. Barraud et l'équipe de *HETE-2*

INTEGRAL (International Gamma-Ray Astrophysics Laboratory), une mission spatiale astronomique menée et financée par l'ESA (Agence Spatiale Européenne), a été lancée le 17 octobre 2002, pour prendre la suite du télescope spatial SIGMA en opération de 1990 à 1997. Elle a donné l'opportunité aux astronomes d'étudier de nouveaux phénomènes énergétiques violents, notamment les processus à proximité des étoiles à neutrons et des trous noirs stellaires. L'un des objectifs scientifiques majeurs était l'étude détaillée des régions centrales de

notre Galaxie et en particulier les sources gamma qui s'y cachent, pour en déterminer leur nature.

Le satellite *INTEGRAL* comprend les instruments IBIS (Imager on Board the INTEGRAL Satellite, Fig. 1.9) qui fournit des images à haute résolution angulaire, SPI (Spectrometer for INTEGRAL) qui réalise la spectroscopie gamma à très haute résolution, JEM-X (Joint European Monitor) et OMC (Optical Monitor Camera), sont des télescopes à petit champ de vue, fonctionnant respectivement dans la bande X et dans le domaine visible.

IBIS est un instrument à ouverture codée, qui permet de réaliser une imagerie précise entre 15 keV et 3 MeV. Le champ de vue totalement codé atteint la valeur de 8° x 8°. Le masque à ouverture codée a été fabriqué en tungstène, et se situe à 3,2 m au-dessus du plan de détection, avec un design optimisé pour obtenir une résolution angulaire élevée. IBIS se compose de deux plans détecteurs : ISGRI et PICsIT, qui sont séparés par une distance de 90 mm.

ISGRI, la partie supérieure, a une aire de détection de 2600 cm^2, est sensible entre 15 et 1000 keV avec une surface efficace maximale entre 20 et 100 keV. Il se compose de huit modules de 64 x 32 pixels de CdTe, espacés entre eux de deux pixels (soit une matrice de détection de 128 x 128 pixels) pour un total de 16384 pixels, chacun mesurant 4 x 4 mm^2, de 2 mm d'épaisseur et espacés de 0,6 mm. Avec deux modules horizontaux et quatre verticaux, l'image du détecteur a une taille équivalente de 130 x 134 pixels.

PICsIT, la partie inférieure, a une aire de 3000 cm^2, est sensible entre 100 keV et 10 MeV, avec une surface efficace maximale entre 200 et 400 keV pour des événements uniques et une sensibilité assez uniforme pour des événements multiples entre 500 keV et 10 MeV. Constitué de huit modules, PICsIT a la même configuration que l'instrument ISGRI, mais comprend des détecteurs différents, à savoir 32 x 16 scintillateurs de type CsI (Iodure de césium) couplés à des photodiodes, pour un total de 4096 pixels. Ils mesurent chacun 9 x 9 mm^2, avec une épaisseur de 30 mm. Avoir deux détecteurs séparés permet la reconstruction de l'angle d'incidence des photons lorsqu'ils interagissent avec les deux plans de détection. Cela permet de fonctionner en mode Compton.

Grâce à ses capacités d'imagerie, *INTEGRAL* a fourni une moisson de découvertes, dont une carte de la galaxie en rayons X durs et gamma d'une précision inégalée.

Un autre instrument, grand découvreur de sursauts, est le télescope BAT (Burst Alert Telescope) sur le satellite *SWIFT* : très sensible, doté d'un grand champ de vue, il est conçu pour fournir des alertes (ou « triggers » pour définir les déclenchements) de sursauts et des positions précises à quelques minutes d'arc. Il s'agit d'un instrument d'imagerie à masque codé doté d'un champ de vue de 1,4 stéradian. Sa gamme d'énergie est de 15 à 150 keV pour faire de l'imagerie, avec une réponse non codée allant jusqu'à 500 keV. Dans les quelques secondes qui suivent la détection d'un sursaut, BAT calcule la position initiale, décide si cela mérite un déplacement du satellite et, si oui, indique la position vers laquelle il doit se tourner. Afin d'étudier une grande variété de sursauts ayant différentes intensités, durées et structures temporelles, BAT possède une dynamique temporelle étendue pour la détection des sources transitoires, avec des capacités de déclenchement maîtrisées. Avec son masque codé bidimensionnel et une matrice de détecteurs de grande surface (environ 5200 cm^2), il peut détecter les sursauts faibles, et son grand champ de vue lui permet aussi de détecter de nombreux sursauts très lumineux. Comme le champ de vue de BAT comprend ceux des instruments XRT et UVOT, l'émission de rayons gamma de longue durée, provenant du sursaut, peut éventuellement être étudiée simultanément avec l'émission X et UV/optique (dans le visible), après repointage du satellite. Une image en coupe de BAT est présentée

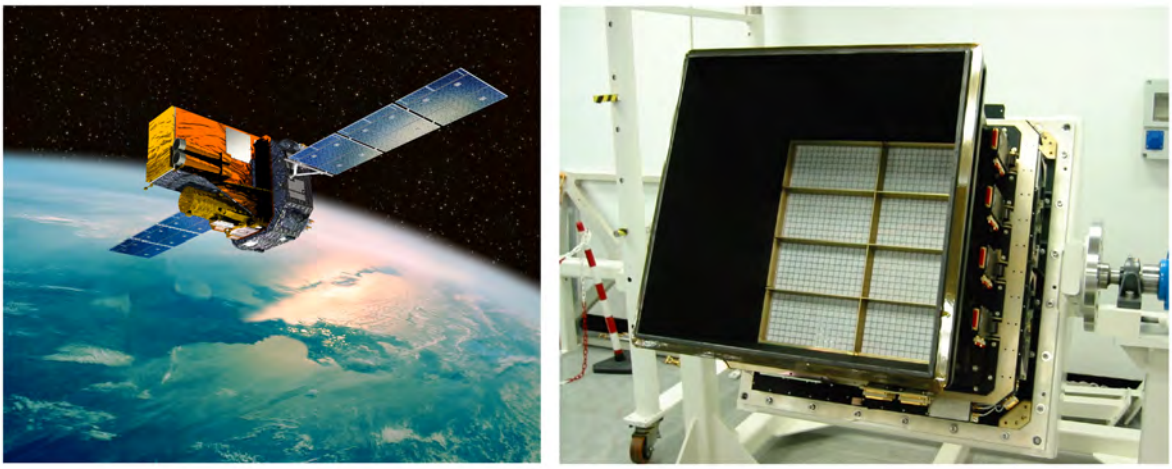


FIGURE 1.9 – Image de gauche : Satellite *INTEGRAL* / Image de droite : Instrument IBIS. Credit : ISDC

figure 1.10 : BAT est constitué de 32768 détecteurs semi-conducteurs CdZnTe (CZT), de dimensions 4 x 4 x 2 mm^3 et formant un plan de détection avec une zone sensible de 1,2 x 0,6 m. Les détecteurs sont regroupés par modules de 128 (matrice de 8 x 16 pixels), connectés chacun à un ASIC (Application Specific Integrated Circuits) de 128 voies, réalisant l'électronique de lecture. Le plan final est alors sectorisé par groupes de huit modules [Barthelmy et al., 2005].

Cet agencement particulier, ainsi que la technique du masque codé, signifie que l'instrument BAT tolère la perte de pixels individuels, ainsi que de modules de détection et même de secteurs entiers, sans perdre la capacité de détecter des sursauts et de déterminer leurs positions. Les détecteurs CZT fonctionnent à la température nominale de 20°C, avec des gradients thermiques maintenus à $+/-1$°C sur l'ensemble du plan de détection, et la tension de polarisation typique est de -200 V, avec un maximum de -300 V. Le masque de BAT, placé à 1 mètre au-dessus du plan de détection, a une forme en 'D' ; il est constitué d'environ 54000 dalles de plomb, de dimensions 5 x 5 x 1 mm^3, qui sont montées sur un panneau en nid d'abeilles composite de 5 cm d'épaisseur.

Parce que le grand champ de vue nécessite une ouverture de masque beaucoup plus grande que le plan de détection, qui n'est pas uniforme en raison des interstices inter modules et inter pixels, le masque codé de BAT utilise un motif aléatoire, 50 % ouvert et 50 % fermé, plutôt qu'un motif plus couramment utilisé comme le « Uniformly Redundant Array ». Le masque a une surface de 2,7 m^2, donnant un champ de vue demi-codé de 100° x 60°, soit 1,4 sr. Un blindage spécifique, situé autour du plan de détection et du masque, réduit de près de 95 % le bruit de fond, composé du fond diffus cosmologique isotrope et du flux anisotrope de l'Albédo de la Terre. Le blindage comprend des couches de Pb, Ta, Sn et Cu, qui sont plus épaisses près du plan de détection et plus minces près du masque (succession de couches avec un Z décroissant, chacune arrêtant la fluorescence de la couche précédente). La figure ci-dessous (1.10) montre des photos de la mission *SWIFT*, dont l"instrument BAT en coupe, avec les différentes parties le constituant.

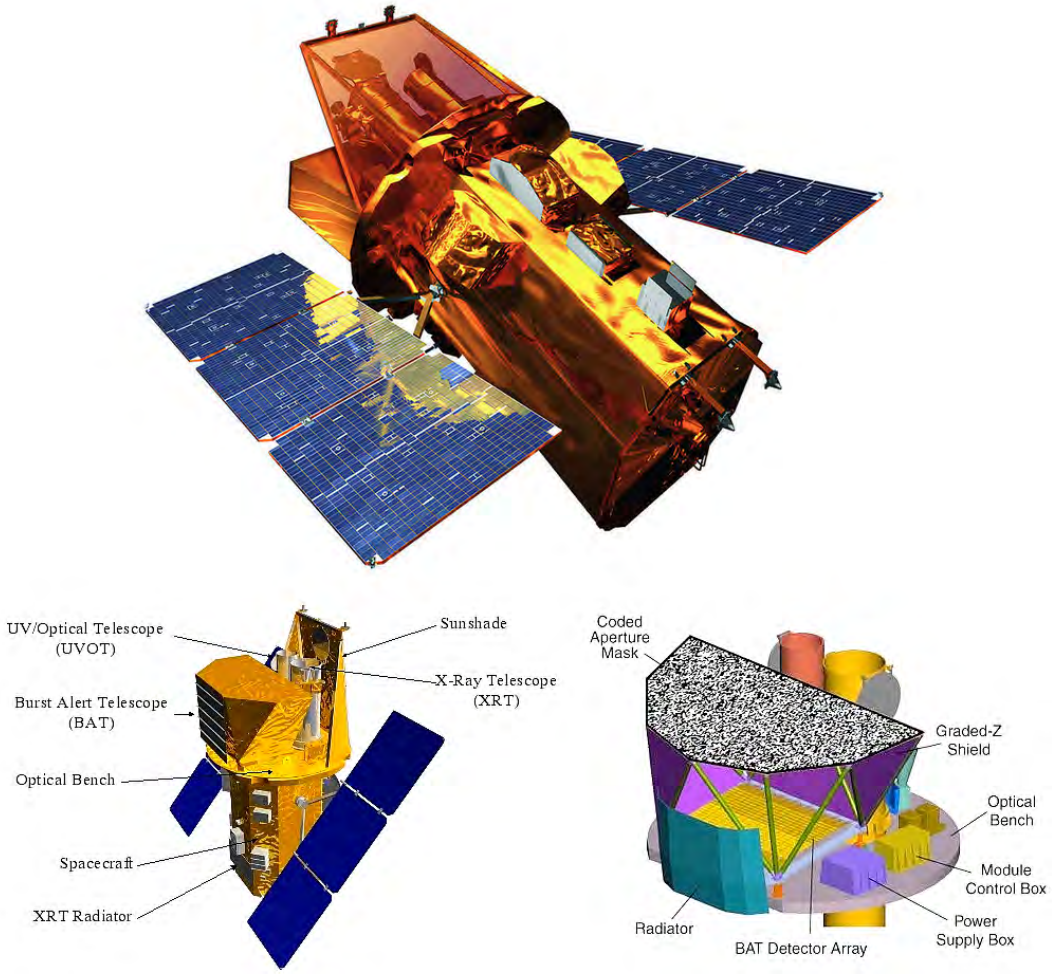


FIGURE 1.10 – Images de la mission spatiale SWIFT. Credit : NASA

Parmi les très nombreux résultats sur les sursauts gamma obtenus par *SWIFT*, nous pouvons noter la découverte de la phénoménologie très riche de l'émission rémanente dans les premières minutes qui suivent le sursaut, la mesure du redshift de plusieurs sursauts courts ou la détection en 2009 du sursaut gamma GRB 090423 qui est éloigné de 13,04 milliard d'années-lumières (Fig. 1.11).

L'histoire des sursauts gamma, même si elle est jeune, a déjà donc connu de nombreux satellites ; pour autant, l'astronomie gamma continue son exploration spatiale, grâce à de futures missions, et parmi elles, la mission spatiale *SVOM* accueillant l'objet de notre étude : l'instrument ECLAIRs. Sélectionnée par les agences spatiales française et chinoise, cette mission va fournir à la communauté scientifique des mesures précises des sursauts gamma avec une approche multi-longueurs d'onde.

Une sensibilité sans précédent dans les basses énergies des spectres de rayons X et gamma est nécessaire pour favoriser la détection d'événements fortement décalés dans le rouge (redshift z compris entre 5 et 10) dont les émissions sont maximales dans la gamme d'énergie inférieure à 50 keV.

C'est pourquoi l'instrument principal, qui va détecter chaque nouveau sursaut, devra être

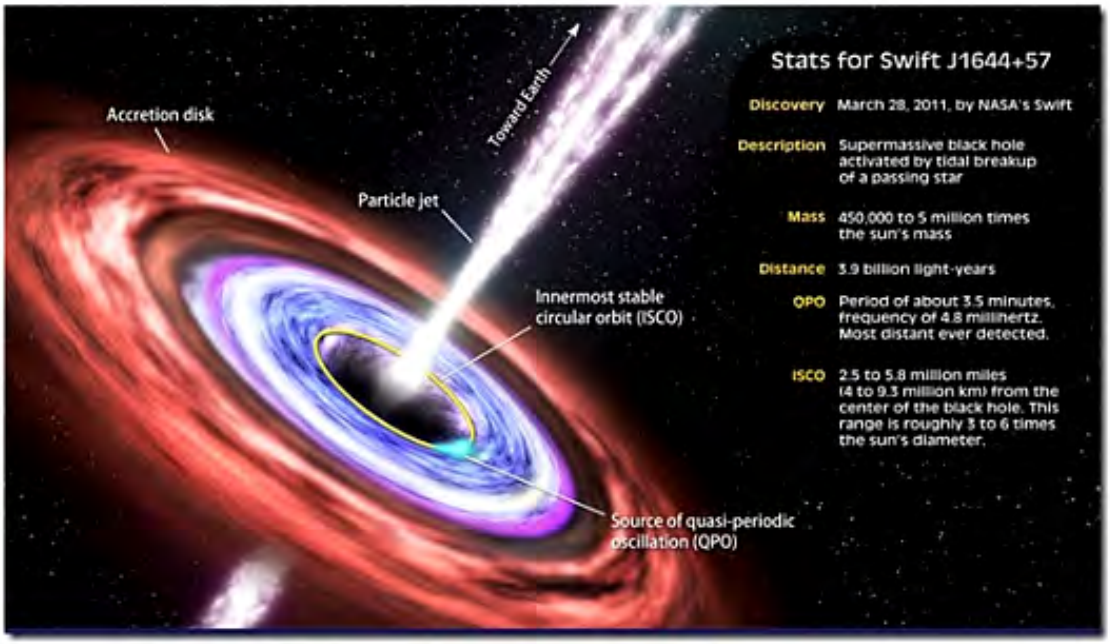


FIGURE 1.11 – Trou noir supermassif détecté par SWIFT. Credit : NASA's Goddard Space Flight Center

sensible à partir d'un seuil bas en énergie de 4 keV. Le télescope ECLAIRs est conçu pour la détection d'événements transitoires faibles se produisant dans un grand champ de vue (90° x 90°) : pour cela, il est doté d'une très bonne sensibilité, particulièrement dans la gamme d'énergie 4 keV $<$ E $<$ 70 keV, et d'une précision de localisation meilleure que 10 minutes d'arc.

ECLAIRs va pouvoir livrer ainsi un signal de déclenchement quasi instantané à tous les autres instruments du satellite SVOM, mais aussi aux instruments au sol, pour effectuer des observations de suivi rapides. En interagissant avec les détecteurs, les photons de basses énergies, inférieures à 70 keV, induisent des signaux électriques très faibles, qui nécessitent d'une part la connaissance approfondie et la maîtrise de ces détecteurs et d'autre part, le développement d'une électronique dédiée très faible bruit, pour permettre leur traitement.

La détection et la localisation de sources gamma faibles restent un défi dans l'espace, où le bruit de fond induit est très élevé, ce qui implique la réalisation d'instruments de haute qualité. ECLAIRs résulte de l'association d'un plan de détection pixelisé appelé « DPIX » avec un masque à ouverture codée dont le but est de coder le signal provenant du champ de vue pour repérer précisément la position de la source. Un ordinateur de bord (appelé « UGTS »), associé au plan de détection, va traiter en temps réel le shadowgram enregistré de la caméra DPIX pendant de courtes périodes d'intégration, et construire en continu des images du ciel dans lesquelles de nouvelles sources transitoires seront recherchées, et ce, grâce à un algorithme de déconvolution qui tient compte des propriétés du masque.

La caméra DPIX est une matrice de 80 x 80 détecteurs CdTe indépendants (4 x 4 mm^2 x 1 mm d'épaisseur). Il résulte de l'assemblage mécanique sur un plateau froid, de 200 petites caméras élémentaires, mécaniquement monolithiques, et électriquement indépendantes, appelées « XRDPIX » et que nous décrivons en détail dans le chapitre 4.

Pour atteindre le plus faible niveau de bruit électrique et contrer l'effet de polarisation (décrit dans le chapitre 4), les détecteurs doivent être refroidis à $-20°C$, ce qui nécessite la mise en œuvre d'un système de contrôle thermique complexe (comprenant des radiateurs passifs sophistiqués, des caloducs, des couches MLI spécifiques, des régulateurs thermiques PID).

La réponse globale de la caméra sera le résultat d'une combinaison complexe des réponses des 6400 détecteurs individuels, qui est analysée en temps réel, après traitement par l'algorithme de déconvolution. Il est primordial, lors de l'assemblage du plan de détection, d'associer, autant que possible, des milliers de détecteurs présentant des caractéristiques similaires ou très proches pour obtenir une bonne homogénéité de la réponse finale, et assurer une grande qualité d'image et une excellente sensibilité.

Par ailleurs, les défaillances de quelques dizaines de pixels ou de quelques modules XRDPIX, ou même des variations de leur performance, pourraient perturber l'homogénéité du plan de détection et par conséquent entraîner une perte de sensibilité de l'imageur, qui reste l'un des paramètres clés. Par conséquent, la vérification des performances consistera avant tout à sélectionner les meilleurs composants pour le vol (Détecteurs ou XRDPIX) montrant des paramètres stables et homogènes, et ce, malgré les variations possibles de certaines conditions de vol.

Tout au long du manuscrit sont exposés les mesures, les essais, les vérifications effectuées sur les modules élémentaires XRDPIX, ainsi que sur un sous-système en version prototype, appelé « ProtoDPIX » qui permet d"évaluer aussi l'électronique de commande. Nous proposerons une liste des modules XRDPIX sélectionnés pour la caméra de vol, avec des performances en accord avec ce qui est spécifié par les exigences scientifiques.

Plusieurs logiciels ont été développés pour la modélisation de la réponse du détecteur et autres phénomènes physiques, pour corroborer les résultats de tests physiques, et un échantillons de certaines simulations, pour caractériser le plan de détection notamment, sera présentée. La majeure partie des données ont été obtenues dans des conditions représentatives du spatial, à savoir un vide thermique sous irradiation à partir de sources radioactives étalonnées.

Les recherches décrites dans cette thèse s'inscrivent dans la continuité d'un travail d'équipe de plusieurs années. Mes travaux personnels d'investigation des chapitres 4, 5 et 6 se mélangent aux travaux techniques et scientifiques des nombreux collaborateurs de la mission SVOM (chapitre 3), dont les articles figurent en annexe. Les références des publications et des thèses sont numérotées et apparaissent dans le manuscrit au cours de la lecture.

FIGURE 1.12 – Le satellite SVOM comprend quatre instruments spatiaux : deux instruments français, ECLAIRs et MXT (Microchannel X-ray Telescope), et deux instruments chinois, VT (Visible Telescope) et GRM (Gamma Ray Monitor). Credit : CNES

Chapitre 2

Imagerie des sources transitoires à haute énergie

Dans ce chapitre nous allons aborder l'imagerie des sources célestes, et plus particulièrement des sources transitoires à haute énergie.

Nous commencerons par décrire les sursauts gamma, puis discuterons de leur origine tout en définissant les paramètres utiles à leur compréhension. Nous définirons les objectifs de l'étude des sources transitoires, pour finalement introduire les problématiques liées à l'observation de ce type de sources.

2.1 Pourquoi observer des sources transitoires ?

2.1.1 Les sursauts gamma : un exemple de sources transitoires

Les sursauts gamma, ou GRBs pour Gamma Ray Bursts, sont des flashs très brefs et hautement énergétiques provenant de sources célestes, qui font l'objet de multiples études, concernant leurs caractéristiques temporelles et leurs propriétés physiques [Vedrenne & Atteia, 2009].

Ainsi, un sursaut pourra être caractérisé par son spectre en photons, sa durée, son intensité, son flux d'énergie (Fig. 2.1). Ces propriétés permettent par exemple de classer les sursauts gamma observés. C'est ainsi qu'ils sont répartis en deux groupes, en fonction du temps : les sursauts courts (qui durent jusqu'à 2 s) et les sursauts longs (Fig. 2.2).

Plusieurs hypothèses ont été proposées pour expliquer l'origine de ces supers sursauts gamma, dont nous présentons les principales propriétés dans ce chapitre.

Nous allons poursuivre en détaillant ces phénomènes transitoires encore mystérieux.

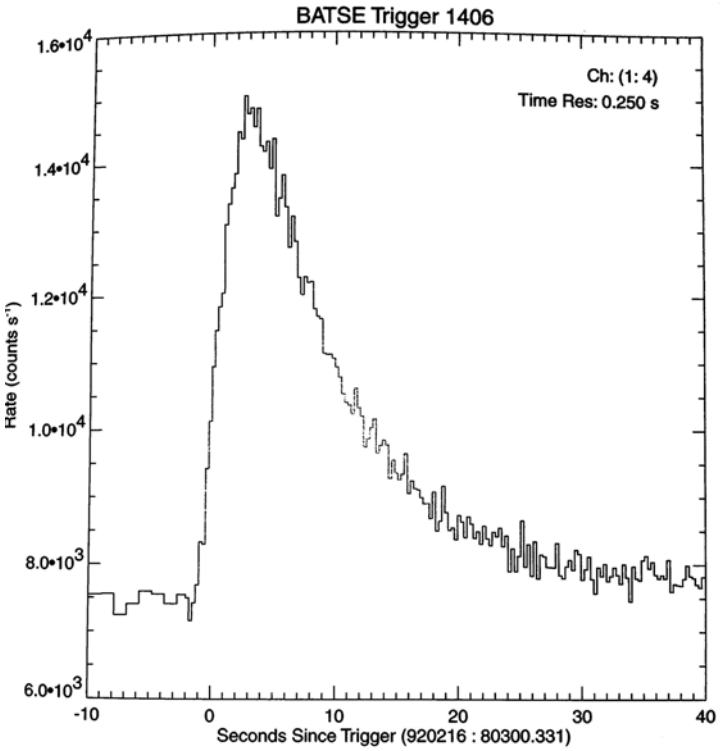


FIGURE 2.1 – Courbe de lumière d'un sursaut gamma observé par BATSE, donnant l'évolution du nombre de coups détectés par seconde au cours du temps. Cet exemple montre le profil du sursaut gamma GRB 920216, dont le pulse unique est caractérisé par une montée rapide et une décroissance plus lente.

L'origine de ces flashs étonnants

Les sursauts gamma sont le résultat d'explosions fortement énergétiques, qui sont visibles bien au-delà de l'univers local, jusqu'à des distances cosmologiques [Vedrenne & Atteia, 2009].

Un des paramètres clés d'un sursaut est sa durée, qui dépend de la nature du phénomène qui le produit, de son mécanisme et de son environnement. Ils peuvent durer quelques dizaines de millisecondes jusqu'à plusieurs minutes [Vedrenne & Atteia, 2009]. C'est pourquoi les sursauts sont classés selon une caractéristique temporelle, appelée T_{90}, qui se définit par la durée nécessaire pour accumuler 90 % de la fluence du sursaut [Kouveliotou et al., 1993], avec une catégorie de sursauts longs si ce paramètre excède 2 s (en moyenne 35 s), et une catégorie de sursauts courts s'il est inférieur à 2 s (d'une durée moyenne de 0,5 s). La figure 2.2 montre la distribution en durée des sursauts observés par BATSE, qui illustre clairement ce caractère bimodal.

En outre, les sursauts se répartissent en deux catégories selon une caractéristique de dureté. C'est ainsi qu'en étudiant le diagramme du rapport de dureté en fonction du T_{90} (figure 2.2), nous concluons à l'existence de deux populations de sursauts : les mous et les durs, ces derniers ayant tendance à émettre moins longtemps.

Un sursaut gamma est suivi d'une émission décroissante qui dure bien plus longtemps, appelée émission rémanente, qui survient à de plus grandes longueurs d'onde [Costa et al., 1997]. C'est d'ailleurs l'étude des rémanences visibles qui a permis de localiser avec précision et

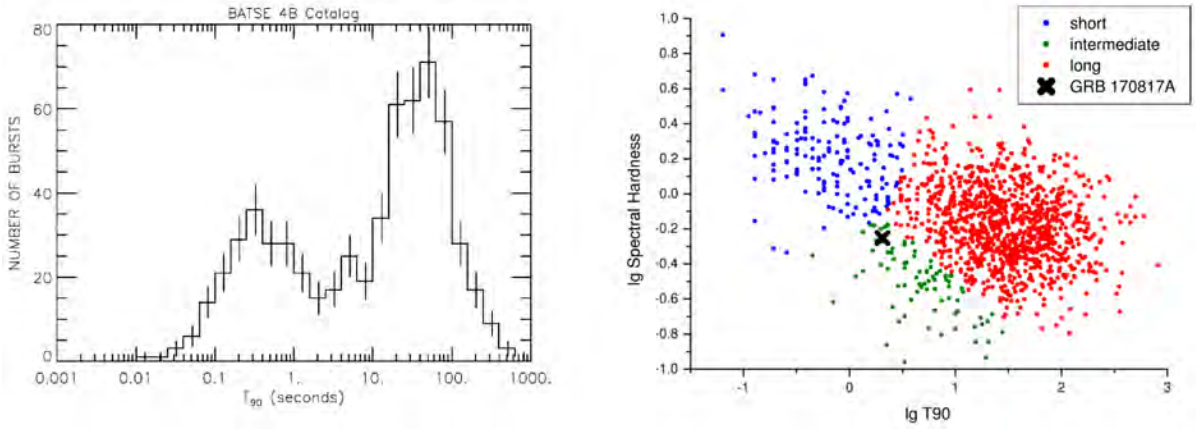


FIGURE 2.2 – Graphe de gauche : Distribution en durée des sursauts gamma observés par l'instrument BATSE (chapitre introductif 1) qui montre la distinction de 2 classes de sursauts [Paciesas et al., 1999] / Graphe du bas : La durée T_{90} en fonction du rapport de dureté, analogue à la dureté spectrale du sursaut. Les points rouges sont ceux qui appartiennent le plus à la catégorie des sursauts longs et les points bleus à la catégorie des sursauts courts [Horváth et al., 2018].

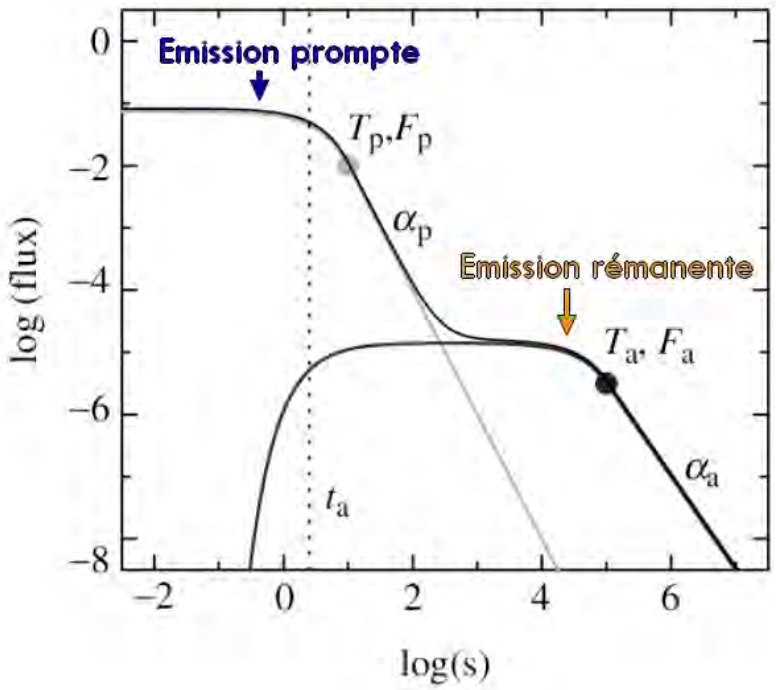


FIGURE 2.3 – Courbe de la décroissance du flux et paramètres ajustés. L'émission prompte évolue jusqu'à une centaine de secondes, lorsque l'émission rémanente perdure jusqu'à une dizaine d'heures [Willingale et al., 2007].

ainsi de mesurer la distance des sources, pour confirmer leur origine cosmologique et l'immense quantité d'énergie libérée, pour finalement trouver leurs galaxies hôtes.

Les sursauts longs ont pu être associés à l'explosion d'une étoile massive en fin de vie (supernova ou même hypernova), suivie de la formation d'un objet compact qui accélère un jet transitoire dans notre direction.

Les effets relativistes et la collimation du jet affectent fortement l'émission avec pour conséquence l'amplification du flux à mesure que l'on se rapproche de l'axe d'éjection. La collimation du jet est un paramètre très difficile à mesurer. Malgré tout, quelques mesures réalisées sur des sursauts longs montrent une variation significative de l'angle d'ouverture du jet compris entre 2 et 20 degrés [Frail et al., 2001].

La dissipation interne de l'énergie du jet provoque, par des chocs ou de la reconnexion magnétique, des rayons gamma émis par la plupart des sursauts, qui ne seront jamais détectés si le jet ne pointe pas vers la Terre. D'autre part, les sursauts courts sont énergétiques et probablement moins collimatés que les sursauts longs [Watson et al. (2006)].

Pour commencer, nous allons parler du modèle Collapsar dans lequel une étoile massive s'effondre pour former un trou noir. Par la suite, nous évoquerons quelques modèles conduisant à l'apparition des sursauts gamma courts, puis citerons les mécanismes expliquant l'origine des jets. Enfin, nous parlerons de l'origine des événements énergétiques particuliers qui mèneraient à la formation des sursauts gamma dans l'univers primordial, et qui pourraient aussi nous aider à comprendre la distribution des redshifts des sursauts. Dans la suite de ce document nous utiliserons souvent le terme « redshift », explicité dans le paragraphe 2.1.1.

L'observation de certains sursauts gamma longs révèle l'existence d'un lien avec les supernovae. En effet, il pourrait s'agir de l'effondrement du noyau d'une étoile extrêmement massive (> 25M), à faible métallicité et à rotation rapide pour former un trou noir [Woosley et al., 1999]. La matière, en tombant, tournoie dans un disque d'accrétion de haute densité : des jets relativistes sont alors propulsés le long de l'axe de rotation [Woosley et al., 1993], et peuvent traverser l'enveloppe stellaire.

Il apparaît ensuite l'émission rémanente, à une plus grande longueur d'onde, allant des rayons X aux ondes radio. La collision de la matière avec le gaz interstellaire provoque une onde de choc relativiste qui se propage dans l'espace interstellaire, tandis qu'une seconde onde de choc se propage dans la matière éjectée.

Des champs magnétiques locaux très intenses accélèrent les électrons énergétiques dans l'onde de choc, provoquant un rayonnement synchrotron sur une grande partie du spectre électromagnétique [Sari et al. (1998)] [Nousek et al. (2006)]. Pour expliquer les sursauts longs, des modèles alternatifs remplacent le trou noir central par un magnetar nouvellement formé [Metzger et al. (2006)], tout en gardant les mêmes paramètres du jet que le modèle classique.

Le modèle Collapsar n'explique pas tous les types de sursauts. Les observations révèlent que des sursauts de courte durée peuvent survenir même lorsqu'il n'y a pas de processus de formation d'étoiles. Certains modèles évoquent la fusion de deux objets compacts dans un système binaire qui, libérant de l'énergie par rayonnement gravitationnel, s'effondrent dans un trou noir [Kochanek & Piran (1993)]. La matière, en tombant, produit un disque d'accrétion et libère un sursaut très énergétique, analogue au modèle collapsar.

En résumé, les modèles utilisés pour expliquer l'origine des sursauts courts se basent sur un système d'objets binaires compacts : cela peut-être deux étoiles à neutrons, une étoile à neutrons et un trou noir,...[Vietri & Stella (1998)] [MacFadyen et al., 2006](Fig. 2.4). Les sursauts gamma apparaissent au moment où l'énergie d'accrétion est convertie en rayonnement, et les différents modèles tentent de décrire ce processus complexe.

Dans l'univers jeune pourraient aussi se former des étoiles très massives, appelées les étoiles de la population III, objets sans métallicité, et appartenant à la première génération d'étoiles après le Big Bang. La formation d'étoiles de la Population III ou d'étoiles supermassives et leur effondrement en trous noirs peuvent être à l'origine de sursauts gamma.

FIGURE 2.4 – Gauche : Collision de 2 étoiles à neutron. Credit : Dana Berry, SkyWorks Digital / Droite : Image d'un sursaut gamma. Credit : Paulista, Shutterstock

Pourquoi détecter des sursauts gamma ?
Les sursauts gamma sont liés aux stades ultimes de l'évolution stellaire et aux trous noirs. Les disparités observées entre les sursauts longs et les sursauts courts ont conduit à penser que l'astre à l'origine du sursaut gamma, le progéniteur, devait être en fait de deux natures différentes.

Les sursauts longs, qui se trouvent être les sursauts les plus étudiés, sont liés à la mort d'étoiles massives. Ainsi, l'observation de ce type de sursauts gamma est associée à des supernovae de type Ib/c, c'est à dire des supernovae à effondrement de cœur.

Pour autant, toutes les étoiles massives ne produisent pas de sursaut gamma, et parmi ceux qui sont produits, tous ne sont pas visibles. En effet, nous ne voyons les sursauts que lorsque nous nous trouvons dans la ligne de visée d'un jet de matière éjectée à des vitesses gigantesques ($\approx$ 99,995 % de la vitesse de la lumière). Il y a donc encore beaucoup de choses à découvrir !

La matière éjectée s'entrechoque avec le milieu interstellaire, ce qui produit l'émission rémanente. Finalement, nous supposons que ces jets sont produits par un trou noir en formation lors de la mort de l'étoile massive.

Aussi l'étude des sursauts gamma nous permet de mieux comprendre la formation des étoiles. La luminosité qui les caractérise est si puissante que nous allons pouvoir les détecter jusqu'aux confins de l'Univers. Or, une propriété remarquable de la lumière est sa vitesse finie : les photons que nous recevons des sursauts gamma les plus lointains ont été envoyés il y a plus de 10 milliards d'années (soit le temps qu'ils ont mis pour parvenir jusqu'à nous), et nous montrent l'Univers tel qu'il était à ce moment là. Nous pouvons dès lors étudier ces époques révolues et mieux comprendre comment se sont formées les étoiles.

La nature des sursauts courts est restée plus équivoque pendant des années. Ceci a privilégié l'hypothèse que le progéniteur des sursauts courts n'est pas une étoile massive mais une étoile binaire contenant des objets compacts (soit une étoile à neutrons ou un trou noir). Ces binaires rayonnent de l'énergie sous forme d'ondes gravitationnelles et, peu à peu, se

rapprochent. Une fois très proches l'un de l'autre, les objets compacts fusionnent, donnant naissance à un trou noir, annoncée à travers l'Univers par un flash bref et intense de photons gamma.

Etudier les sursauts gamma est un levier pour améliorer notre compréhension des phénomènes physiques à l'œuvre lorsque des grandes quantités d'énergie sont libérées, et pour mesurer l'histoire de la formation des trous noirs stellaires.

Mesurer l'énergie des sursauts gamma

Pour revenir à la nature des sursauts, la première caractéristique est la brièveté du phénomène, qui le distingue des sources connues, observées dans la Voie Lactée. Cette rapidité rend la détection des sursauts gamma difficile : le temps de les apercevoir et ils sont déjà terminés ! En effet, si la connaissance de l'énergie mise en jeu est essentielle à la compréhension du sursaut gamma, une autre propriété observationnelle majeure est sa courbe de lumière, donnant l'évolution du nombre de photons reçus dans le temps. La figure 2.5 illustre très bien la diversité des profils temporels et des durées des émissions promptes ; nous pouvons d'ailleurs voir des sursauts qui durent moins d'une seconde quand d'autres ont une émission longue de plusieurs dizaines voire centaines de secondes. Nous comprenons alors l'importance de réactivité que doit montrer un télescope dédié à l'observation de telles sources transitoires.

Pour remonter à l'énergie émise par la source, et reçue par le détecteur, il faut connaître la distance de l'objet, ce qui paraît impossible à déterminer. Les sursauts sont très brefs, et se produisent n'importe où dans le ciel aléatoirement. Il n'est pas facile, dans ces conditions, de mesurer leur distance.

La première méthode envisageable consiste à associer à l'émetteur gamma un objet connu par ailleurs, par exemple visible, et dont on connaît la distance. Ceci s'applique en particulier à des objets proches, situés dans notre Galaxie. Si les émetteurs gamma sont lointains, le décalage vers le rouge (appelé « redshift ») peut s'appliquer, mais il n'est pas possible de le mesurer sur le rayonnement gamma lui-même. En effet, chaque photon gamma porte beaucoup d'énergie, et à puissance rayonnée égale, le nombre de photons gamma est bien moindre que celui des photons visible (de l'ordre de 100 000 fois moins), et les spectres à haute énergie des sursauts ne montrent pas de raies. Il s'agit alors de calculer le décalage spectral dans une autre longueur d'onde, ce qui revient à chercher un objet associé dans cette gamme.

Les photons gamma, comme les photons visibles, se déplacent en ligne droite (selon une même trajectoire géodésique de l'espace). La direction d'arrivée des photons, gamma et visibles émis par un même objet, est donc la même. Il suffit alors de déterminer la position précise de la source gamma pour résoudre le problème, ce qui est fait avec l'émission rémanente qui permet ensuite de localiser la galaxie hôte ; ainsi, en se basant sur l'afterglow visible, et parce que les sursauts (en particulier les sursauts longs) se produisent dans les galaxies, les raies d'absorption dans le spectre de l'émission rémanente due au gaz de la galaxie hôte permettent de mesurer le redshift de la galaxie hôte et donc celui du sursaut.

Les données, transportées par le rayonnement gamma, amènent des informations, mais sont insuffisantes pour préciser le type d'objet émetteur. Ces phases extrêmement énergétiques qui surviennent à des instants particuliers, durant un labs de temps très court, ne répondent pas forcément aux questions suivantes : Sont-ils des objets complètement nouveaux, jusqu'ici indéterminés ? ou bien sont-ils des manifestations exceptionnelles d'astres connus ? Si l'étude de nouvelles sources transitoires est difficiles, l'identification par l'observation de l'objet dans d'autres longueurs d'onde, peut-être d'une aide précieuse. Pour cela, il faut, au préalable,

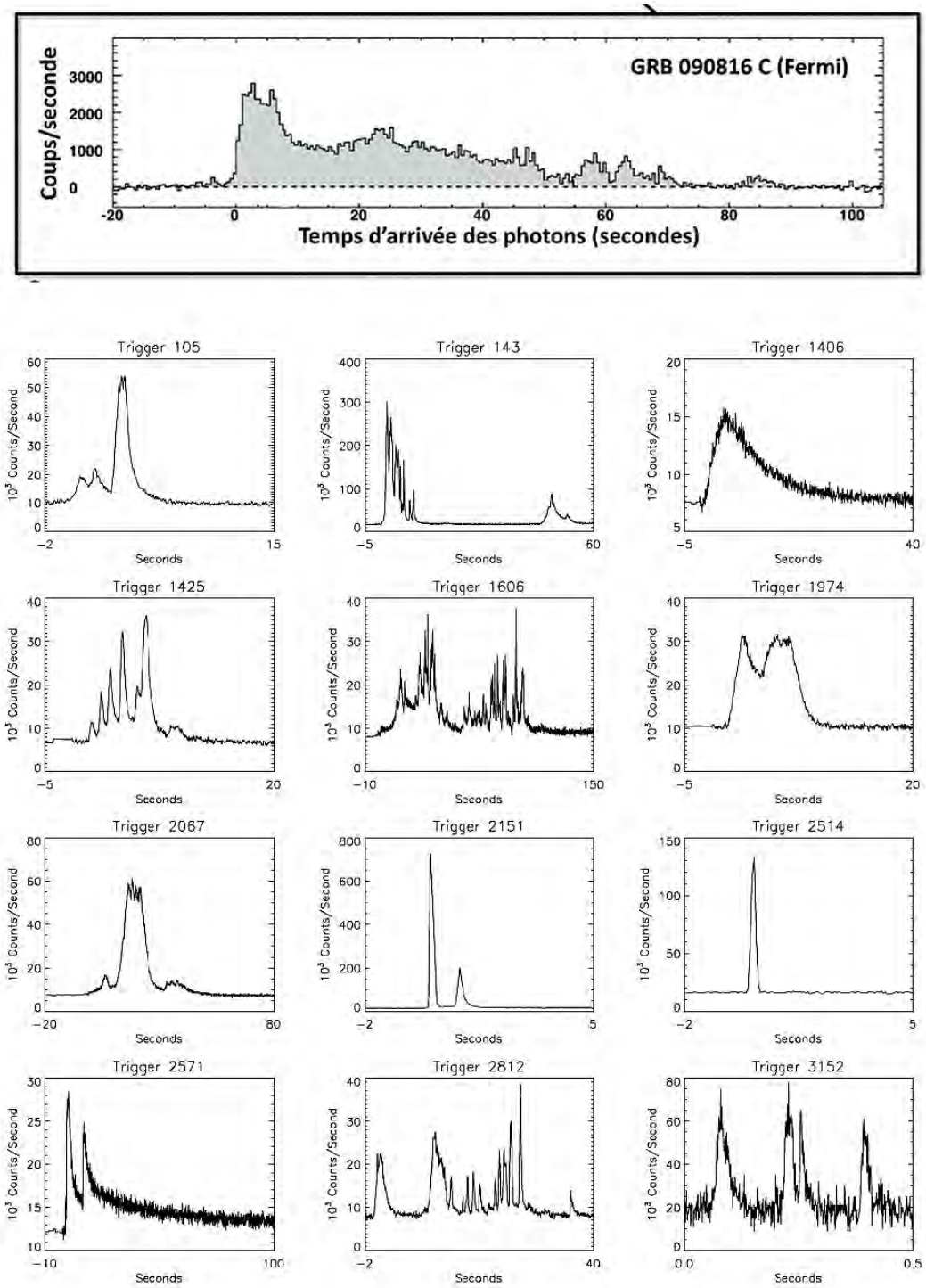


FIGURE 2.5 – Graphe du haut : Courbe de lumière du sursaut GRB 090816 C observé par Fermi, qui montre que le nombre de photons gamma reçus par seconde est très variable. / Graphe du bas : 12 courbes de lumières enregistrées par BATSE montrant la grande variabilité de profils temporels [Kouveliotou et al., 1993].

connaître sa position. Nous allons alors rechercher une contre-partie optique, c'est à dire un objet d'abord découvert dans un domaine de longueurs d'onde autre que le visible (dans notre cas les rayons X et gamma, rayons X).

Quelques définitions pour la suite
Au fil des sections, nous rencontrons des termes ayant trait à l'étude des sursauts, de l'instrument ECLAIRs ou des simulations effectuées au cours de la thèse. Nous parlerons, si nous ne l'avons déjà fait, des notions suivantes :

Le *Peak photon Flux* (en ph/cm^2/s), qui sera vu au chapitre 2.5, est défini comme le nombre de photons par unité d'aire et par unité de temps, dans une gamme d'énergie donnée.

Nous avons discuté au début du chapitre de la *fluence*, qui est l'énergie reçue par unité d'aire (en keV/cm^2 ou erg/cm^2), et qui correspond à l'intégrale dans le temps du flux d'énergie.

Nous avons aussi mentionné le *rapport de dureté*, défini comme le rapport des fluences intégrées dans deux bandes en énergie, généralement [100 - 300] keV et [50 - 100] keV.

Nous pouvons évoquer les *XRFs* (pour X-ray flash), qui sont des émissions transitoires de rayons X provenant d'une galaxie lointaine, probablement causée par une Hypernova, pouvant durer entre 90 et 200 secondes (sursaut énergétiquement mou).

Quand nous parlons de sursauts gamma, nous parlons aussi d'*émission prompte*, qui est généralement interprétée comme l'émission produite au sein du jet relativiste. A la fin de l'évolution d'une étoile massive, il peut survenir l'effondrement de son cœur, ce qui va provoquer des éjections de matière à des vitesses proches de celles de la lumière, suscitant alors une émission gamma.

Nous parlons ensuite d'*émission rémanente* traduisant l'émission due à l'interaction du jet relativiste avec le milieu interstellaire, qui, elle peut durer plusieurs jours, comparativement à une émission prompte.

Nous avons évoqué le *redshift*, pour désigner le décalage vers le rouge cosmologique dû à l'expansion de l'univers. L'importance de ce décalage dépend de la vitesse d'éloignement : un objet qui s'éloigne plus vite qu'un autre a ses couleurs d'autant plus décalées vers le rouge.

Un autre terme qui sera utilisé est le *bruit de fond* : en effet, les images obtenues par ECLAIRs vont se caractériser par du signal utile relatif aux photons émis par la source, mais aussi par ce que nous appelons du bruit de fond. Il peut comprendre en proportions variables une composante poissonnienne (bruit de photons) et une composante gaussienne (électronique), des artefacts liés aux détecteurs (impacts de rayons cosmiques, pixels « chauds »).

2.1.2 Pourquoi faire de la spectro-imagerie de sources transitoires X/gamma ?

La spectro-imagerie peut se faire par le biais de techniques très différentes. Ainsi, nous pouvons définir un spectro-imageur comme un système capable de générer des images résolues spectralement, c'est à dire réaliser des images dans plusieurs longueurs d'onde. Il va permettre de localiser l'origine de chaque photon et d'en mesurer son énergie dans une gamme d'énergie considérée comme continue.

L'usage des spectromètres s'étend sur un large éventail d'applications, allant du domaine médical avec des scanners type PET-Scan (Positron Emission Tomography) ou SPECT-CT (Single Photon Emission Computed Tomography) pour réaliser une imagerie fonctionnelle, en passant par la sécurité des personnes dans des lieux publics avec la surveillance et la détection d'objets potentiellement dangereux comme dans les aéroports par exemple, pour

même proposer des spectromètres portables à fluorescence X pour l'analyse d'échantillons de toutes sortes (analyse des métaux, tri des ferrailles, exploitation minière, étude du sol, art !).

Alors pourquoi ne pas faire des spectro-imageurs pour la compréhension de l'univers ? La mission BepiColombo par exemple, étudie la composition de la surface de la planète Mercure, grâce à la fluorescence X, et l'instrument ISGRI a observé le centre galactique pendant plusieurs années (des dizaines de millions de secondes !), au moyen de son spectro-imageur X.

D'une manière générale, l'imagerie X et gamma sert l'Astrophysique et la Planétologie : elle permet, entre autres, l'étude de la physique des éruptions solaires (X durs), de la production d'éléments lourds dans les restes de Supernovae (raies de titane $\approx$ 70 keV), des lois de la relativité dans les trous noirs (raies du fer à 5,9 keV), et plus généralement l'étude des régions chaudes de l'univers et l'analyse des éléments à la surface des planètes.

Ainsi, c'est tout naturellement que nous allons étudier le ciel en faisant de l'imagerie des sources transitoires X/gamma.

Chaque partie du spectre électromagnétique présente une utilité pour analyser les étoiles et galaxies, notamment les plus éloignées, ainsi que les phénomènes extrêmes type quasars, pulsars ainsi que le bruit de fond cosmologique. Les différents télescopes, qu'ils observent dans le visible, dans l'infrarouge ou dans les X et gamma, sont très complémentaires les uns des autres. Les images de la Voie Lactée de la figure 2.6, prises dans différentes bandes de fréquences illustrent parfaitement cette complémentarité.

Les rayons gamma ainsi que les ondes radio présentent l'intérêt de facilement traverser les nuages de poussières et de gaz qui se situent entre nous et le centre de la Voie Lactée. Les rayons infrarouges permettent au contraire d'analyser ces gaz et poussières chauffés par la lumière des étoiles.

Parmi les nombreux télescopes spatiaux, nous regardons ceux qui travaillent dans les rayons gamma, les rayons les plus énergétiques et de fréquences les plus élevées que l'on puisse observer. En effet, chaque photon gamma transporte plus d'énergie, proportionnelle à sa fréquence, que tous les autres photons.

Nous pouvons classer les rayons gamma en trois gammes énergétiques : les rayons gamma faibles ($E\gamma < 100$ keV, pour kilo électron-volts), les rayons à énergie moyenne ($E\gamma < 1$ MeV) et ceux à haute énergie ($E\gamma \approx 1$ GeV). Pour comparaison, un photon dans le visible se situe autour d'1 eV.

Les rayons gamma, quant à eux, sont générés par les réactions de nucléosynthèse, à l'origine de la création d'éléments lourds à partir de l'hydrogène et des éléments suivants, mais aussi par des particules relativistes, dont la vitesse s'approche de celle de la lumière. Nous les trouvons notamment dans les éruptions solaires, et bien au delà de notre galaxie, dans les noyaux galactiques actifs, quasars et blazars à rayons gamma, ainsi que dans les pulsars.

Il existe plusieurs sortes d'instruments de détection des rayons gamma : les détecteurs simples, les télescopes à masque codé et matrices de détecteurs, les télescopes à focalisation couplés à des matrices de détecteurs et les télescopes Compton, la plupart permettant la spectroscopie des rayons gamma.

Un détecteur à rayons gamma doit tenir compte des contraintes de ce type de rayonnement :

— Les rayons gamma ne peuvent pas être véritablement réfléchis sur une surface pour converger sur un plan focal (leur longueur d'onde est inférieure à la distance entre les atomes).

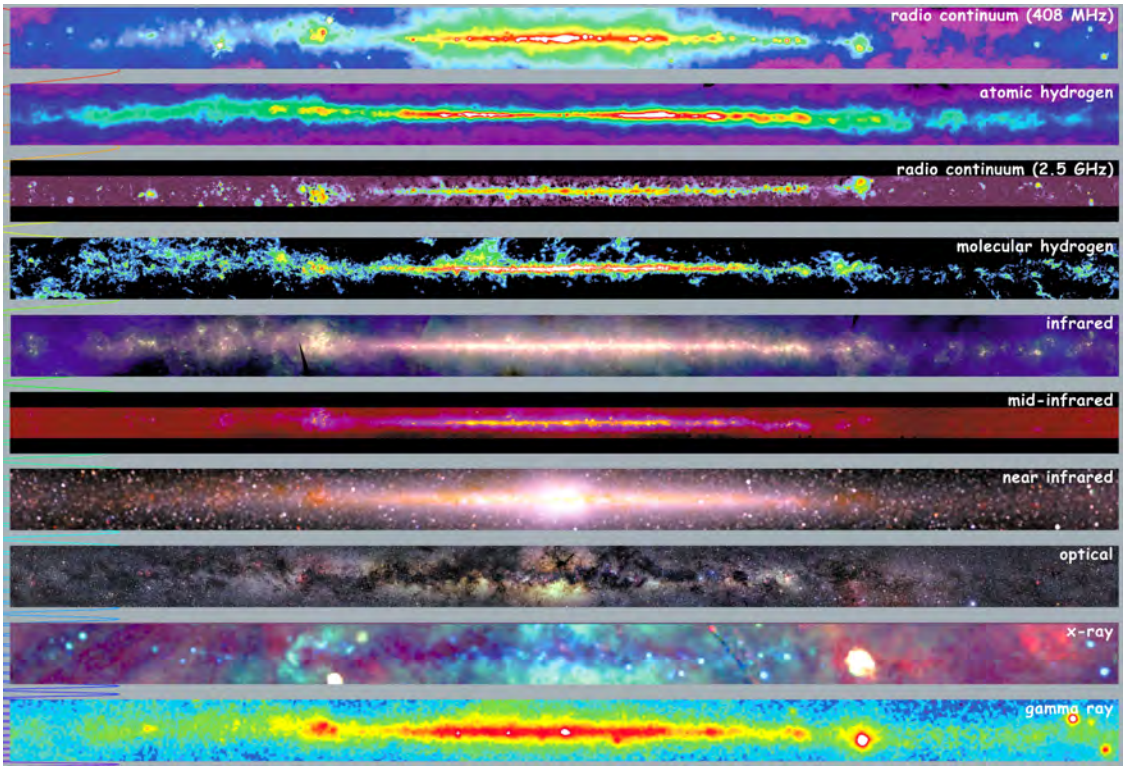


FIGURE 2.6 – Images de la Voie Lactée selon la fréquence d'émission des photons. Credit : NASA Goddard Space Flight Center

— Les photons émis par les objets observés sont rares et les observations doivent donc être de longue durée pour en acquérir suffisamment.
— Les détecteurs peuvent être perturbés par la réception de rayons cosmiques parasites (en général des particules chargées) et il faut donc faire le tri entre les rayons gamma qui nous intéressent et les rayons gamma parasites, souvent très nombreux.

Un des systèmes les plus originaux est celui du détecteur à masque codé qui laisse passer à certains endroits et pas à d'autres les rayons gamma qui sont ensuite détectés par un ensemble de détecteurs situés derrière le masque. Cette technique permet d'identifier la direction des rayons gamma incidents. L'image reçue par le détecteur a en effet une forme unique qui correspond à l'ombre du masque et permet d'en identifier la direction et ainsi l'origine, de manière exacte.

Pour ce qui est de la spectroscopie gamma, elle fonctionne sur le principe d'un tri des rayons reçus par niveaux d'énergie, les détecteurs étant capables de les mesurer.

Ajoutons que bon nombre de satellites dédiés aux rayons gamma sont aussi équipés de détecteurs pour les rayons X et UV, afin de couvrir une grande partie du spectre électromagnétique.

2.2 La physique de détection

Cette nouvelle section, à la fois générale et diversifiée, va traiter de la physique de détection, substrat indispensable à la compréhension des enjeux techniques que l'imagerie des sources célestes transitoires impose. Nous la débutons avec un paragraphe sur les interactions physiques avec la matière : d'abord avec les particules lourdes chargées, puis les électrons et finalement les neutrons. Nous poursuivons avec l'interaction des rayons gamma avec la matière, qui a trait à notre propos, et qui va démontrer la spécificité technologique utilisée pour développer des instruments spatiaux dédiés aux hautes énergie. En effet, détecter des rayons gamma est une technique complexe : il faut des matériaux lourds (de masse atomique élevée), dont les électrons, plus nombreux, vont augmenter la probabilité d'arrêter un rayonnement gamma. Trouver les détecteurs adéquats, qui vont être sensibles dans les gammes d'énergie étudiées, tout en restituant au mieux le flux de photons incident, est une problématique clé de l'étude du rayonnement gamma.

Dans ce chapitre, nous allons expliquer l'interaction de différents types de particules avec la matière (section 2.2.1), et poursuivre en décrivant quelques exemples de détecteurs traditionnellement employés dans la détection des photons gamma (section 2.2.2). Enfin, pour illustrer la thématique de la physique de détection, nous élargirons notre propos pour parler des instruments dans l'astronomie gamma.

2.2.1 Les interactions physiques avec la matière

L'interaction des rayonnements avec la matière, c'est l'échange d'énergie entre les rayonnements, corpusculaires ou électromagnétiques, et les atomes du milieu télescopé. C'est ce processus qui va permettre la détection des particules, qui peuvent être chargées (les particules légères : les électrons et les particules lourdes : alpha, protons, fragments de fission) ou non (neutrons et photons X et gamma).

Le type d'interaction sera déterminé principalement par le fait qu'entre en jeu une particule chargée ou non, avec des mécanismes physiques évoluant selon son énergie, mais aussi selon les propriétés de la matière impactée : son numéro atomique Z, son noyau, ses électrons.

Nous détaillons dans les sections qui suivent les modes d'interaction de chaque type de particule avec la matière, en s'intéressant à la nature, au mécanisme et à la probabilité des processus, tout en analysant les conséquences sur la particule (ralentissement) et celles sur le milieu (effets physiques).

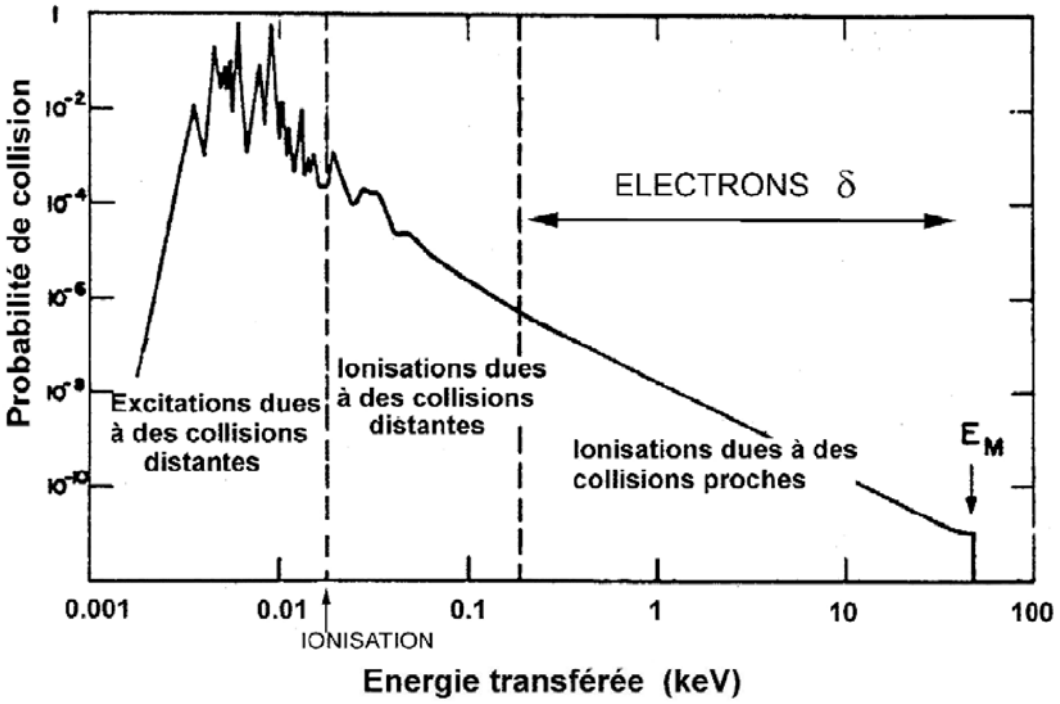


FIGURE 2.7 – Transfert d'énergie aux électrons du milieu traversé par une particule chargée lourde (dans cet exemple, ce sont des particules α de 110 MeV) : le processus d'ionisation démarre au delà du potentiel d'ionisation et les électrons δ sont les électrons d'énergie supérieure à 100 eV. Les électrons déposent leur énergie localement à la suite de nombreuses collisions (énergie absorbée) tandis que les photons transmettent leur énergie à un unique électron qui la déposera ensuite dans le milieu cible (énergie transférée). Credit : Fabio Sauli, CERN

2.2.1.1 L'interaction des particules (légères, lourdes, chargées ou neutres)

En traversant la matière, les particules lourdes chargées comme les protons ou les particules α, soit les particules beaucoup plus lourdes que les électrons, interagissent de façon différente selon leur énergie. A basse énergie, ces particules ont une perte d'énergie dominée par leur interaction électromagnétique avec les électrons atomiques (la taille d'un atome étant d'environ 10^{-10} m et celle d'un noyau étant de 10^{-14}m), tandis que pour les particules lourdes à haute énergie, les interactions nucléaires deviennent importantes (Fig. 2.7).

Dans la plupart des cas, l'interaction électromagnétique d'une particule lourde chargée engendre une ionisation ou bien une excitation des atomes du milieu, c'est à dire qu'une partie de l'énergie cinétique de la particule sera transférée à l'atome. La section efficace étant élevée ($\sigma \approx 10^{-16}$ cm^2), avec une forte densité atomique, la perte d'énergie totale est très importante, même pour une faible épaisseur de matériau. Parfois les électrons libérés sont

assez énergétiques pour ioniser ensuite les autres atomes. Ces électrons sont appelés électrons δ.

En prenant l'exemple d'une particule α, qui a une masse 7000 fois plus importante que celle d'un électron, et donc beaucoup plus lourde, elle ne sera que très faiblement sujette au rayonnement de freinage (7000 fois plus faible).

Si nous regardons le cas majoritaire que sont les interactions des particules chargées avec les électrons, le mécanisme commun est l'interaction coulombienne ; pendant le rapide passage de la particule au voisinage de l'électron, il s'exerce une force coulombienne (positive ou négative) entre les deux charges électriques, qui impulse l'électron : il y a transfert à l'électron cible d'une énergie Q prélevée sur l'énergie E_i de la particule incidente.

Finalement, les interactions des particules lourdes chargées avec la matière sont souvent simulées pour évaluer la dose que les instruments vont accumuler durant la mission, notamment quand ils traversent les ceintures de Van Allen.

Les ceintures de Van Allen : un microcosme de particules chargées

La discussion sur l'interaction des particules chargées avec la matière est pertinente pour SVOM, car il va traverser plusieurs fois par jour les ceintures de radiation. Il est donc intéressant de prendre l'exemple des protons comme particules chargées et lourdes, car une fois en orbite, les instruments du satellite vont rencontrer un large panel de particules, notamment les ceintures de Van Allen, pour les orbites basses.

Ce sont des ceintures magnétiques et électriquement chargées (appelées aussi ceintures de radiations) qui piègent les particules à haute énergie issues du Soleil. Elles « piègent » donc les radiations, et protègent ainsi la Terre, mais pas les satellites !

C'est ainsi que SVOM va plonger dans les ceintures de radiation de l'anomalie Atlantique Sud et vivra des interactions avec les rayonnements les composant. Ainsi, la ceinture intérieure se compose de protons à haute énergie à des flux compris entre 10^4 et 10^5 p/cm^2/s. Sa limite inférieure passe entre 500 et 600 km d'altitude dans l'hémisphère tourné vers le soleil et aux environs de 1600 km de l'autre côté. En raison des particularités du champ magnétique terrestre, il existe une discontinuité importante de ce champ dans l'hémisphère Sud, connue sous le nom d'anomalie de l'Atlantique Sud. Dans cette région, l'intensité des protons piégés ayant des énergies supérieures à 30 MeV est, entre 160 et 320 km d'altitude, équivalente à l'intensité rencontrée ailleurs à 1300 km d'altitude.

Les particules α

Le rayonnement alpha correspond à l'émission d'un noyau d'hélium constitué de deux protons et deux neutrons. Une particule alpha éjectée d'un noyau est animée d'une vitesse très élevée, et se trouve bien plus lourde que les électrons atomiques qu'elle est amenée à rencontrer, comme nous l'avons vu précédemment. Véritable fusée atomique, une particule alpha est peu perturbée par le très grand nombre d'électrons qu'elle arrache aux atomes situés sur son parcours (trajectoire rectiligne), et qu'elle va ainsi ioniser.

La contrepartie de cette ionisation intense est un parcours relativement court, en comparaison d'autres particules, ce qui va avoir pour conséquence un arrêt rapide de son déplacement. Peu pénétrante, quelques centimètres d'air ou de vide ou de plexiglass (matériau utilisé pour l'encapsulation de nos sources scellées) suffisent pour l'arrêter.

Dans la section 5.1 nous étudierons le radionucléide ^{241}Am que nous utilisons comme étalon pour les mesures des détecteurs de ECLAIRs ; il a la particularité de produire une richesse

d'émissions différentes, dont le rayonnement α, qui ne sera pas observé sur les spectres en énergie acquis par nos détecteurs, qui vont arrêter facilement tous les protons de l'américium, car les particules alpha (de quelques MeV dans ce cas) pénètrent très peu dans le CdTe (l'interaction proton-matière étant beaucoup plus « efficace » et les protons perdant très vite leur énergie dans la matière).

L'interaction des électrons

Par rapport aux particules chargées lourdes, les électrons et les positons, légers et rapides, perdent leur énergie à une vitesse plus faible et suivent un chemin beaucoup plus complexe au travers des matériaux absorbants. Les parcours provenant d'une source d'électrons mono-énergétiques pourraient apparaître comme dans le dessin de la figure 2.8 :

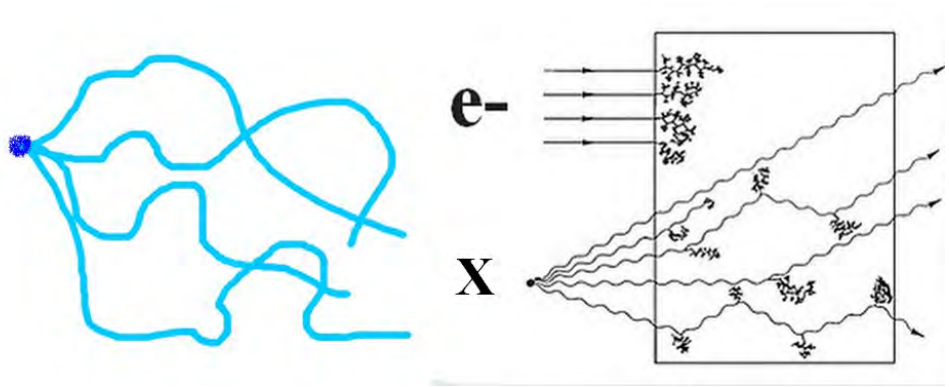


FIGURE 2.8 – Image de gauche : Parcours d'un électron / Image de droite : Energie déposée par des électrons et Energie transmise par un photon très énergétique.

Ces interactions sont les plus probables : l'électron incident transfère une partie de son énergie cinétique à l'électron orbital de l'atome.

Selon la valeur de la quantité d'énergie transférée, c'est à dire selon si l'énergie cinétique de l'électron incident E_i est suffisante ou non pour éjecter l'électron de son orbite, il peut advenir deux phénomènes : une ionisation ou bien une excitation de l'atome cible. Dans le premier cas, E_i est supérieure ou égale à l'énergie de liaison de l'électron de l'atome cible, E_l, ce qui va éjecter l'électron atomique de son orbite avec une énergie cinétique E_i - E_l. L'électron éjecté, dit électron secondaire, peut à son tour créer d'autres ionisations si son énergie cinétique est suffisante.

Le second cas survient si l'énergie E_i de l'électron incident n'atteint pas l'énergie de l'électron orbital : le transfert d'énergie ne peut produire aucune ionisation mais va porter l'électron cible à un niveau énergétique supérieur, aboutissant à une excitation de l'atome cible (Fig.2.8).

C'est ainsi qu'un électron peut subir un grand nombre de déviations le long de son parcours, sa masse étant égale à celle des électrons orbitaux avec lesquels il interagit ; par ailleurs, une fraction beaucoup plus grande de son énergie peut être perdue lors d'une seule collision. En outre, les interactions électron-atome peuvent parfois changer brusquement la direction des électrons.

L'énergie des électrons peut aussi être perdue lors de processus radiatifs, par exemple par l'émission d'un rayonnement de freinage (ou bremsstrahlung : rayonnement électromagnétique dû au ralentissement des charges), qui peut advenir n'importe où le long du parcours de

l'électron. Ainsi, lorsque un électron incident passe à proximité d'un noyau, il subit un freinage lié à une force d'attraction exercée par le noyau chargé positivement. L'énergie cinétique perdue lors de ce freinage s'accompagne de l'émission de rayons X. Ce phénomène peut ainsi se répéter jusqu'à dissipation totale de l'énergie cinétique initiale. La théorie classique définit que toute charge électrique émet de l'énergie lors de son accélération, et les déviations que subit l'électron rapide lors de ses interactions avec le matériau (atome absorbeur ou atome cible) correspondent à une telle accélération.

Parmi les particules étudiées dans ce chapitre et les plages d'énergie qui nous intéressent, seuls les électrons rapides ont une émission de bremsstrahlung significative. En effet, le rayonnement de freinage (ou bremsstrahlung) des particules chargées lourdes est négligeable. Les pertes radiatives sont plus importantes pour des électrons à hautes énergies et pour des matériaux absorbants possédant un nombre atomique élevé. D'ailleurs, les interactions avec des électrons peuvent survenir quand le satellite va pénétrer dans l'anomalie Atlantique Sud, et principalement composée de ces particules de charge négative.

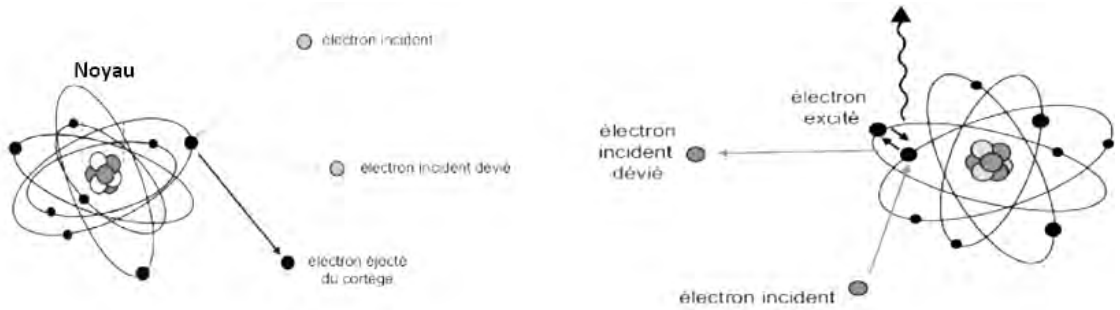


FIGURE 2.9 – Interactions d'un électron incident avec un atome d'un matériau cible - Schéma de gauche : processus d'ionisation, avec l'électron incident qui est dévié (rétro-diffusé) après avoir éjecté de l'atome un électron situé sur une couche interne de celui-ci. / Schéma de droite : processus d'excitation, avec l'électron incident qui est dévié, après qu'un électron orbital est passé sur une couche supérieure. Dans les deux cas, la réorganisation du nuage électronique (l'électron redescend sur une couche inférieure) donne lieu à une émission caractéristique (fluorescence de l'atome ou rayonnement X secondaire).

L'interaction des neutrons

Dans ce paragraphe, nous introduisons en quelques mots le processus d'interaction des neutrons avec la matière, même si le risque pour le satellite SVOM de rencontrer ces particules est faible !

Lorsque la matière est traversée par des neutrons, c'est un autre type d'interaction qui survient. Ces particules étant neutres, il n'y a pas d'interactions coulombiennes comme les particules chargées. Les neutrons ne vont interagir qu'avec les noyaux via les forces nucléaires ; étant donné que les sections efficaces sont faibles (en comparaison avec celles d'un proton de même masse par exemple), alors les neutrons auront une faible statistique de collision sur un plus long parcours et sont des particules très pénétrantes. Les neutrons ne sont pas directement ionisants, mais peuvent produire des particules secondaires chargées qui, elles, sont directement ionisantes. Ils sont classés selon leur énergie : citons par exemple ceux qui excèdent 2 MeV (neutrons de haute énergie) pour lesquels il faut considérer individuellement

les collisions avec les nucléons du noyau.

Les principaux types d'interactions neutroniques sont :

— la diffusion, avec la modification de l'énergie et de la trajectoire du neutron, mais le noyau conserve un nombre de protons et de neutrons identique,

— l'absorption, avec la modification du noyau cible ce qui va induire une émission de rayonnement gamma.

La diffusion sera qualifiée d'élastique si l'énergie cinétique totale du neutron et du noyau est inchangée. A contrario, durant une diffusion inélastique, le noyau cible est amené dans un état excité : le neutron perd une partie de son énergie que l'on retrouve sous forme d'énergie cinétique et d'énergie potentielle du noyau cible. Cette réaction passe par un état intermédiaire où il y a formation d'un noyau composé avec ensuite émission d'un neutron pour reformer le noyau dans un état excité ; dans la plupart des cas, le noyau excité retourne dans son état fondamental en émettant un ou plusieurs photons γ.

Après une absorption de neutrons, un rayonnement secondaire (ou plusieurs) peut être émis, sous forme de rayonnement γ (absorption électromagnétique ou radiative), de particule chargée, de neutrons ou de produits de fission.

2.2.1.2 L'interaction du rayonnement gamma avec la matière

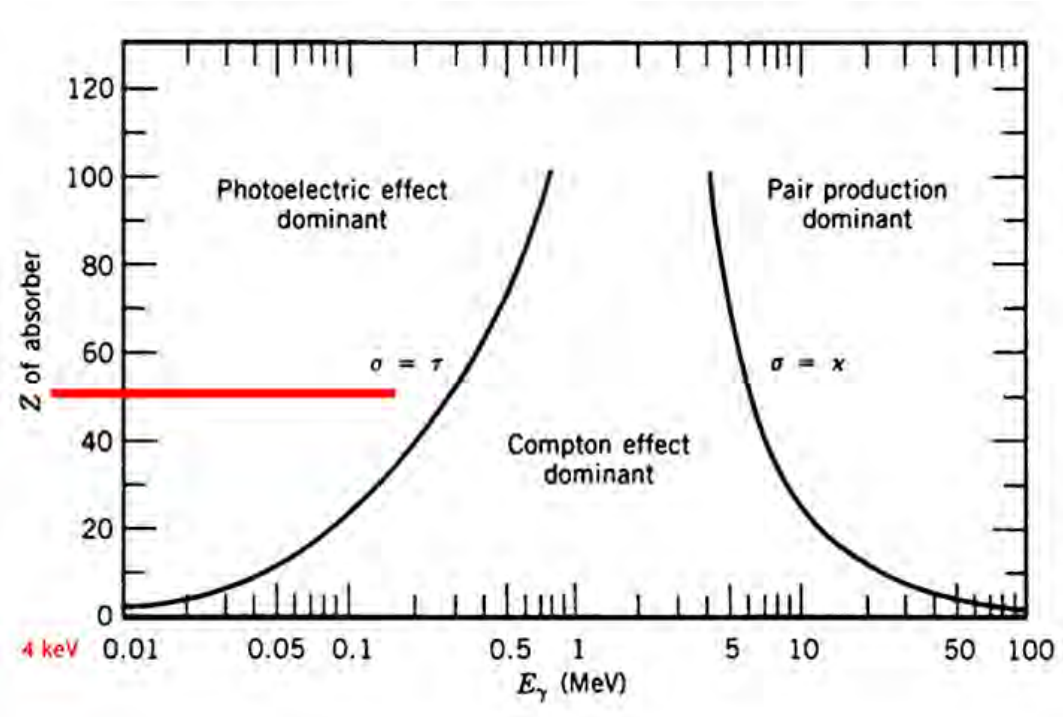


FIGURE 2.10 – Intéraction du rayonnement gamma - Prédominance des effets selon le numéro atomique Z et l'énergie incidente.

Dans cette section, nous nous focalisons sur la physique de détection des photons gamma, thématique au cœur de nos essais. Quand les photons gamma interagissent avec la matière, une partie de leur énergie est cédée à un ou plusieurs électrons ; les mécanismes d'interaction

vont dépendre du matériau traversé et de l'énergie du photon incident. Dans cette section, nous allons décrire ces processus d'interaction.

Le rayonnement gamma est une onde électromagnétique, possédant un fort potentiel de pénétration dans la matière. Son énergie suit la relation suivante :

E = h * ν avec E (joules), h : constante de Planck ($\approx$ 6,63*10^{-34} J.s), ν : fréquence de l'onde électromagnétique (Hz).

Dans le vide, l'énergie s'écrit aussi E = h * c / λ, avec c : célérité de la lumière (299 792 458 m.s^{-1}) dans le vide et λ : longueur d'onde du photon.

L'effet photoélectrique

L'effet photoélectrique désigne le processus pendant lequel un ou plusieurs électrons d'un atome cible, soumis à un flux de photons incidents d'énergie dépassant l'énergie de liaison des électrons atomiques, seront extraits de leur orbite.

Par exemple, pour l'atome d'oxygène, l'énergie de liaison de la couche K est de l'ordre du keV. Si l'énergie du photon incident est inférieure à cette valeur mais supérieure à l'énergie de liaison de la couche L, alors l'effet photoélectrique se produit avec un électron de cette couche externe. En prenant l'exemple d'un atome d'aluminium qui absorbe un photon gamma (figures 2.11 et 2.16), alors un électron de la couche K va être éjecté. L'atome se retrouve excité et instable, et la lacune créée par l'éjection de l'électron va conduire à une réorganisation du cortège électronique. Dans notre cas, c'est un électron de la couche supérieure L qui comble la lacune de la couche interne K, et durant cette transition, un photon de fluorescence X ou un électron en périphérie, située sur la couche M, appelé électron Auger, peut être émis.

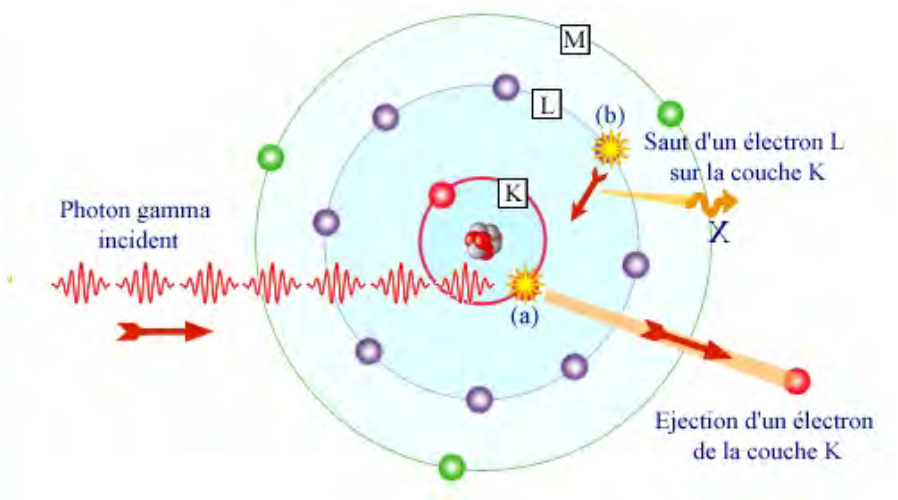


FIGURE 2.11 – Absorption d'un photon gamma par un atome : l'effet photoélectrique se produit en deux temps. D'abord, le photon arrache un électron lié d'un atome (a). Dans le cas d'un photon gamma, il s'agit généralement d'un électron appartenant aux couches les plus internes L ou K. Ensuite l'atome qui a perdu un de ses électrons internes se trouve dans un état excité. Un électron d'une couche plus externe (b) vient occuper la lacune laissée par l'électron éjecté. Si l'électron éjecté appartenait à la couche K comme sur la figure, un rayon X est émis lors de cette transition. L'électron éjecté de la couche K va déposer son énergie dans le détecteur, provoquant un signal électrique (semi-conducteurs), lumineux (scintillateurs) ou thermique (calorimètre). Credit CNRS/In2p3

L'effet Compton

Un autre processus peut survenir lorsqu'un photon gamma interagit avec la matière : l'effet Compton. Dans ce cas, tout comme dans le processus précédent, le photon incident interagit aussi avec un électron, mais cette fois le photon est plus énergétique (rayon X dur ou rayon γ de plusieurs dizaines à plusieurs centaines de keV) et l'électron choqué a une énergie de liaison beaucoup plus faible que celui impliqué dans l'effet photoélectrique (électron des couches externes).

Ici, l'éjection d'un électron va être associée à l'émission d'un photon, appelé photon diffusé, suivant une direction définie par un angle particulier : c'est la diffusion. Ainsi, lors de l'interaction, le photon est dévié d'un angle thêta par rapport à sa direction initiale. Il cède une partie de son énergie à l'électron, ce qui provoque une augmentation de sa longueur d'onde. Cette variation, ainsi que l'énergie résiduelle du photon, sont des fonctions de l'angle de diffusion.

A titre d'exemple, la source de ^{137}Cs, qui émet une raie γ mono-énergétique d'énergie $E_{Cs137[\gamma]}$ égale à 662 keV, donne un spectre caractéristique que nous pouvons voir sur la figure 2.12. Nous voyons, outre le pic à basse énergie qui est une autre raie d'émission issue de la désintégration du ^{137}Cs, un spectre continu de photons diffusés des énergies de $E_{Cs137[\gamma]}$ jusqu'à l'énergie après la *rétrodiffusion* à 180° (photons qui diffusent dans l'environnement et qui reviennent vers le détecteur), égale à 184 keV, en rouge sur la figure 2.12. L'énergie détectée est alors l'énergie transmise à l'électron lors d'une collision Compton, qui peut prendre n'importe quelle valeur entre zéro et l'énergie maximale fournie à l'électron lorsque le photon repart vers l'arrière : dans notre exemple, cette énergie vaut 478 keV.

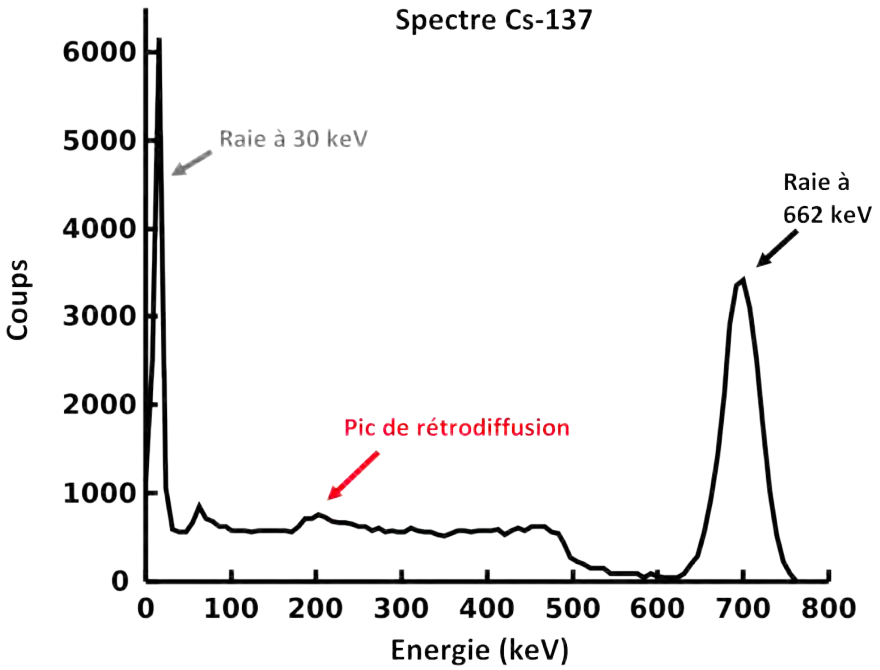


FIGURE 2.12 – Spectre d'une source de ^{137}Cs montrant le pic de pleine énergie $E_{Cs137[\gamma]}$ à 662 keV, le front Compton à 478 keV et le pic de rétrodiffusion Compton à 184 keV. Credit (fichier d'origine avant ajouts) : Dirk Hünniger

Prenons maintenant un nouvel exemple, celui d'un matériau contemporain comme le plastique, qui s'est beaucoup démocratisé depuis 4 décennies. Composé de carbone, d'hydrogène, d'oxygène et autres éléments courants comme l'azote et le soufre, ce matériau se distingue par un Z faible. C'est l'effet Compton qui sera alors prédominant, et qui peut poser problème dans notre cas, car il peut engendrer beaucoup de diffusions lors de nos tests de calibration et acquisitions spectrales. En effet, nous utilisons des sources radioactives scellées dans une encapsulation de type plastique.

Dans le cas du CdTe, le semi-conducteur montre un Z équivalent (vu en section 4) plus élevé que le Plexiglas (entre 6 et 20 protons selon la composition du polymère). La figure 2.10 montre les trois modes d'interactions principales des photons gamma avec la matière : nous voyons ainsi que la gamme d'énergie de l'instrument ECLAIRs (segment rouge délimitant les énergies inférieures à 150 keV) se situe essentiellement dans le domaine où l'effet photoélectrique est dominant.

La production de paires

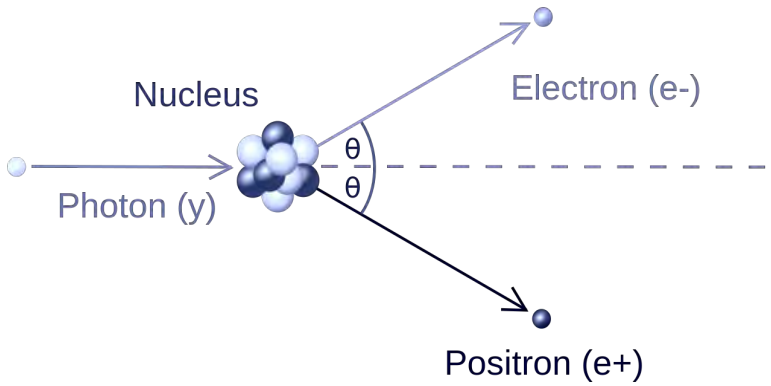


FIGURE 2.13 – Création de paire par interaction d'un photon gamma dans le champ d'un noyau atomique.

Le troisième effet qui peut survenir lors d'interactions de photons gamma à travers la matière, est la création de paires e^+/e^-. Ce mode, dominant pour des énergies photon élevées (au dessus de 1,02 MeV), va produire un électron et son antiparticule, le positon (Fig. 2.13).

L'énergie du photon incident est convertie en masse (électron-positon de masse égale à 0,511 MeV chacun) dans le champ d'un noyau atomique ; ensuite, ces nouvelles particules vont subir des chocs avec pour conséquence la perte de leur énergie cinétique.

Une fois cette énergie cinétique dissipée, le positon s'annihile avec un électron en générant une paire de photons de 511 keV émis à 180° l'un de l'autre. C'est le phénomène d'annihilation, défini par la transformation en énergie de rayonnement de l'énergie totale (masse et énergie cinétique) de deux antiparticules.

Dans notre étude, c'est un processus qui n'apparaît pas, car l'émission gamma la plus élevée dans les calibrations est de 722 keV.

L'atténuation des rayonnements électromagnétiques

Ici, nous introduisons la notion d'atténuation d'un faisceau de photons traversant la matière.

En l'absence de matière, le flux surfacique de photons diminue avec le carré de la distance à la source.

Plaçons nous dans le cas où ce flux surfacique est constant (dans le vide), ce qui s'apparente à un flux parallèle. De plus, nous faisons l'hypothèse que le faisceau est mono-énergétique et mono-directionnel (ce qui revient à utiliser un faisceau collimaté) et étudions l'atténuation par un matériau.

Si on ne place aucun écran (matière) entre le faisceau collimaté et le détecteur (D), le détecteur mesure un flux surfacique ϕ_0. Au travers d'un écran, le détecteur mesure un flux ϕ inférieur à ϕ_0, c'est à dire que le faisceau est atténué : il y a absorption.

Quand il traverse un écran, le flux peut aussi aller dans une direction donnée : le détecteur mesure alors un flux diffusé ϕ_d inférieur à ϕ_0 (Fig. 2.15).

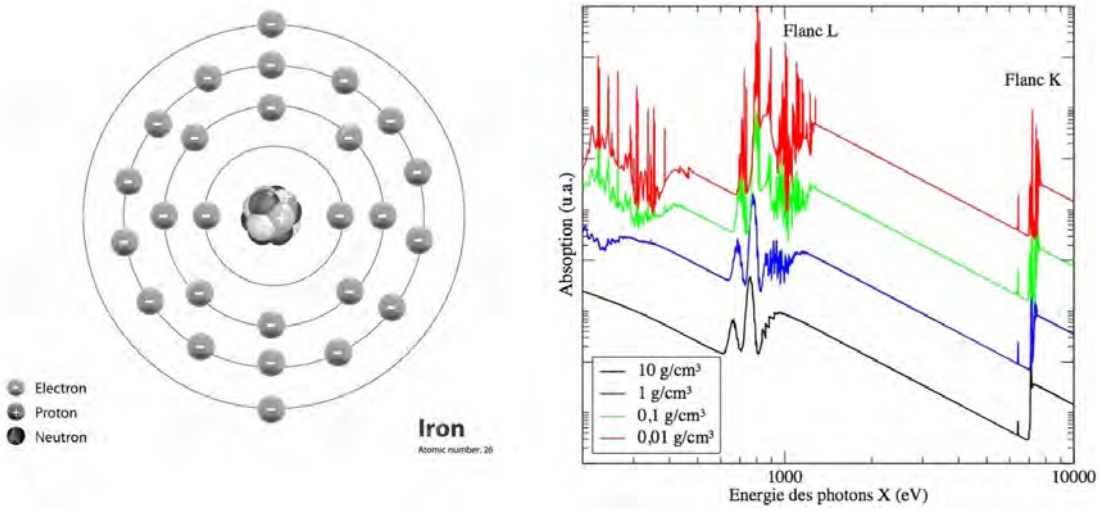


FIGURE 2.14 – Graphe de gauche : Structure d'un atome de Fer constitué de 26 protons / Graphe de droite : Spectres d'absorption X du fer chauffé à 100 eV pour différentes densités : sur une large plage spectrale, le plasma dense est principalement caractérisé par les flancs d'absorption ; le spectre d'un plasma peu dense contient un grand nombre de raies.

Dans cette section, nous abordons la notion d'atténuation par le biais de schémas montrés dans la figure 2.15 [Takahashi & Watanabe, 2001].

Le coefficient d'atténuation exprime la probabilité qu'a un photon d'interagir avec la matière. On suppose qu'un faisceau de N photons traverse une épaisseur de matière dx.

Pour des épaisseurs faibles, le nombre de photons qui sont absorbés ou diffusés dans l'épaisseur dx est proportionnel au nombre de photons incidents N et à l'épaisseur dx de matière traversée ; après leur passage, il reste (N - dN) photons transmis, soit : dN(x) = $-\mu$ N(x)dx, avec μ qui dépend de la matière traversée et de l'énergie hν des photons et qui s'exprime en cm^{-1}. C'est le coefficient d'atténuation linéique.

On a alors la loi d'atténuation des photons, fonction exponentielle telle que : N(x) = $N_0 \exp(-\mu x)$. Si l'on raisonne en flux de photons, cela donne $\Phi = \Phi_0 \exp(-\mu x)$.

On définit conséquemment la couche de demi-atténuation (CDA), telle que le nombre de photons incidents est divisé par 2, soit CDA = $\dfrac{\ln(2)}{\mu}$.

La CDA dépend du milieu absorbant (numéro atomique et état : gaz, liquide ou solide)

et de l'énergie des photons. De plus, après un trajet égal à n CDA, le nombre de photons est divisé par 2^n. Un exemple de calcul d'atténuation à partir des tables du NIST se trouve en annexe A.1.1.

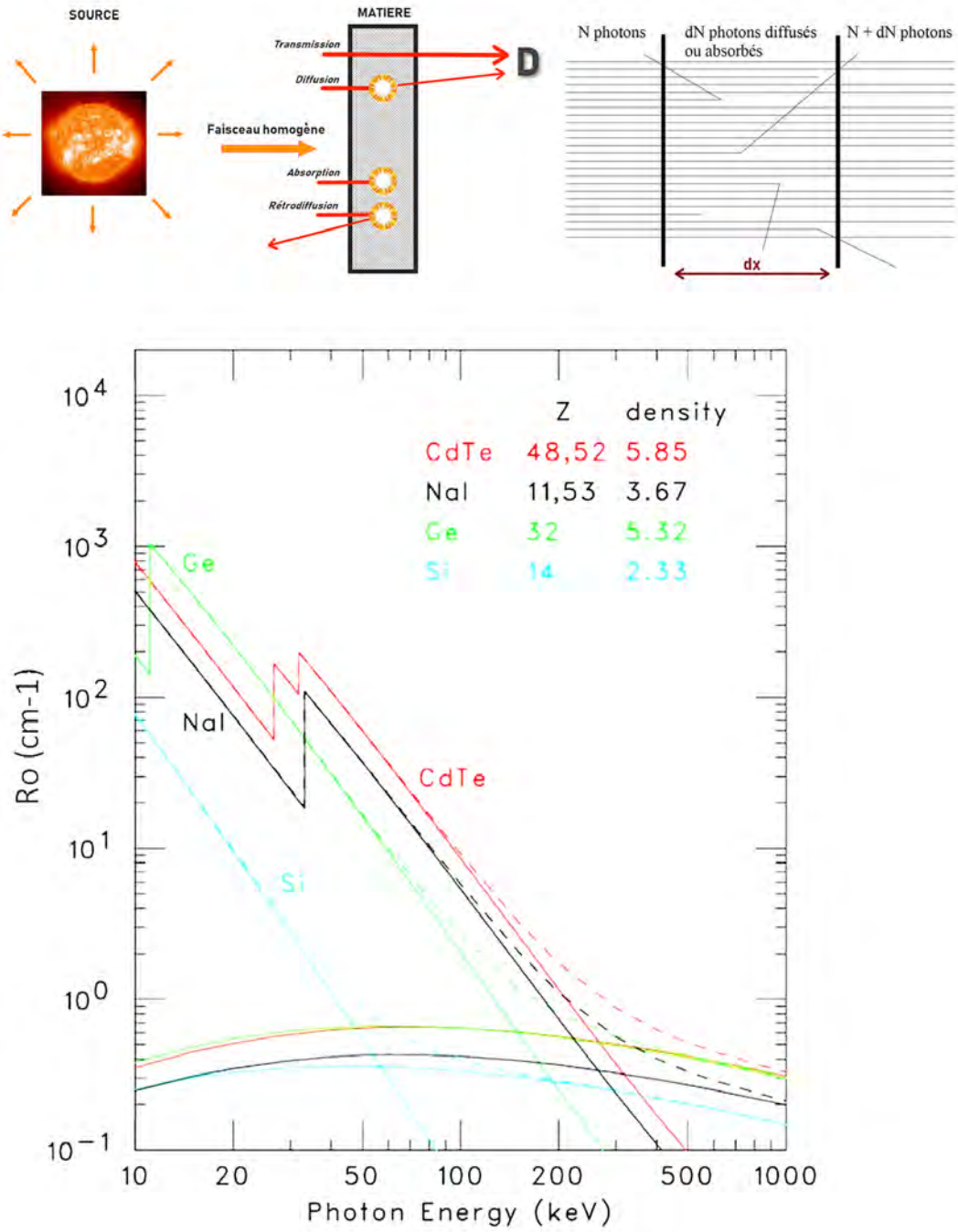


FIGURE 2.15 – Graphe du haut : Processus d'atténuation / Graphe du bas : Courbes de coefficients d'atténuation linéique pour différents matériaux : CdTe (rouge), Germanium (vert), Si (cyan) et NaI (noir) [Takahashi & Watanabe, 2001].

Association dans l'interaction	**Effet physique**
Particule chargée + e- atomique	Excitation ou ionisation de l'atome
Particule chargée + noyau	Diffusion élastique, inélastique, production de paires, Bremsstrahlung
Particule neutre + (e-, noyau)	Pas d'interaction
Photon + e- atomique	Photo-électrique, diffusion Compton, Production de paires, dissociation nucléaire
Radiation cohérente	Radiation Cherenkov, radiation de transition

TABLE 2.1 – Interactions physiques.

2.2.1.3 Conclusion

Pour résumer cette section, les particules peuvent être groupées selon les interactions auxquelles elles participent : interaction faible (lepton [électron - muon - neutrinos]), interaction forte (hadron [α - p+ - n - π]) et interaction électromagnétique (photon), qui nous préoccupe.

D'une part, les interactions faibles sont négligeables dans la plupart des cas, sauf pour les interactions des neutrinos avec les électrons atomiques et les noyaux. D'autre part, les interactions fortes sont dominantes dans les interactions entre les hadrons à haute énergie et les noyaux.

Enfin, selon l'énergie, la charge, le type de la particule, et la matière du milieu de détection, nous avons vu que les interactions dominantes sont :

— à basse énergie, les interactions avec les électrons atomiques (excitation, ionisation),
— à haute énergie, les interactions avec les noyaux.

Dans le cas des particules neutres, ce sont les particules chargées secondaires créées par interaction qui seront détectées.

Dans tous les cas, nous allons exiger d'un détecteur qu'il mesure au mieux l'énergie déposée par une particule dans la matière, ce qui nous amène à la description des différents types de détecteurs.

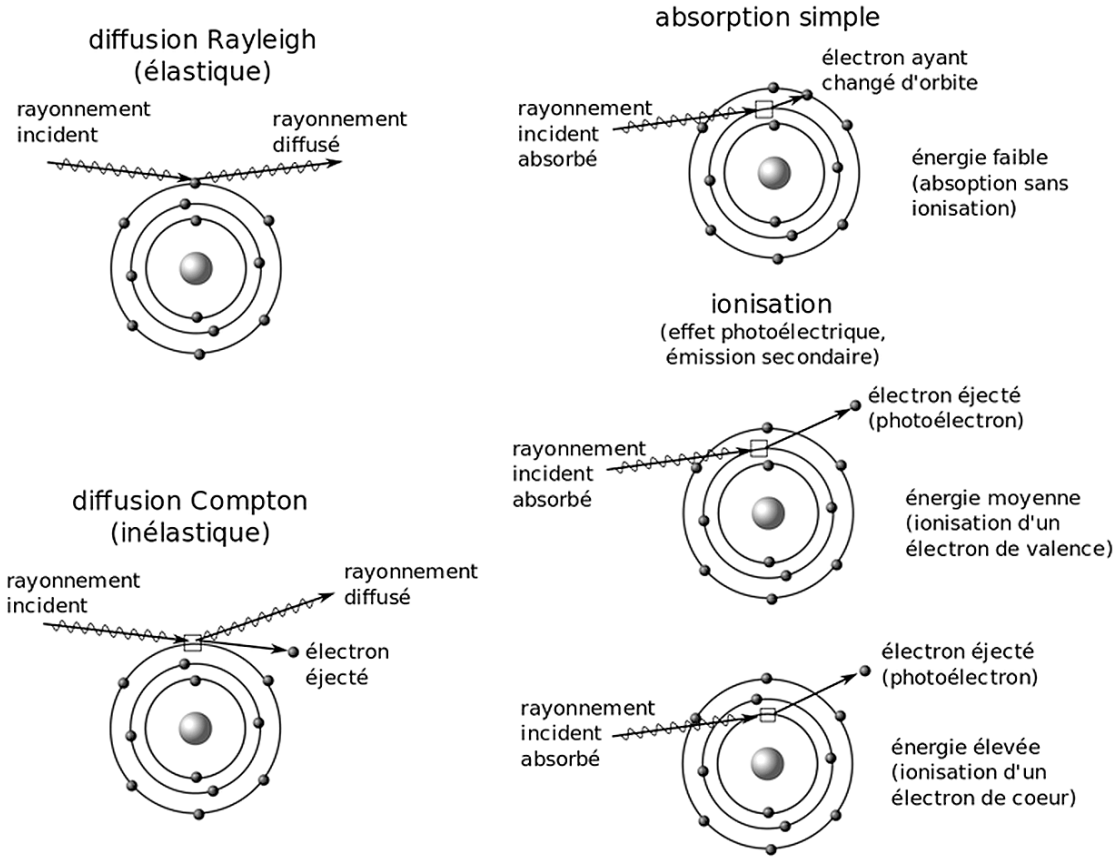


FIGURE 2.16 – Interactions du rayonnement avec la matière : représentation de différents effets.

2.2.2 Les détecteurs de photons X et gamma et leur électronique de lecture

Comment récupère t-on le signal si spécifique d'un détecteur de photons X/gamma ? C'est la question à laquelle nous tenterons de répondre dans cette section.

Avec une gamme d'énergie au delà du MeV, le domaine des rayons gamma est immense : nous devons alors sélectionner les détecteurs les plus sensibles dans les bandes spectrales étudiées, et ce parmi de nombreuses technologies.

En effet, le choix de détecteurs est large : ils peuvent servir à compter les particules émises par des noyaux ou des atomes instables, mesurer leur flux moyen, quantifier leur énergie, déterminer leur position spatiale, voire leur nature.

Comme nous l'avons vu dans la section 2.2.1, l'interaction avec la matière sera différente selon la nature des particules et rayonnements. Non seulement, le produit de cette interaction conditionnera le choix du type de détecteurs, mais aussi son interaction avec le milieu du détecteur.

La libération d'électrons et d'ions est exploitée dans les détecteurs gazeux (chambres d'ionisation, compteurs à gaz, compteurs Geiger-Muller,...), détecteurs liquides et détecteurs solides (semi-conducteurs), les photons secondaires sont produits dans les scintillateurs, l'émission instantanée de photons peut-être utilisée dans un compteur de type Tcherenkov.

Par exemple, dans le cas d'un détecteur gazeux, une particule chargée traversant un gaz

ionise celui-ci par des collisions avec le cortège électronique. Les électrons éjectés peuvent rester libres, dans les gaz nobles par exemple, ou être rapidement capturés par certaines molécules, comme l'oxygène. Si un champ électrique est appliqué dans le milieu ionisé, plusieurs phénomènes sont observés, suivant la nature des gaz et l'intensité du champ électrique.

Le panel de détecteurs étant large, je vais restreindre les exemples de détecteurs à ceux qui ont été utilisés par de nombreux instruments spatiaux, comme les diodes germaniums, et les scintillateurs couplés à des photomultiplicateurs, qu'il est intéressant de présenter pour les comparer aux performances des détecteurs de ECLAIRs. Je parlerai brièvement des détecteurs SiPM, qui apparaissent comme de bons candidats pour remplacer les photomultiplicateurs, et bien adaptés au domaine d'énergie qui nous intéresse. Je conclurai la section avec une présentation des détecteurs utilisés sur ECLAIRs, les semi-conducteurs CdTe.

2.2.2.1 Les diodes de germanium et les scintillateurs

Dans cette section, nous discuterons de détecteurs largement utilisés sur des grands télescopes spatiaux, à savoir les diodes de germanium.

Les HPGe (Germanium haute pureté), permettent de détecter des rayonnements gamma avec une très grande résolution en énergie. Son numéro atomique élevé (32), favorise l'interaction des photons, et sa grande pureté cristalline (10^9 at/cm^3 d'impuretés résiduelles) permet de réaliser des détecteurs dont l'épaisseur active peut atteindre plusieurs centimètres.

Étant sensibles dans une gamme d'énergie étendue, allant de 3 keV à 10 MeV, ces détecteurs germanium ont séduit beaucoup de missions spatiales étudiant des thématiques différentes (*INTEGRAL*,*WIND*, *MARS ODYSSEY*,...).

Son principe de fonctionnement est le suivant : lorsqu'un photon X ou gamma interagit avec le détecteur Germanium par effet photo-électrique, Compton ou création de paires, il aura pour effet de céder une partie de son énergie aux électrons du cristal (qui vont déposer leur énergie de la bande de valence créant de multiples paires électron-trou). Ils vont pouvoir créer une population de charges secondaires (paires électron-trou) qui vont alors passer le gap d'énergie et être accélérées par une haute tension (en appliquant une différence de potentiel sur les électrodes du détecteur germanium, les électrons vont être séparés des trous et seront envoyés vers les électrodes pour leur collecte). Tout ceci induit un courant dont la quantité de charge obtenue (observation d'un pic ou impulsion) est proportionnelle à l'énergie déposée dans le cristal par le rayonnement initial.

Appartenant au groupe IV de la classification périodique, un détecteur Germanium est un semi-conducteur, dont la mobilité des porteurs de charge diffère selon leur nature, électron ou trou. Faisant la corrélation entre la vitesse moyenne de déplacement des porteurs de charges, et le champ électrique, il est intéressant de la connaître, car elle varie fortement avec la température et les impuretés présentes dans le cristal. Dans le cas du germanium, les électrons ont une mobilité quasi-double des trous.

Selon la théorie des bandes, les électrons des couches externes d'un cristal de Germanium se répartissent en deux bandes continues : la bande de valence et la bande de conduction, séparées par un gap (bande d'énergie interdite). A basse température, la bande de valence est pleine tandis que la bande de conduction est vide. Si la température augmente ou s'il y a photo-excitation, des électrons peuvent traverser le gap et se retrouver dans la bande de conduction, laissant derrière eux des trous. D'autres électrons peuvent prendre la place des trous et ainsi de suite, ce qui fait que chaque paire électron-trou est en mouvement et crée de fait un courant qui peut être mesuré.

La haute pureté garantit que les électrons et les trous peuvent traverser, sans être piégés, le volume total du cristal et que le volume du détecteur peut être déplété (appauvri) des porteurs de charges dus aux impuretés grâce à l'application d'un champ électrique d'environ 1000 V/cm. La faible largeur de la bande interdite (0,66 eV) donne de bonnes statistiques de comptage pour la paire électron-trou libre, mais nécessite de très basses températures de fonctionnement (inférieures à 130 K) pour éviter une excitation thermique importante qui amène les électrons dans la bande de conduction, et par conséquent une augmentation du courant de fuite. Cette forte contrainte, notamment dans le domaine du spatial, conduit les architectes instrumentaux à refroidir les détecteurs germanium à des températures proches de celle de l'azote liquide pour bénéficier de leurs performances. Une résolution en énergie d'environ 2 keV FWHM au pic de 662 keV ($\approx 0,3\%$) peut être atteinte dans le cas d'électronique front-end bas bruit.

Ses principaux avantages sont, d'une part, la chambre d'ionisation solide de densité élevée ($\approx 10^{22}$ atomes/cm^3) et, d'autre part, sa faible énergie moyenne de création de charges (≈ 3 eV contre 30 eV dans les scintillateurs). Par ailleurs, son numéro atomique (32) ainsi que sa densité (5,323 g/cm^3), tous deux supérieurs à ceux du silicium, en font un détecteur ayant un fort pouvoir d'arrêt. Les parties négatives (n) et positives (p) du semi-conducteur (Cf. schéma de la figure 2.17) ont chacune leurs porteurs de charge associés : les électrons pour la zone n et les trous pour la zone p. La zone intermédiaire est qualifiée de zone de déplétion, sa longueur varie en fonction du champ électrique appliqué ϵ et de la concentration en impuretés N selon la formule suivante : d = 2 *ϵ * V / (e*N).

Le champ sera ajusté de telle sorte que la longueur de déplétion soit de l'ordre du volume actif du détecteur pour avoir une collecte de charges optimale ; le détecteur Germanium étant généralement assez gros, il faut travailler avec des hautes tensions de plusieurs milliers de volts. De plus, quand on parle de Germanium haute pureté, c'est que la concentration en impuretés ne dépasse pas le millier d'atomes par cm^3. Pour établir une conductivité dans le germanium, on implante une impureté de type p (qui enrichit le germanium en trous, par le biais du bore par exemple) ainsi qu'une impureté de type n (qui enrichit le germanium en électrons, par du lithium par exemple). Suivant la disposition de ces impuretés, le détecteur est dit de type n ou de type p. Si le détecteur est de type n, cela permet d'obtenir une meilleure résolution pour les hautes énergies car les électrons ont une plus grande mobilité que les trous.

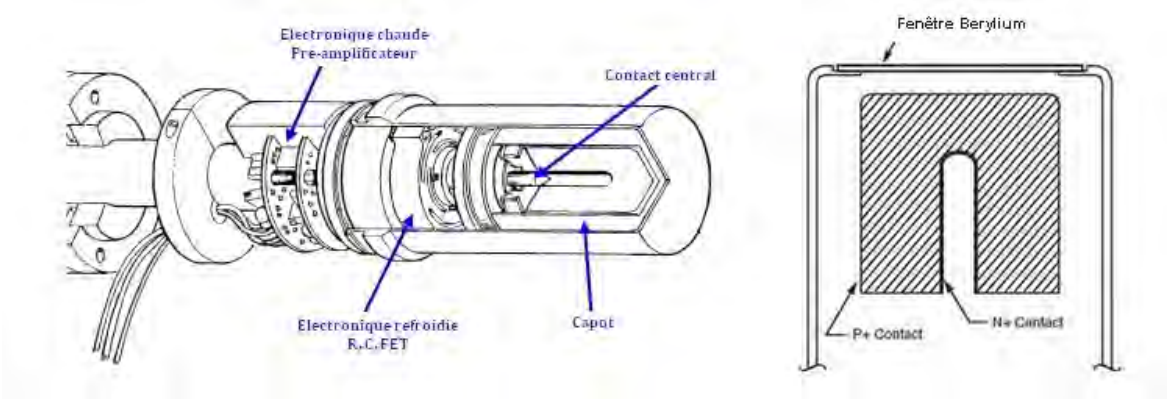


FIGURE 2.17 – Gauche : Vue en coupe d'un détecteur Germanium et de l'électronique front-end associée. / Droite : Schéma simplifié d'un détecteur à semi-conducteur de type n, la partie hachurée représentant le germanium. Credit ORTEC

Pour finir sur le germanium, malgré ses avantages technologiques, nous pouvons souligner certaines contraintes dans le développement et l'utilisation spatiale de ce détecteur : sa fragilité, son coût élevé, la problématique de sa mise à froid qui nécessite un cryostat d'une grande technicité, et des hautes tensions élevées.

D'autres détecteurs fortement utilisés sur les télescopes spatiaux de haute-énergie sont les scintillateurs. Ils transforment les photons provenant de rayonnements X et gamma en photons visibles, qu'un photomultiplicateur va convertir en signal électrique.

Le principe de la scintillation peut être résumé ainsi : l'effet photoélectrique ou Compton va générer un électron énergétique, qui va déposer son énergie en ionisant les atomes du milieu, qui vont émettre de la lumière par fluorescence visible en se recombinant.

Ainsi, lorsqu'un photon gamma pénètre dans un cristal scintillateur, il finit par être absorbé par l'atome cible, auquel il arrache un électron. L'électron est éjecté à grande vitesse (due à l'énergie du photon), et va ioniser plusieurs atomes autour du point d'interaction. Le cristal se désexcite en émettant entre autres des photons dans le visible. Un photomultiplicateur couplé au scintillateur reçoit et amplifie ce faible signal. Dans ce processus, nous ne connaissons pas la direction d'arrivée du photon gamma. En effet, le signal résultant est le même, d'où que vienne le photon, dont seule l'énergie peut être évaluée. Ces détecteurs ne permettent pas de déterminer finement la fréquence des photons capturés, et donc de faire de la spectroscopie aussi précise que celle qui est permise avec les détecteurs semi-conducteurs.

Cependant, cette technologie est loin d'être obsolète : elle présente en effet plusieurs avantages, comme la bonne robustesse ou le faible coût des scintillateurs, qui permet la construction de grandes surfaces de détection. En constante évolution, elle offre toujours plus de formes différentes de scintillation : les cristaux rapides et de haute densité, généralement dopés au cérium, les films minces pour la tomographie X de très haute résolution, les fibres cristallines avec la technique de MicroPulling qui permet d'obtenir des monocristaux sous formes fibrés, et enfin les scintillateurs à nanoparticules.

2.2.2.2 Des nouveaux photo-détecteurs : les SiPMs

La photodétection est un élément central de l'instrumentation pour l'astronomie spatiale des hautes énergies. Aujourd'hui, le dispositif le plus rapide et le plus sensible est le tube de

photomultiplication (PMT), qui utilise l'effet photoélectrique au niveau d'une photocathode pour convertir le photon incident en photo-électron. Ce dernier va ensuite conduire à la formation d'une gerbe d'électrons secondaires par accélérations successives entre plusieurs dynodes pour produire au final une brève impulsion électrique au niveau d'une anode de lecture.

Le PMT est utilisé en instrumentation spatiale haute énergie pour la détection directe de la lumière (par exemple JEM-EUSO) ou pour la détection de la lumière émise par des scintillateurs (par exemple *SIGMA*, *INTEGRAL*, *Fermi*/GBM, *SVOM*/GRM). Aujourd'hui, un nouveau composant voit le jour qui a vocation à remplacer le PMT dans beaucoup de ses applications futures : le photomultiplicateur silicium, ou SiPM.

Des projets comme NCT (Nuclear Compton Telescope) qui consiste à développer un télescope Compton de nouvelle génération pour l'astronomie gamma du MeV, envisagent d'associer des détecteurs SiPMs (Silicon Photo-multipliers) à des scintillateurs de nouvelle génération (LaBr3, CeBr3). Des progrès récents sur l'utilisation de cette technologie ont été observés dans le domaine médical (Llosa et al. 2011) mais son applicabilité pour l'astronomie gamma spatiale reste à démontrer. Toutefois, les SiPMs sont une voie prometteuse comme remplaçant des PMTs (Bloser et al. 2009), en se positionnant comme alternative intéressante pour le développement des têtes de détection pour l'astronomie spatiale (Miyamoto et al. 2009).

Un SiPM est composé d'une diode avalanche, qui peut être opérée en mode Geiger. Le photoélectron est directement créé dans le Silicium et forme une gerbe de paires électron-trou par effet du champ électrique présent dans la diode. En comparaison aux tubes photomultiplicateurs, le SiPM montre un bruit intrinsèque assez important dû aux déclenchements thermiques des avalanches dans les diodes (courant d'obscurité).

Outre des solutions basées sur un refroidissement du détecteur, l'implémentation d'une logique de coïncidence peut aider à maîtriser ce bruit. En plus, le taux de déclenchements thermiques des SiPMs est assez sensible aux variations de température, effet qui peut être compensé par un ajustement dynamique des gains. Ses atouts sont nombreux : outre son gain élevé, il montre une PDE avantageuse (la « PDE », ou « Photon Detection Efficiency », est la probabilité du SiPM de détecter les photons, et se calcule en divisant le nombre de microcellules activées par les photons par le nombre de photons incidents), et une diaphonie optique (entre cellules d'une même puce) en constante diminution au fil des évolutions technologiques.

Sa petite taille, l'adaptation possible de la géométrie du détecteur au cas par cas, la basse tension de polarisation (en dessous d'une cinquantaine de volts, par rapport à plusieurs kV pour les PMTs), la fiabilité, et à terme le coût, font de ce petit détecteur un candidat idéal pour les futurs petits satellites. Un des paramètres important à maîtriser est le courant d'obscurité (ou « dark current ») qui est une source de bruit intrinsèque au détecteur SiPM, due à l'excitation thermique des électrons.

De par sa dépendance à la température, le SiPM devra être refroidi de quelques dizaines de degrés Celsius pour assurer des performances optimales. La figure 2.18 montre l'évolution des courbes « I-V » (courant d'obscurité en fonction de la tension de polarisation) à différentes températures, à partir de mesures de courant que j'ai effectuées dans le cadre d'une R&T sur la caractérisation et la qualification spatiale des détecteurs SiPM.

Nous voyons que le courant d'obscurité diminue fortement avec la température, et ce dans les différentes phases de fonctionnement du SiPM polarisé en inverse (courant de saturation inverse avant la tension de claquage, mode avalanche pendant lequel le courant augmente fortement avec la tension, et fonctionnement nominal en mode Geiger). Nous pouvons également conclure que le détecteur SensL a une tension de claquage V_{BR} qui diminue légèrement avec

la température (V_{BR} = 24,4 V à température ambiante, et V_{BR} = 23,6 V à −22°C). De plus, nous obtenons un coefficient de température dV_{BR}/dT égal à 15,5 mV/°C, ce qui concorde avec les valeurs du fabricant.

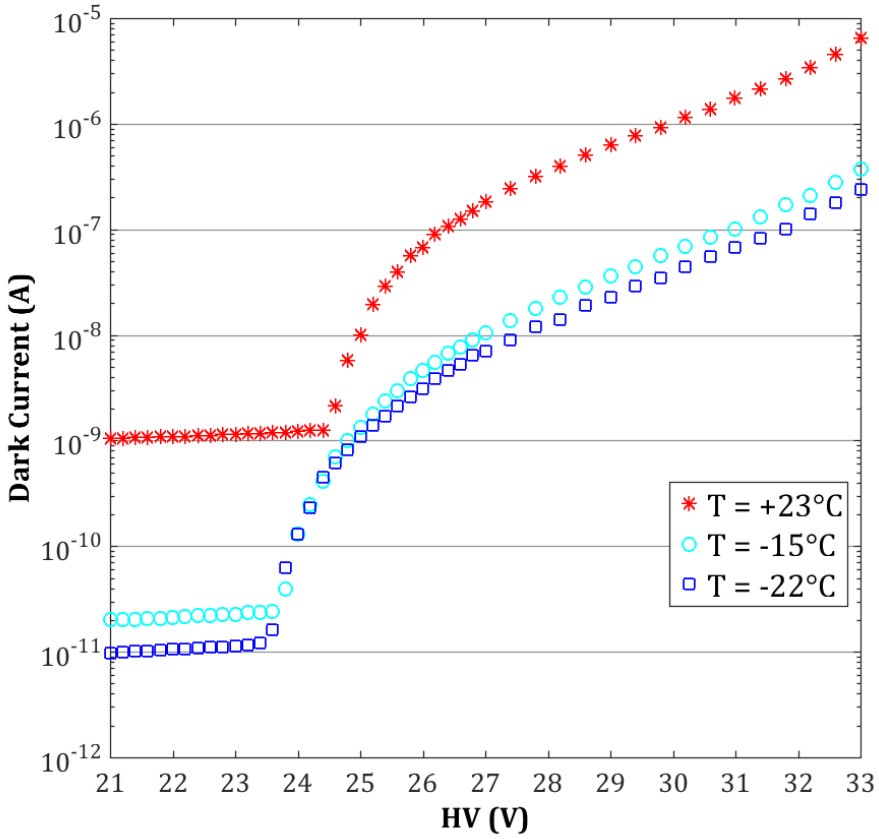


FIGURE 2.18 – Courant d'obscurité en fonction de la tension appliquée à un détecteur SiPM SensL (de zone active 3x3 mm^2 et de taille de pixel 35 x 35 µm^2, mesuré à trois températures : +23°C (rouge), −15°C (cyan) et −22°C (bleu) [Lacombe et al., 2016b].

2.2.2.3 Les semi-conducteurs CdTe

Les équipes de SVOM (IRAP, CEA, APC, CNES) ont relevé le défi d'acquérir des spectres en photons gamma sur deux décades, avec une grande sensibilité. L'exigence d'un seuil bas de détection meilleur que 4 keV, a porté notre choix vers du tellure de cadmium (CdTe) pour développer l'instrument ECLAIRs, caméra clé du satellite, qui sera décrit dans le chapitre suivant (Chap. 3). C'est ainsi que le CdTe présente des avantages certains, comme une efficacité de détection élevée, de bonnes performances spectroscopiques, qui peuvent être déjà obtenues à température ambiante, avec des caractéristiques idéales pour la création de systèmes de détection fiables et compacts dans une gamme d'énergie intermédiaire, contrairement au silicium dont la courbe d'efficacité est optimale dans une gamme d'énergie plus basse, et plus étroite, même s'il a l'avantage d'une meilleure résolution en énergie. Je vois donc dans ces deux technologies plus de complémentarité que de concurrence.

Principe et description

Le tellurure de cadmium est un semi-conducteur II-VI (le cadmium étant un élément chimique du groupe II et le tellure, un élément du groupe VI). Son cristal montre une structure de type Zinc-Blende, dans laquelle les atomes de cadmium et de tellure sont situés sur les nœuds de deux réseaux cubiques à faces centrées décalés d'un quart de la grande diagonale du cube. Chaque atome d'une espèce est entouré de quatre atomes de l'autre espèce (Fig. 2.19).

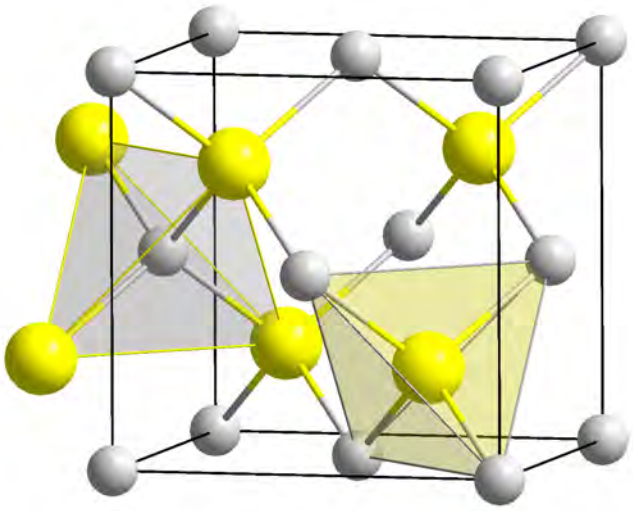


FIGURE 2.19 – Maille élémentaire de la structure cristallographique cubique du CdTe : les atomes de tellurure occupent les sites symbolisés par les grandes sphères et les atomes de cadmium par les petites sphères.

Le CdTe est un cristal dense à fort pouvoir d'arrêt pour les rayonnements ionisants ; cependant, sa manipulation nécessite des précautions particulières car il est très fragile, d'autant que celui que nous avons utilisé pour l'instrument ECLAIRs n'est pas protégé (pas d'anneau de garde sur les tranches par exemple). Il est également sensible à la lumière et aux contraintes mécaniques.

Le CdTe peut-être produit par différentes méthodes de croissance : la méthode THM (Traveling Heater Method) qui consiste à déplacer un lingot de cristal polycristallin pour le chauffer localement. Le cristal est fondu dans un solvant riche en Te et qui re-cristallise ensuite sous forme d'un lingot de haute pureté. Du chlore (C_dCl_2) est introduit dans le solvant pour compenser les défauts natifs, ce qui permet la production de cristaux de haute résistivité électrique. Malgré sa grande qualité cristallographique, cette méthode a l'inconvénient d'être extrêmement lente. Les cristaux obtenus ont une bonne qualité spectroscopique et un bon rendement, et, du fait de leurs propriétés reproductibles, on peut utiliser les détecteurs en grand nombre pour obtenir un plan de détection homogène.

Une autre méthode de croissance, la méthode « Bridgman », est constituée d'une ampoule scellée contenant le cadmium, le tellure et du zinc à l'état liquide. Le mélange est déplacé dans une direction donnée, sous pression contrôlée, dans un gradient de température pour qu'il cristallise en se refroidissant lentement. L'ampoule peut contenir un excès de tellure pour produire un matériau de type p ou un excès de cadmium pour obtenir un cristal de type n. On obtient des cristaux ne présentant que des propriétés assez médiocres en spectroscopie gamma qui sont utilisés comme compteurs.

La méthode Bridgman haute pression (HPB), est similaire à la méthode précédente, mais avec une croissance qui se déroule à très haute pression (autour de 100 bars) dans un creuset en graphite de haute pureté, pour fabriquer des cristaux de CdZnTe, de grande dimension, de très grande résistivité, sans ajout de dopant pour la compensation. Les performances spectrales sont très bonnes mais le rendement faible, avec peu d'homogénéité.

En pratique, les cristaux ne sont pas purs, ce qui a pour conséquence de créer des niveaux profonds dans la bande interdite. Les défauts et impuretés induisent, par les fluctuations des courants qu'ils produisent lorsque le semi-conducteur est alimenté, un bruit électrique qui peut se superposer au signal photon. C'est pourquoi il est nécessaire de créer dans ces détecteurs une zone intrinsèque dépourvue de porteurs de charge libres. Pour cela, on a recours à la compensation. Par exemple, on introduit, par diffusion, du lithium dans le germanium ou du chlore dans le CdTe. Ces donneurs interstitiels compensent les impuretés de type accepteur, génératrices de courant de trous.

Pour revenir à la méthode THM, le cristal de CdTe n'est pas totalement stœchiométrique après la phase de solidification du bain (Cd + Te), et comme le tellure a une température de fusion plus élevée que le cadmium, il va se précipiter en premier s'il se trouve en excès dans le bain. De plus, pendant la solidification du cristal, des lacunes de cadmium apparaissent, qui induisent des niveaux accepteurs dans la bande interdite du matériau. Leur densité est importante et le cristal présente alors une faible résistivité. Pour l'augmenter et atteindre une valeur autour de 10^9 Ω cm, les défauts accepteurs doivent être compensés par une impureté de type donneur.

C'est la raison pour laquelle la croissance THM du CdTe à partir d'une solution riche en tellure conduit à un détecteur de forte résistivité à la condition qu'un donneur superficiel comme le chlore soit introduit dans le matériau, afin de compenser les niveaux accepteurs dus aux lacunes de cadmium. Le chlore, en quantité supérieure au nombre de lacunes dans le CdTe, se fixe préférablement sur les sites tellure.

Le CdTe :Cl THM renferme simultanément des impuretés superficielles de type accepteur et donneur dont les « technologues » essayent d'ajuster les concentrations relatives de manière à ce qu'elles soient à peu près égales. Ainsi, le niveau de Fermi se trouve proche du milieu de la bande interdite pour obtenir un semiconducteur quasiment intrinsèque dont la résistivité est élevée. La concentration du chlore, dont la valeur n'est pas facile à connaître, telle une recette secrète de fabricant, est un compromis entre la quantité suffisante pour augmenter la résistivité et un excès qui pourrait conduire à dégrader la mobilité des porteurs et leur temps de piégeage. C'est avec cette méthode que naissent nos détecteurs pour ECLAIRs.

Performance du CdTe

D'une manière générale, pour limiter le bruit total d'une caméra, nous devons limiter le bruit du détecteur, appelé bruit thermique. En effet, il est directement lié à l'agitation thermique des porteurs de charge du détecteur, qui apparaissent aléatoirement d'autant plus que la température augmente. Pour le maîtriser, il convient donc de travailler à basse température.

Si l'on compare le CdTe au Germanium, ce dernier exige des conditions thermiques très contraignantes qui font tout l'intérêt des détecteurs CdTe, dont les performances sont très bonnes à des températures bien moins froides !

Le bruit d'un détecteur est lié au mouvement des porteurs de charges internes qui dérivent suivant le champ électrique appliqué, c'est à dire au courant de fuite qui lui est proportionnel [Limousin O. (2002)]. Il est vraiment important de bien comprendre la notion de courant de

fuite, car c'est le paramètre majeur qui va limiter les performances spectrales du détecteur, basé ici sur du CdTe.

Dans notre étude, nous travaillons avec des matériaux semi-conducteurs compensés, pour lesquels nous donnons ci-dessous l'expression théorique du courant de fuite, pour appréhender plus facilement les mesures que nous avons réalisées sur plus de 14000 cristaux CdTe.

Calcul du courant de fuite à partir de la densité de charges à l'équilibre

Une liaison de valence peut être brisée si une énergie suffisante lui est apportée, que ce soit sous forme thermique ou lumineuse : on arrache ainsi un ou plusieurs électrons (initialement présents dans ces liaisons). En effet, selon le modèle de bandes d'énergie utilisé, ces électrons de la bande de valence vont passer dans un état situé dans la bande de conduction : cet électron est libre, c'est à dire qu'il ne participe plus à une liaison cristalline, et peut alors participer à la conduction électrique (Fig. 2.20). Il se comporte comme une particule « quasi-libre » dans le semi-conducteur, car il y subit l'influence du réseau cristallin.

Au moment où il apparaît un électron libre dans la bande de conduction (devenue libre en brisant une liaison), une place vide apparaît dans la bande de valence qui pourra être occupée par un autre électron. La figure 2.20 illustre ce processus. A cette place vide est affectée une charge positive (+q) : c'est un trou dont le déplacement sera opposé à celui de l'électron une fois le champ électrique appliqué. La bande de valence étant toujours quasi-pleine, l'étude du mouvement des particules dans cette bande sera simplifiée en ne considérant que le mouvement du trou auquel on affecte une masse effective m_t.

Nous pouvons alors calculer le nombre de places disponibles, occupées ou non, par les électrons dans la bande de conduction, et par les trous dans la bande de valence : ce sont les densités d'états, correspondant aux nombres d'états intégrés dans une gamme d'énergie, évoluant dans un espace à trois dimensions.

Le détecteur CdTe, en régime permanent de polarisation, se comporte de manière résistive à l'équilibre thermodynamique. A partir de la loi d'Ohm, on exprime la densité de courant J selon la conductivité σ et le champ électrique appliqué E :

$$\mathrm{J} = \sigma\ \mathrm{E} = (q\mu_e n_0 + q\mu_t p_0)\ \mathrm{E}\ (\mathrm{A.m^{-2}}) \qquad (2.11)$$

avec :

μ_e / μ_t : mobilité des électrons / trous ($\mathrm{cm^2.V^{-1}\ s^{-1}}$)

n_0 / p_0 : densité de porteurs à l'équilibre des électrons / trous ($\mathrm{cm^{-3}}$)

Les densités des porteurs de charge à l'équilibre thermodynamique s'écrivent :

$$n_0 = N_c \exp(\frac{E_F - E_C}{kT}) \quad / \quad p_0 = N_v \exp(\frac{E_V - E_F}{kT})$$

avec N_c et N_v les densités d'état, respectivement de la bande de conduction et de la bande de valence, représentant le nombre de places disponibles pour les électrons dans chacune des bandes, de valeur :

$$N_c = 2(\frac{2\pi m_e kT}{h^2})^{3/2} \text{ et } N_v = 2(\frac{2\pi m_t kT}{h^2})^{3/2}$$

avec m_e et m_t les masses effectives des électrons et des trous (g).

Dans le cas d'un matériau partiellement compensé de type p comme le CdTe :Cl, la densité de centres donneurs N_D est inférieure à la densité de centres accepteurs N_A. Nous pouvons définir un centre accepteur fictif, qui représente l'ensemble des centres accepteurs non compensés, dont le niveau énergétique noté E_A, se situe près du milieu de la bande interdite.

La densité de porteurs libres dans le détecteur est alors liée à l'ionisation de ce niveau accepteur dont l'énergie d'activation (ou d'ionisation) vaut :

$\delta E_A = E_A - E_V$

On définit la position du niveau fictif E_A dans la bande interdite par rapport au niveau de Fermi, comme ceci :

$$E_F = E_A - kT \ln(\frac{N_A - N_D}{2N_D})$$

Les densités de porteurs de charge à l'équilibre s'écrivent alors :

$$n_0 = N_c \exp(\frac{E_A - kT \ln(\frac{N_A - N_D}{2N_D} - E_C}{kT})$$

$$\text{soit } n_0 = N_c \exp(\frac{\delta E_A + E_V - E_C}{kT}) \exp(-\ln(\frac{N_A - N_D}{2N_D}))$$

$$\text{soit } n_0 = N_c \exp(\frac{\delta E_A - E_G}{kT}) \frac{1}{\exp(\ln(\frac{N_A - N_D}{2N_D}))}$$

D'où :

$$n_0 = N_c \frac{2N_D}{N_A - N_D} \exp(\frac{\delta E_A - E_G}{kT})$$

et, de la même façon :

$$p_0 = N_v \frac{N_A - N_D}{2N_D} \exp(\frac{-\delta E_A}{kT})$$

En négligeant le courant d'électrons dû à la densité n_0, très faible devant la densité p_0 des trous (à température ambiante, nous trouvons à l'équilibre thermodynamique un courant de trous de l'ordre de $\approx$ 10 nA pour un courant d'électrons autour de 10 pA), nous pouvons écrire le courant de fuite de la façon suivante :

$$I_F = JS = q\mu_t p_0 ES = q\mu_t ESN_v \frac{N_A - N_D}{2N_D} \exp(\frac{-\delta E_A}{kT})$$

Le courant I_F(A) est fonction de la température T(K), de la compensation $N_A - N_D$ (cm^{-3}), du champ électrique E (V.m^{-1}), des propriétés de transport des porteurs majoritaires (μ_t), de la géométrie S et de l'énergie d'activation E$_A$ (eV). Si la densité d'états de la bande de valence et la mobilité des trous dépendent peu de la température, l'équation l'énergie d'activation des accepteurs non compensés se simplifie ainsi : $\ln I_F = fn(\frac{1}{T})$ (F2.12)

Par ailleurs, ce courant de fuite évolue en fonction du temps. Après la mise sous tension

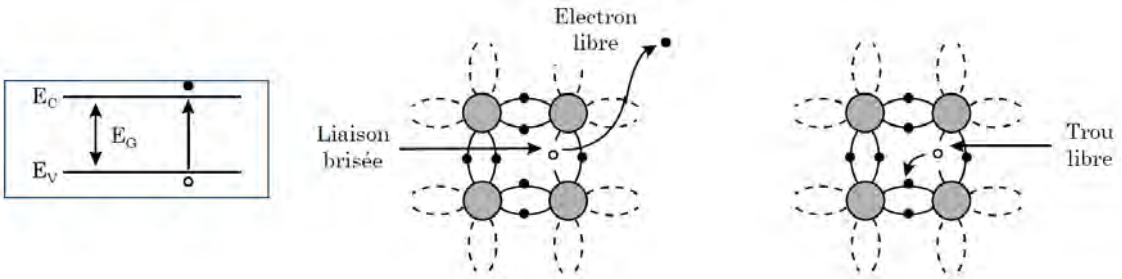


FIGURE 2.20 – Image de gauche : Schéma des bandes d'énergie d'un semi-conducteur : E_V pour la bande de valence, E_C pour la bande de conduction, et E_G pour la bande interdite, de valeur typique autour de 1 eV - Dans le cas d'un conducteur, les bandes se chevauchent tandis que pour un isolant, E_V et E_C sont séparées par une bande interdite de plusieurs eV. / Image de droite : Schéma simplifié d'une étape de conduction dans un semi-conducteur solide : les électrons externes sont engagés dans des liaisons covalentes : lorsqu'une liaison est brisée, par un photon ou par agitation thermique, un électron devient mobile (électron libre) et il est remplacé par un trou. Un électron voisin, libéré par le même phénomène, va occuper cette lacune et laisser à son tour un trou libre.

d'un détecteur dans l'obscurité, à température stable, le CdTe met un temps important avant de se stabiliser. Il y a deux phases caractéristiques qui montrent d'abord un courant fortement variable, avec une diminution rapide, puis un courant stabilisé, quasiment constant.

La forte densité de courant initiale est probablement due à l'injection de porteurs minoritaires (électrons) par la cathode. Ces porteurs ont un temps de transit très bref, dès les basses tensions : leur recombinaison dans le cristal ne se produira pas avant qu'ils ne l'aient quitté pour y être réinjectés plus tard.

Une fois les porteurs minoritaires injectés puis recombinés, le courant d'obscurité, devenu un courant de trous, se stabilise. Les injections directes que sont les générations de porteurs par les photons X et gamma sont trop faibles pour qu'un effet similaire soit perceptible en régime stationnaire. En revanche, une variation brusque de la tension de polarisation, même faible, produira le même effet, avec les mêmes temps caractéristiques.

Pendant le temps de stabilisation, c'est-à-dire immédiatement après une mise sous tension, un détecteur peut paraître trop bruyant pour être sélectionné comme spectromètre. Ce n'est qu'après un certain temps (dans notre exemple de la figure 2.21, au bout de 2h), que la valeur du courant de fuite se stabilise. Ici, la moyenne de 27 courants de fuite augmente rapidement la première heure de polarisation passant de 19 pA jusqu'à la valeur maximale de 28 ± 4 pA pour diminuer et finir à la valeur de 25 pA. Dans cet exemple, nous avons soustrait toutes les voies mauvaises (au nombre de 5), montrant un fort courant (c'est à dire au moins 4 fois supérieur à la moyenne de la première mesure).

Dans le cas d'un détecteur de mauvaise qualité ou instable, le courant a tendance à varier très fortement dans les mêmes temps caractéristiques, pouvant d'abord diminuer pour ensuite augmenter.

Ce qui nous impacte le plus dans notre projet, c'est l'effet des variations de température sur le fonctionnement du détecteur CdTe. Comme vu précédemment, la mesure du courant d'obscurité nous permet de remonter à l'énergie d'activation. Ce paramètre nous renseigne sur l'efficacité de la compensation des accepteurs natifs par le chlore. Typiquement, dans le cas

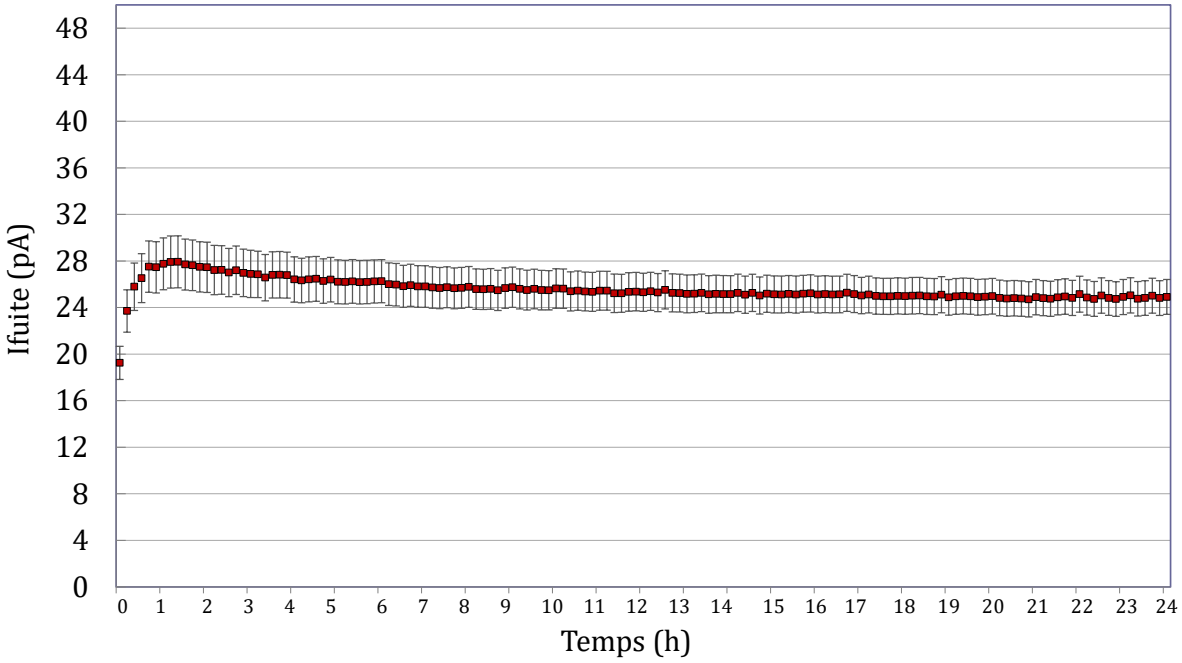


FIGURE 2.21 – Courant de fuite en fonction du temps de polarisation - Moyenne de 27 détecteurs CdTe d'une Céramique Détecteurs refroidie à $-20°C$ avec l'erreur standard associée (écart-type par la racine carrée des 27 valeurs) - Haute tension appliquée = -600 V pendant 24 h de polarisation.

où nous trouvons la valeur $E_A = 0{,}72$ eV, alors le niveau de Fermi est quasiment confondu avec le niveau E_A à température ambiante ($E_F - E_A \approx 3.10^{-2}$ eV). La largeur de bande interdite étant de 1,51 eV, nous confirmons alors le type de conduction p (niveau de Fermi en dessous du milieu de la bande interdite) : le matériau se comporte quasiment comme un matériau intrinsèque (le niveau des accepteurs non compensé est très proche du milieu de la bande interdite).

Dans un détecteur qui présente des instabilités, les valeurs d'énergie d'activation peuvent être bien plus faibles (0,3 à 0,4 eV), indiquant une plus grande probabilité de génération thermique de trous libres (transition entre les niveaux profonds et la bande de valence).

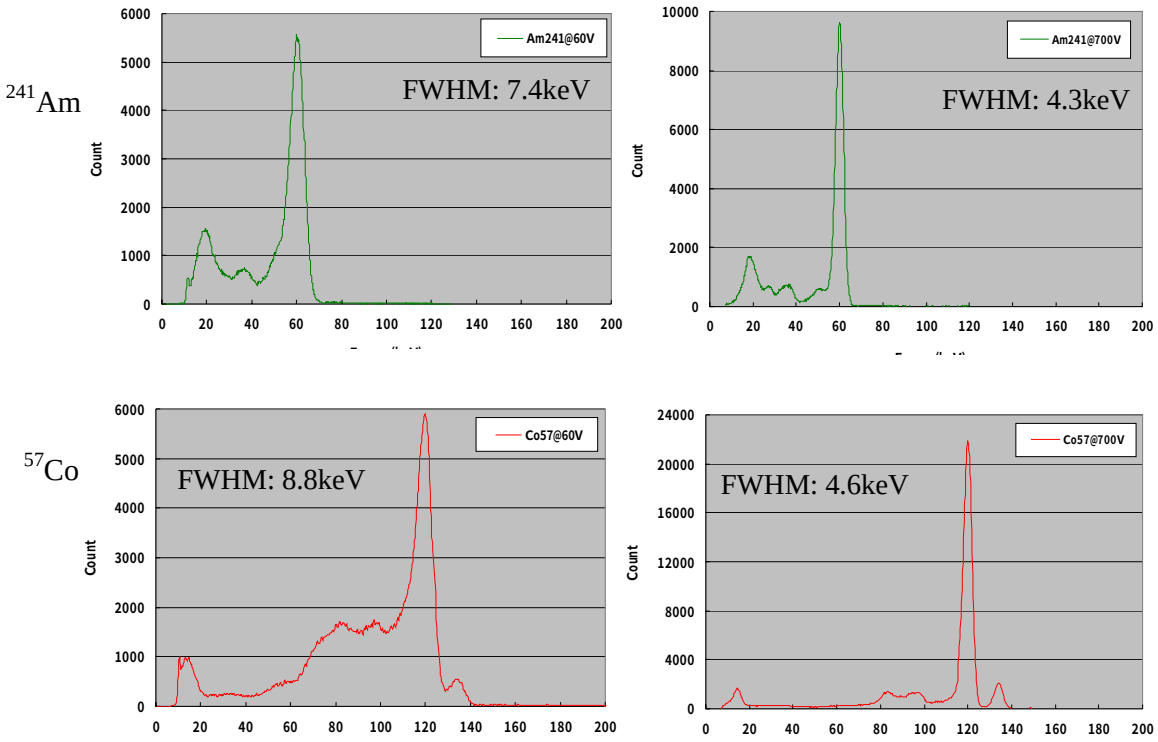


FIGURE 2.22 – Spectres en énergie obtenus par des détecteurs CdTe ACRORAD. Graphes de gauche : Détecteur CdTe de type ohmique polarisé à −60 V, de résistivité à +25°C égale à $1{,}8.10^9$ Ω.cm / Graphes de droite : Détecteur CdTe de type Schottky polarisé à −700 V, de résistivité à +25°C égale à $3{,}7.10^{11}$ Ω.cm, soit un CdTe Schottky 200 fois plus résistif qu'un CdTe ohmique. Credit ACRORAD

Toujours dans le souhait de limiter le courant de fuite, nous avons dirigé notre choix technologique vers des détecteurs CdTe spécifiques. Ainsi, nous aurions pu utiliser des contacts ohmiques pour la caméra ECLAIRs, comme *SWIFT*/BAT, mais nous avons choisi des contacts bloquants dit « Schottky ».

La figure 2.22 montre des spectres de ^{241}Am (courbes en vert) et ^{57}Co (courbes en rouge) réalisés par le fabricant ACRORAD pour observer l'impact sur la FWHM. Nous voyons alors que dans l'exemple des spectres de ^{57}Co, la FWHM, qui vaut 8,8 keV pour un détecteur de type ohmique, est quasiment divisée par deux (4,6 keV) pour un détecteur de type Schottky [Funaki et al., 2007].

Un contact Schottky est un contact métal-semiconducteur dont le potentiel est grand et dont la concentration de dopants est petite. Dans ce cas, la bande de conduction se courbe en s'éloignant de l'énergie de Fermi, et le semi-conducteur devient intrinsèque dans cette région. La concentration en porteurs de charge mobiles diminue, et une largeur de désertion est créée.

Un contact ohmique est un contact métal-semiconducteur qui est caractérisé par une résistance de contact (Pt) négligeable par rapport à la résistance du CdTe. Cela permet un transfert sans difficulté des porteurs majoritaires du semi-conducteur au niveau de ce contact, ce qui ne limite pas le courant. C'est ainsi que l'énergie de la bande de conduction est inférieure à l'énergie de Fermi près de l'interface. Le semi-conducteur se comporte électriquement comme un métal dans cette région avec le résultat de la formation d'un contact ohmique.

Contrairement au détecteur de type ohmique, le CdTe au contact Schottky (In) produit un courant de fuite très faible (absence d'injection de trous) et reste linéaire pour une tension de polarisation allant jusqu'à plusieurs centaines de volts. Néanmoins, des effets dus à une longue polarisation au cours du temps, et qui sont relativement modérés dans le cas des détecteurs CdTe à contact ohmique, peuvent apparaître problématiques avec un CdTe Schottky. En effet, même si les performances des détecteurs de ce type sont remarquables d'un point de vue spectroscopique, ils sont sujets à ce phénomène appelé *effet de polarisation* qui pourra dégrader ses performances spectrales, en induisant une diminution dans le temps de la zone sensible du détecteur par création d'une zone de charge d'espace négative au voisinage du contact bloquant. La situation idéale, dans laquelle le champ est constant dans le volume du détecteur, ne se retrouve plus ici. La présence du contact Schottky induit un champ décroissant depuis l'anode, dès l'application de la tension, processus qui est dû à la zone de charge d'espace créée au niveau de la jonction, et qui a pour conséquence temporelle l'effet de polarisation.

Cet effet, qui disparaît dès l'extinction de la tension (via un temps de recouvrement), peut être atténué par des tensions élevées, et par une basse température, ce qui va dans le sens d'une amélioration des performances en diminuant d'autant le courant de fuite. J'ai pu d'ailleurs étudier l'évolution des FWHM à la température mission de $-20°C$ (ainsi qu'à des températures plus basses), et également sur un temps long de polarisation, avec une haute tension appliquée pendant 24 h. Ces études ont montré que cet effet n'était pas observable dans ces conditions (sections 5.3.2.2 et 5.3.3.2), ce qui est encourageant pour la mission. Ainsi, dans le cas de ECLAIRs, nous réalisons une coupure des hautes tensions, pendant une période limitée (lors des passages SAA), et la durée maximale de polarisation est estimée à 10 h.

Enfin, même si nous n'aborderons pas ici ce paramètre, la tension d'alimentation du détecteur peut avoir une incidence forte sur la performance du CdTe, si elle n'est pas filtrée correctement. En effet, le bruit RMS produit par une haute tension, se traduit directement sur la valeur du courant de fuite.

Au vu de nos nombreuses utilisations de la source ^{241}Am, nous montrons ci-après (Fig. 2.23) un spectre de ce radionucléide obtenu avec différents types de détecteurs. Nous constatons qu'à basse énergie, en dessous de 20 keV, le spectre de Si-PIN est mieux résolu que celui acquis avec un semi-conducteur CdTe ; pourtant, au dessus d'une vingtaine de keV, le détecteur Si-PIN perd en efficacité quand le CdTe reste stable en matière de comptage. Par ailleurs, le détecteur Germanium (HPGe), s'il offre de très belles performances spectrales dans la gamme d'énergie [14 - 60] keV, montre de nombreux pics d'échappement à basse énergie.

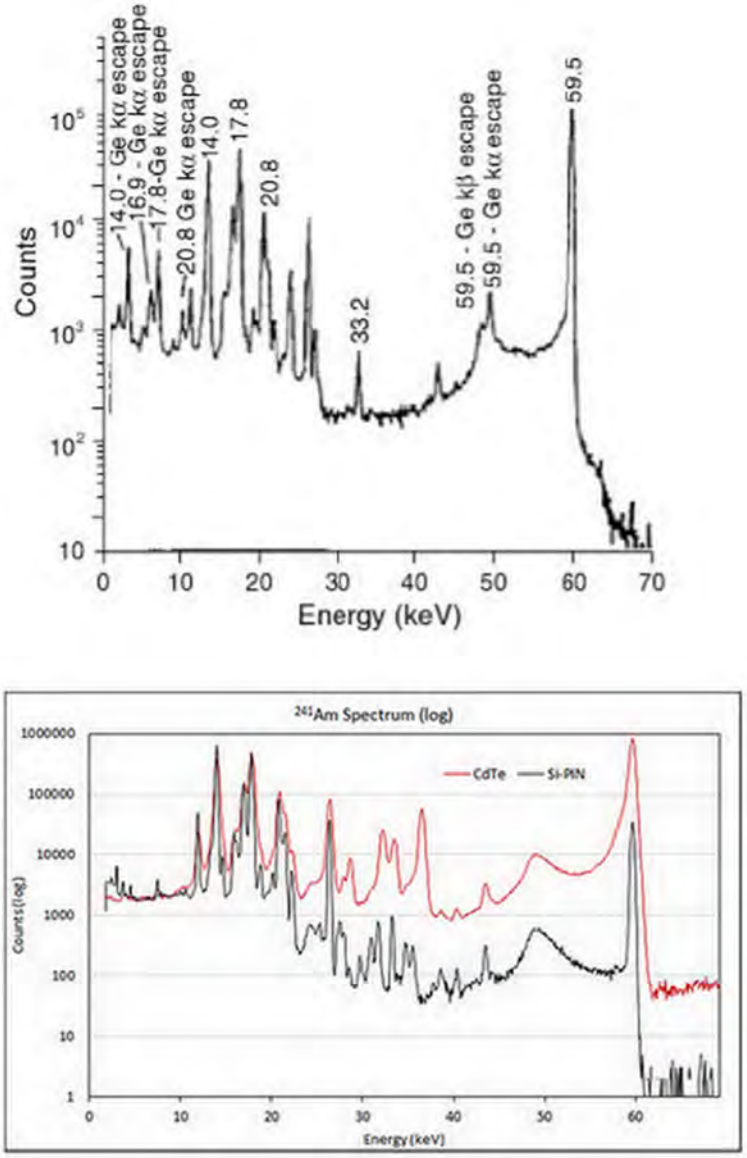


FIGURE 2.23 – Spectres du radionucléide ^{241}Am imagés par différents détecteurs - Graphe de gauche : Détecteur HPGe / Graphe de droite : Détecteur CdTe (rouge) et Photodiode silicium Si-PIN (noir) - Credit AMPTEK.

Caractéristique	Si	Ge	CdTe
N° atomique	14	32	48-52
Masse volumique (g.cm^{-3})	2,33	5,33	5,85
Résistivité^a à 300 K (Ω.cm)	5.10^4	47	10^{10}
Energie Bande interdite (eV)	1,12	0,67	1,44
Energie Création d'une paire e-/h (eV)	3,62	2,96	4,42
Facteur de Fano	[0,08 - 0,15]	[0,06 - 0,12]	[0,15 - 0,2]
Mobilité des électrons (cm^2.V^{-1}.s^{-1})	1350	3900	1100
Mobilité des trous (cm^2.V^{-1}.s^{-1})	480	1900	100
Energie pour une efficacité maximale (keV)	< 10	[100 - 200]	< 50

Table 2.2 – Caractéristiques de détecteurs à semi-conducteurs utilisés sur des télescopes spatiaux dédiés à l'astronomie gamma. ^{a}Pour des matériaux les plus purs.

2.2.2.4 Conclusion

Cette section 2.2.2 nous suggère que l'utilisation de détecteurs à semi-conducteurs apparaît comme la plus adéquat pour la détection des sources transitoires gamma, qu'ils fonctionnent en compteurs, spectromètres ou imageurs. En effet, si les détecteurs à scintillation ont fait leur preuve dans de nombreuses missions à haute énergie, la conversion indirecte montre des limites d'efficacité que les détecteurs semi-conducteurs peuvent compenser. En mesurant directement l'énergie déposée par les rayons X/γ, les semi-conducteurs offrent de bien meilleures performances spectrales, qui s'expliquent au travers des caractéristiques physiques des différents matériaux Si, Ge et CdTe présentées dans le tableau **??**.

Si les premiers détecteurs à comptage de photons reposaient sur l'utilisation de détecteurs silicium, le CdTe est désormais répandu dans de nombreux télescopes, démontrant une efficacité justifiable dans une gamme d'énergie inférieure à 100 keV.

C'est la raison pour laquelle nous avons choisi de construire la caméra de l'instrument ECLAIRs à base de détecteurs CdTe, qui montrent de très belles performances pour la détection des photons X et gamma. Avec leurs propriétés physiques et électriques (un gap de 1,44 eV, une mobilité des trous dix fois plus faible que celle des électrons, une très grande résistivité), ils représentent un compromis intéressant dans la gamme d'énergie du télescope ECLAIRs, même si certains défauts liés à la fabrication peuvent introduire des impuretés dans le cristal, ce qui conduit à des pièges.

Bien que les détecteurs CdTe permettent la collecte des électrons et des trous, ces derniers montrent des propriétés de transport bien moindres que celles des électrons. Nous expliquerons dans le chapitre 4 les caractéristiques approfondies des CdTe Schottky et les problématiques liées à l'utilisation de ces détecteurs, seuls et une fois assemblés sur les Céramiques Détecteurs.

2.3 L'instrumentation pour l'astronomie gamma

Pour l'étude des sources transitoires, nous souhaiterons mesurer à la fois leur position, leur intensité, leur spectre et éventuellement leur polarisation. Pour autant, il semble difficile de mesurer toutes ces propriétés simultanément ; aussi, les instruments sont souvent spécialisés dans un domaine, comme l'imagerie, la spectroscopie, le comptage, etc...

Dans cette section, nous inventorions les différents types d'instruments permettant l'étude de l'astronomie gamma : les compteurs, les spectromètres et les imageurs, en évoquant les notions techniques en lien avec ces systèmes de détection.

2.3.1 Le comptage de photons

Pour aborder la thématique de comptage de photons, nous pouvons différencier les détecteurs capables de mesurer quelques centaines de photons, des détecteurs à comptage de photon unique, capables de résoudre le temps d'arrivée d'un photon.

Dans le domaine du visible, un détecteur classique (en émettant l'hypothèse que chaque photon incident libère un électron par effet photoélectrique) va aisément détecter temporellement plusieurs dizaines de photoélectrons pour obtenir une charge mesurable aux bornes d'un condensateur, mais son gain beaucoup trop faible ne lui permet pas de détecter un photon unique. Pour ce faire, il faut se tourner vers des détecteurs à fort gain, tels que des photomultiplicateurs ou même des SiPMs (section 2.2.2), qui, de par leur technologie, vont assurer le comptage de photons individuels.

Dans le domaine d'énergie de notre étude, nous allons compter les photons individuels avec des détecteurs CdTe, grâce notamment à une efficacité de détection élevée dans une gamme d'énergies inférieures à 100 keV. Le comptage de photons va permettre la réalisation d'images qui vont se former temporellement photon après photon, chacun correspondant à un impact dans le plan de l'image. En outre, le compteur va relater le passage d'un photon en collectant la paire électron-trou créée lors de l'interaction du photon avec la matière, puis va déterminer l'énergie de ce photon incident, corrélée au nombre de charges créées puis collectées sous forme de signal électrique.

Notion de seuil

Le détecteur à comptage de photon utilise la nature corpusculaire de la lumière dont l'énergie est quantifiée : le photon. Quand un détecteur fonctionne en comptage de photons, le signal n'est pas stocké pendant un certain temps, à l'inverse d'un dispositif à intégration. La technique de comptage va alors servir la mesure de très faibles flux de photons, lorsque le rapport signal sur bruit de ce que nous souhaitons mesurer est très faible. En astrophysique et astronomie, les conditions d'observations en rayons X et gamma sont telles que nous nous trouvons souvent dans ce cas.

Ainsi, les systèmes à comptage de photons sont destinés à compter les photons un à un. Si le seuil est suffisamment élevé pour éviter la contribution du bruit électronique, la contribution au bruit qui prédomine est celle due à la statistique d'arrivée des photons appelés plus communément « bruit de photons ». Les autres contributions, dues au détecteur lui-même, à sa mise en œuvre, et à son environnement, deviennent alors négligeables ; cependant, nous faisons le compromis de perdre des photons d'énergie inférieure au seuil.

Pour compter des photons, nous allons initier la notion de seuil. En effet, en plaçant un comparateur de charge au niveau de la quantité de charge mesurée, nous créerons un détecteur à comptage de photons. Si cette quantité de charge est supérieure à un seuil prédéfini, le comparateur incrémentera un compteur. C'est ce compteur qui définira le comptage et permettra aussi la formation d'une image en utilisant plusieurs « pixels », capables de compter les photons à plusieurs positions derrière le masque.

Amplification du signal détecté
Dans tout type de détecteur, le photon est converti en un certain nombre de charges qui produisent en sortie de l'amplificateur un signal formé d'impulsions qui se superposent au bruit. En pratique, le dispositif commence à fonctionner en comptage de photon lorsque l'amplitude des impulsions peut être facilement discriminée par rapport au bruit (exemple de spectres de comptage sur la figure 2.24). Pour cela, un discriminateur en amplitude est placé en sortie de l'amplificateur, après un ou plusieurs étages de filtrage et de mise forme du signal (introduisant la notion de « peaking time »), de manière à compter les impulsions lorsqu'elles dépassent un certain seuil (appelé « seuil de discrimination »). En sortie du discriminateur, nous trouvons des impulsions calibrées qu'il suffit ensuite de compter. Cependant, avec ce processus, nous perdons toute notion d'amplitude des impulsions initiales, donc toute notion d'énergie. Le détecteur qui fonctionne ainsi n'a pas de résolution en énergie (ou longueur d'onde). Nous ne sommes donc pas dans ce cas pour ECLAIRs !

La notion d'amplification se retrouve donc dans une majorité des détecteurs à comptage de photons, avec l'objectif d'amplifier le signal pour sortir du bruit, même si dans certains cas, il est étudié la possibilité de produire suffisamment d'électrons pour dépasser le bruit du détecteur, grâce à un rendement de multiplication (le niveau auquel nous souhaitons amplifier le signal n'étant pas le même dans le cas d'un PMT, se caractérisant par un gain d'amplification énorme, ou d'un CdTe où aucune amplification propre à la technologie n'existe).

Nous comprenons alors que c'est une question de compromis selon les exigences scientifiques en termes d'acceptabilité de perte des photons, et pourquoi il est privilégié l'utilisation des dispositifs à comptage de photons dans le cas de flux faibles.

Statistique de comptage
Si nous nous focalisons uniquement sur les fluctuations dues au bruit de photon, nous pouvons supposer que chaque événement individuel (un photon arrivant sur le détecteur pendant un petit intervalle de temps Δt) a une probabilité identique p.Δt de se produire : l'arrivée des photons est un processus aléatoire (ou stochastique), mais pendant un temps T grand, le nombre N de photons qui arrivent sur le détecteur par unité de temps, est supposé constant.

Posons $\lambda = \dfrac{N\Delta t}{T}$

avec λ le nombre d'événements attendus pendant l'intervalle de temps Δt.

En faisant l'hypothèse que le nombre de photons N est grand, et que le nombre moyen de photons par intervalle de temps n_T (quotient $\dfrac{N}{T}$) reste constant, la loi binomiale tend alors vers la loi suivante :

$$\mathrm{P(n)} = \frac{\lambda^n}{n!}e^{-\lambda}$$

$$\text{soit : P(n)} = \frac{(\frac{N\Delta t}{T})^n}{n!}e^{\frac{-N\Delta t}{T}}$$

où P(n) est la probabilité de recevoir n photons de la source dans l'intervalle de temps Δt.

Une des propriétés d'une variable aléatoire Z qui suit une loi de Poisson est :

Moyenne(Z) = λ et Variance(Z) = λ, donc Moyenne(Z) = Variance(Z).

$$\frac{S}{B} = \frac{Moyenne(Z)}{Sigma(Z)} = \frac{Moyenne(Z)}{\sqrt{Moyenne(Z)}} = \sqrt{Moyenne(Z)} = \sqrt{\frac{N\Delta t}{T}}$$

Grâce à la statistique de Poisson, nous pouvons donc établir que le rapport signal sur bruit S/B s'écrit comme étant la racine carrée du nombre de photons mesurés :

$\frac{S}{B} = \sqrt{n_T * \Delta t} = \sqrt{n_m}$, avec n_T : le flux moyen de photons pendant le temps de mesure (soit $\frac{N}{T}$) et n_m : le nombre de photons mesurés.

Lorsqu'un photon incident est absorbé, il est détecté avec un certain rendement, le rendement quantique (ou efficacité de comptage ≤ 1).

Le rendement quantique vaut :

$$\eta = \frac{\text{nombre de photons** détectés pendant un temps t}}{\text{nombre de photons reçus pendant le temps t}}$$

Cette définition, simplifiée, apparaît complexe dans son application ; en effet, le rendement quantique par exemple, dépend de nombreux facteurs, comme l'absorption des matériaux devant le détecteur, l'épaisseur du détecteur, l'énergie du photon, le temps mort, etc.

L'électron ainsi créé (ou « **photo-électron », soit l'électron expulsé dans l'effet photo-électrique) est ensuite multiplié par un facteur f tel que :

$$\text{f} = \frac{\text{nombre d'électrons collectés en sortie du détecteur pendant un temps t}}{\text{nombre de photoélectrons produits pendant le temps t}}$$

Rapport S/B

Pour un détecteur idéal en comptage de photons, nous avons vu que le rapport signal sur bruit pendant un temps Δt est donné par la formule $\sqrt{n_m}$ où n_m est le nombre de photons mesurés.

Dans le cas où il existe une certaine efficacité de comptage η, le processus aléatoire n'est alors plus l'arrivée d'un photon, mais la détection d'un photo-électron : il faut alors appliquer aux photo-électrons détectés la statistique de comptage discutée pour les photons.

Pour évaluer le rapport signal sur bruit, posons :

n_r = nombre de photons reçus

n_m = nombre de coups mesurés

L'efficacité de détection est donnée par : $\eta = \frac{n_m}{n_r}$

La statistique de Poisson s'applique aux coups mesurés :

— En l'absence de bruit : $\frac{S}{B} = \sqrt{n_m}$

— Avec du bruit :

n_{s+b} = nombre de coups mesurés en présence de source + bruit

n_b = nombre de coups mesurés en présence de bruit seul

=> $n_m = n_{s+b} - n_b$

Nous pouvons alors faire le calcul de la variance V suivant :

$$\mathrm{V}(n_m) = \mathrm{V}(n_{s+b} - n_b) = \mathrm{V}(n_{s+b}) + V(n_b) = n_{s+b} + n_b$$

$$\text{soit } \frac{S}{B} = \frac{n_{s+b} - n_b}{\sqrt{n_{s+b} + n_b}}$$

En pratique, comme le détecteur a un courant d'obscurité ou de fuite (« dark current » ou « leakage current ») non négligeable, surtout s'il n'y a pas de refroidissement, nous compterons un certain nombre d'impulsions, et ce malgré l'absence de source lumineuse ou source radioactive (soit aucun photon incident arrivant sur le détecteur). C'est pourquoi, lorsque nous réalisons un test, nous commençons par mesurer ce courant d'obscurité (considéré comme un processus aléatoire au même titre que le nombre de photons qui arrivent sur le détecteur), avec pour seule excitation la tension de polarisation, qu'il faudra, dans un second temps, soustraire au signal « photons » mesuré en présence d'une source lumineuse (ou X).

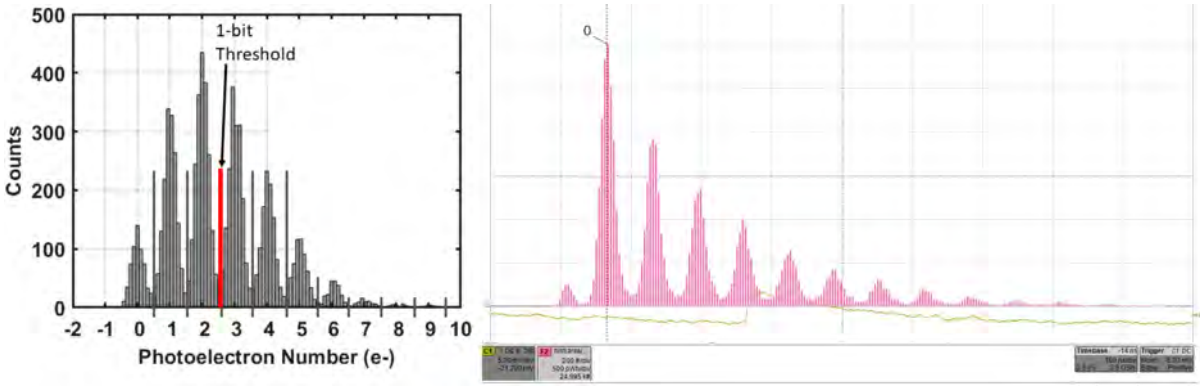


FIGURE 2.24 – Gauche : Spectre de comptage photo-électron - Le seuil est défini entre deux pics - Les valeurs non entières de comptage sont dues au bruit du circuit électronique de lecture / Droite : Acquisition d'un spectre de comptage photo-électron d'un détecteur SiPM mesuré par un oscilloscope [Lacombe et al., 2018].

Notion de temps mort

Nous allons à présent aborder la notion de temps mort, qui entre dans les exigences scientifiques de l'instrument ECLAIRs.

Supposons que deux photons arrivent « en même temps » : cela signifie que la première impulsion correspondant au premier photon n'a pas eu le temps de descendre en dessous du seuil de discrimination avant que l'impulsion suivante, correspondant au deuxième photon, n'arrive. Dans ce cas, le système ne compte qu'une seule impulsion au lieu de deux ; ce phénomène, appelé « pile-up » (empilement de deux impulsions), contribue à une partie du temps mort, qui se traduit par une perte de photons non comptabilisés.

Nous pouvons ainsi définir un temps mort (« DT » pour « Dead Time ») comme la fraction du temps pendant laquelle les événements ne peuvent pas être détectés : nous perdons complètement une impulsion. Cela peut correspondre, par exemple, à la largeur typique de l'impulsion de l'événement au dessus du seuil de discrimination.

Supposons alors que l'on mesure un taux de comptage C, c'est à dire un nombre C d'impulsions par seconde. Du fait du temps mort, les événements ne sont pas comptés par le système de détection pendant la durée DT, et donc le « vrai » taux de comptage C_r a été

multiplié par un facteur 1 / (1 - C*DT), d'où le taux de comptage réel : C_r = C / (1 - C*DT).

De façon plus générale, les événements impactant les détecteurs sont classés selon leur multiplicité. Les « événements multiples » correspondent à des détections d'événements observées sur l'ensemble de la caméra, qui vont être considérés à juste titre ou pas, lors de la datation et de la lecture des pixels de détection, comme étant arrivés simultanément, car munis d'une même date par l'horloge de datation du système de lecture (dont le pas, dans notre cas, est de 10 µs).

Plusieurs types de phénomènes physiques vont pouvoir produire des détections qui vont engendrer ces événements multiples : les « vrais » événements multiples, qui sont associés à un événement incident unique (photon ou particule), et les « faux » événements multiples, qui correspondent à des interactions totalement indépendantes, c'est à dire qui peuvent n'avoir rien à voir entre elles, mais que le système d'analyse des événements n'est pas capable de séparer temporellement car elles sont apparues dans un même intervalle (pas) de l'horloge de datation des détecteurs (pour nous, les modules XRDPIX). Dans le cas de vrais événements, il peut survenir des interactions multiples d'un même photon créées par diffusion multiple, ou « double Compton interaction » (les photons diffusés lors d'une première interaction donnant un second photon qui par rétrodiffusion sur la matière environnante peut ré-interagir) ou émission de fluorescence, ainsi que de grandes Gerbes produites par l'interaction d'ions lourds dans l'environnement des détecteurs : une particule incidente unique va donner plusieurs interactions simultanées ou très légèrement étalées dans le temps, dans des détecteurs différents. Tous ces événements, compte tenu de leur dynamique, seront possiblement dotés du même temps d'arrivée.

En pratique, il est difficile de mesurer précisément le temps mort, que ce soit en étudiant l'impulsion mesurée à l'oscilloscope ou même en réalisant des simulations basées sur des statistiques Poissoniennes, surtout dans le cas d'instruments complexes comme ECLAIRs, qui combinent plusieurs milliers de détecteurs et des centaines de chaînes électroniques. Il est alors préférable, et plus précis d'envoyer des flux de photons croissants et calibrés, et de tracer la droite : taux de comptage = f(flux incident). A fort taux de comptage, la réponse n'est plus linéaire, on parle alors d'écart à la linéarité. On mesure cette non linéarité, et on en déduit le temps mort DT en cherchant la valeur qui permet au modèle de s'ajuster le mieux à la courbe réelle. La précision de cette mesure dépend de la précision sur la calibration de la source [Bajat et al., 2018].

2.3.2 La spectroscopie

La spectroscopie est un formidable outil pour observer, étudier et comprendre l'univers. C'est un domaine riche, mais assez abstrait, car les spectres sont plus difficiles à interpréter que des simples images de l'espace. Grâce à elle, nous pouvons mesurer des paramètres physiques, étudier la nature de la lumière et identifier de nouvelles sources transitoires, qui peuvent être très lointaines comme les quasars.

Dans cette section, nous parlons des principes de la spectroscopie, en introduisant une analogie avec le visible, puis nous présentons son potentiel expérimental, et illustrons la théorie par un exemple.

Plusieurs informations sont transportées dans les spectres astrophysiques : il y a la forme générale du spectre continu, c'est à dire la façon dont l'intensité de la lumière est répartie en fonction de la longueur d'onde. Cette distribution (forme générale du spectre continu) de la lumière dans le visible, donne une idée de la température de surface de l'étoile (une étoile

qui apparaît bleue est en général une étoile chaude et massive, qui vit peu de temps : c'est une étoile jeune qui s'est formée il y a peu de temps et qui va mourir bientôt ; a contrario, une étoile avec un spectre rouge est souvent une étoile vieille). Il peut être ainsi étudié la proportion des jeunes et des vielles étoiles, pour remonter à l'histoire de la galaxie.

Dans le cas des rayons X ou γ, la forme du spectre pourra nous renseigner sur les processus d'émission au niveau de la source, en particulier pour faire la distinction entre des processus d'origine thermique (corps noir) ou non-thermique (synchrotron par exemple).

Une autre information dans le spectre visible, ce sont les raies d'absorption, vues comme des bandes sombres correspondant à des minima d'intensité de la lumière à des longueurs d'onde précises. L'étoile, qui envoie de la lumière, interagit avec des atomes, ou avec des molécules, sur la ligne de visée ; ces atomes ont des niveaux d'énergie propres, et certains photons vont être absorbés quand ils ont l'énergie qui permet de passer précisément d'un niveau à un autre (section précédente). Les photons, qui correspondent à cette énergie là, vont être plus absorbés que les autres car ils permettent d'exciter une transition bien précise, ensuite l'atome va réémettre cette énergie pour revenir à l'état fondamental, éventuellement en passant par des états intermédiaires. Ainsi il va libérer les photons dans toutes les directions, qui auront alors une énergie plus faible qui correspond à une longueur d'onde plus grande (processus à caractère discret). A l'inverse, il peut y avoir des rais d'émission, montrant des bandes lumineuses sans rien entre.

Les raies spectrales dans le visible présentent plusieurs caractéristiques dont, par exemple, la longueur d'onde à laquelle se trouve la raie, c'est à dire la position dans le spectre (émission ou absorption) ; cependant il peut y avoir un décalage, dû à un effet appelé « Dopler-Fizeau » : Si la source est en mouvement par rapport à l'observateur, alors la raie va être décalée vers le rouge si elle s'éloigne tandis qu'elle sera décalée vers le bleu si elle s'approche.

Au même titre que pour la lumière visible, il est possible de faire de la spectroscopie aux plus hautes fréquences, en rayons X.

Par exemple, en observant un amas de galaxies dans le domaine visible, nous ne voyons pas que ces galaxies baignent dans un milieu extrêmement chaud (80 million de K) et qu'elles émettent un rayonnement X intense. A haute énergie, le rayonnement X se manifeste plutôt sous forme de corpuscules, car les photons X peuvent être détectés individuellement. Dans ce cas, nous parlerons de l'énergie du photon (plutôt que de sa longueur d'onde), et du nombre de photons détectés (plutôt que du flux énergétique). Tout comme dans le visible, nous avons un spectre continu où apparaissent certaines signatures spectrales connues, comme celle du fer par exemple, qui peut se retrouver fortement ionisé (c'est à dire beaucoup d'électrons lui ont été enlevés) ce qui produit une raie de 5,9 keV. Ainsi, les raies d'émission peuvent être dues à la radioactivité, à l'annihilation de particules (e^+e^-) ou à l'existence de milieux fortement ionisés, comme le fer qui produit une série de raies autour de 6 keV. Nous pouvons alors déduire l'abondance du Fer dans les amas de galaxies et les conditions physiques telles que la densité ou la température.

Par analogie à ce qui vient d'être décrit dans le visible, nous parlerons de spectres en énergie pour le domaine des X et gamma, pour exprimer la distribution en énergie des photons détectés.

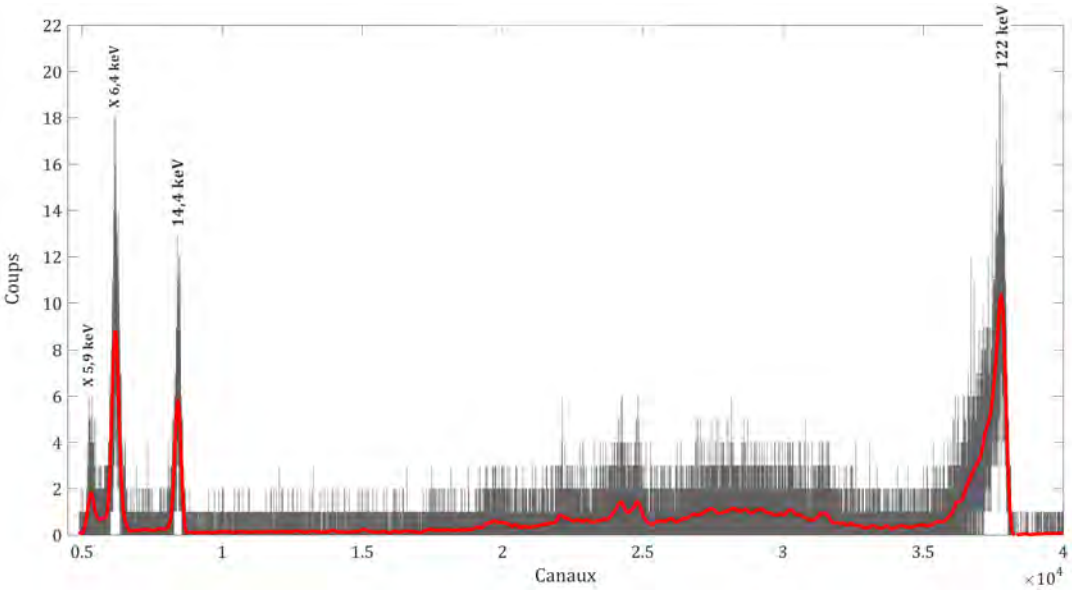


FIGURE 2.25 – Spectre d'un détecteur CdTe Schottky (voie P20 d'un prototype XRDPIX polarisé à -400 V, programmé au peaking time de 4,4 µs et refroidi à −20°C) de sources radioactives de ^{55}Fe et de ^{57}Co : à basse énergie apparaissent les raies X à 5,9 keV (^{55}Fe) et 6,4 keV (^{57}Co) et à plus haute énergie, les raies gamma à 14,4 et 122 keV émises par le ^{57}Co.

2.3.3 L'imagerie gamma

Détecter des sources transitoires X/gamma nécessite un instrument particulier, couvrant une grande partie du ciel. Les matériaux pouvant difficilement réfracter ou réfléchir des rayonnements X et gamma, et de ce fait, en former une image, la conception d'instruments de détection de ce type de photons nécessite des systèmes alternatifs aux systèmes optiques classiques. Tout ceci peut se faire avec un détecteur doté d'un grand champ de vue et couplé à un masque codé pour répondre à la précision de localisation souhaitée.

L'instrument ECLAIRs se base sur un système à masque codé, comme nous le verrons dans le chapitre 3. Cette technologie a été éprouvée par de nombreux grands instruments et permet une qualité de localisation très satisfaisante des sources transitoires. Les mécanismes de l'imagerie à masque codé peuvent être assimilés à ceux d'un cadran solaire, dont la position de l'ombre projetée du soleil indique l'heure. Le masque codé est un pochoir dont le motif, généralement fait de trous et de carrés de matière spécifiquement choisies, va laisser passer, ou pas, certains rayons de la source sur le détecteur. Selon le positionnement de la projection, nous obtiendrons la direction de celle-ci (Fig. 2.26).

En comparaison à un système de lentilles, ou à un miroir, le masque codé possède des points forts tels que sa robustesse et son champ de vue. Cependant, les limites sont présentes : la conception est difficile et demande un coût d'autant plus important qu'il sera volumineux et détaillé. Par ailleurs, l'algorithme de déconvolution peut être complexe.

D'autres techniques d'imagerie existent, comme par exemple le télescope « Lobster eye » (œil de langouste), qui concentre les rayons X sur un pixel. Il a un grand champ de vue, avec peu de bruit de fond et peut détecter de faibles signaux. Il est alors mieux adapté que le masque codé pour détecter des sources faibles pendant des longs temps d'observation. Toutefois, chaque source voit peu de surface, avec, par ailleurs, une gamme d'énergie réduite

et qui contraint le fonctionnement de l'œil de langouste essentiellement à basse énergie.

FIGURE 2.26 – Principe du masque codé : chaque source projette l'ombre du masque (correspondant à un motif opaque) sur le plan de détection, qui représente une image avec une forme unique permettant d'identifier la direction et ainsi, l'origine de la source, de manière exacte (après reconstruction par calcul).

2.4 Les paramètres de détection des sursauts gamma

Dans ce paragraphe, nous allons discuter plus spécifiquement de la détection des sursauts gamma, et, au vu des considérations précédentes, passer en revue les paramètres clés qu'il faut maîtriser ou tout du moins connaître pour les détecter. Certains sont liés à l'instrument (paragraphe 2.4.1), d'autres sont imposés par le ciel ou l'espace (paragraphe 2.4.2), et il y a ceux qui sont propres aux sursauts eux-mêmes (paragraphe 2.4.3).

2.4.1 Les paramètres des instruments

Pourquoi choisir des instruments spatiaux à masque codé pour la détection des sources transitoires ?

Chaque plan de détection développé pour les missions spatiales énoncées en introduction, possède des caractéristiques techniques dévoilant ses forces et ses faiblesses. Dans cette section nous allons comparer les caractéristiques de plusieurs instruments grands champs tels que BAT ou ECLAIRs, dont nous décrirons en détail les missions scientifiques dans la section 3.2.

Les tableaux 2.3 et 2.4 regroupent respectivement les instruments spatiaux en cours d'observation et ceux prévus dans les prochaines années.

Table 2.3 – Missions spatiales en orbite

Mission Instrument	*INTEGRAL*[a] ISGRI[b]	*SWIFT*[c] BAT[d]	*ASTROSAT*[e] CZTI[f]
Detection area (cm^2)	2600	5000	976
Champ de vue (sr)	0.11	1.4	0.01[1]
Gamme d'énergie (keV)	[15 - 1000]	[15 - 150]	[20 - 200]
Angular resolution (arcminute)	12	17	18[1]
Visibilité (%)		72	
Bruit de fond (c/s)		17000	
Sursauts/an	9.3	90	55
Detectors type	CdTe	CZT	CZT
Number of detectors / pixels	16384 / 16384	32768 / 32768	64 / 16384
ASIC number	4096	256	128
Operating temperature (°C)	0°	20°	[5°- 15°]
Orbit height[2] (km)	9,000 × 150,000	600	650 / 6°
Orbit inclination[2] (degrees)	52°	22°	6°
Mission duration (yr)	≥ 16	≥ 15	≥ 5

Table 2.4 – Futures missions spatiales Hautes Energies

Mission Instrument	*SVOM*[a] ECLAIRs[b]	*eXTP*[c] WFM[d]	*THESEUS*[e] XGIS-LE[f]
Surface efficace de détection (cm^2)	1024	1080	512
Champ de vue (sr)	2.0	3.7	2.51
Gamme d'énergie (keV)	[4 - 150]	[2 - 50]	[2 - 30]
Angular resolution (arcminute)	86	4.2	25
Visibilité (%)	55	TBD	TBD
Bruit de fond (c/s)	2500	TBD	TBD
Technologie Détecteur	CdTe	SDD	SDD[g]
Nombre de détecteurs / pixels	6400 / 6400	24 / $\approx 3\ 10^6$	24576 / 24576
Nombre d'ASICs	200	24	7680
Température de fonctionnement (°C)	-20	$-30/-3$	$-20/0$ (TBC)
Orbite (km)	650	550	600
Durée de Mission (yr)	3	5	3

En observant les spécifications d'instruments à masque codé, nous constatons des grandes surfaces de détection pour ISGRI, BAT et CZTI, respectivement de 2600 cm^2, de 5000 cm^2 et 976 cm^2. En comparaison, nous voyons que les instruments du futur ont, pour la plupart, des surfaces plus petites, de 1024 cm^2 pour ECLAIRs, de 1080 cm^2 pour WFM et de 521 cm^2 pour XGIS. Pour autant, les champs de vue de ces instruments sont plus grands que leurs aînés, avec par exemple WFM proposant un champ de vue de 3,7 sr contre 0,11 sr pour ISGRI.

Nous pouvons aussi observer une différence de gammes d'énergie, entre les instruments de *SWIFT*, *INTEGRAL* et *ASTROSAT*, qui détectent à partir de 15 keV, et les futures missions, qui pourront atteindre un seuil bas jusqu'à 2 keV. Une autre caractéristique majeure qui se retrouve dans ces six exemples d'instruments spatiaux est le nombre de détecteurs, incroyablement élevé pour certains (32768 pixels sur BAT). Enfin, les technologies des détecteurs, utilisées pour la détection des rayons X et γ, se recoupent, avec le choix du CdTE, CZT et SDD.

En résumé, pour atteindre une bonne sensibilité, voire dépasser les performances actuelles, il faut des imageurs avec de très grands plans de détection de dizaines de milliers de cm^2, composés de milliers de détecteurs associés à des masques codés.

Nous comprenons alors, au travers de ces spécifications, les multiples contraintes instrumentales qui préoccupent les concepteurs, qui doivent composer avec le champ de vue, la gamme d'énergie, la surface de détection, le nombre de pixels et la sensibilité. Nous allons poursuivre cette section avec la description des paramètres du ciel et des sursauts gamma.

2.4.2 Les paramètres du ciel

Les missions spatiales, de par leurs objectifs scientifiques très diversifiés, auront des conditions orbitales et environnementales très différentes, ce qui aboutira à des contraintes de multiples origines, liées à l'espace dans lequel baignent leurs instruments.

L'un des paramètres clés dont ces missions tiennent compte, et étudient ainsi attentivement, est le bruit de fond du ciel. Ce dernier provient d'une multitude de sources : la lumière des étoiles, des nébuleuses, de la Voie Lactée, de sources parasites imprévisibles, etc. Sa connaissance est essentielle pour mesurer correctement les quantités définissant les phénomènes transitoires que nous souhaitons étudier. Les sources du bruit de fond sont nombreuses : elles peuvent provenir des photons du CXB, ainsi que des électrons et des protons d'origine cosmique, qui vont possiblement interagir dans le détecteur et produire alors des particules secondaires. Ces particules secondaires génèrent des événements avec une double trace pouvant être confondues avec une création de paires e^+e^-.

Le bruit de fond apparaît comme une problématique spécifique aux instruments à grand champ de vue, requis pour augmenter le taux de sursauts gamma détectés. Par exemple, ECLAIRs verra un bruit de fond élevé et variable, ce qui pourra amener des difficultés dans la détection des sursauts gamma, notamment en rendant la différentiation avec des sources brillantes connues plus complexe.

Quelle que soit l'origine de ce bruit de fond, l'objectif principal est de pouvoir le discriminer grâce à des méthodes utilisées dans l'astronomie X et gamma, comme le traitement d'un signal d'anti-coïncidence qui permettra au système d'acquisition de rejeter les données ne correspondant pas à un rayonnement γ, ou par le biais d'un algorithme ingénieux qui saura s'accommoder avec les sources de bruit de fond (UGTS ECLAIRs décrit en section 3.2.3).

TABLE 2.5 – Table des caractéristiques physiques définissant un sursaut gamma.

Symbole	**S**	**Pf**	**T_{90}**
Définition	Fluence	Peak photon flux	Durée Sursaut
Unité	erg/cm^2	Ph/cm^2/s	sec

2.4.3 Les paramètres des sursauts

L'étude des sursauts gamma s'appuie sur les paramètres énoncés dans le tableau 2.5, et détaillés dans la section 2.1.1. C'est ainsi qu'à chaque observation d'un événement transitoire, il est relevé des paramètres pertinents pour la détection, comme sa durée (typiquement de quelques secondes), ou sa gamme d'énergie. Le sursaut gamma va alors être nommé, et caractérisé par sa durée, ce qui permettra de le catégoriser. A cette observable majeure s'ajoutent les caractéristiques extraites des courbes de lumières acquises par les satellites : le peak photon flux (ou flux au pic) et la fluence (en photon et en énergie, qui représente le flux intégré sur la durée du phénomène transitoire).

Quelques données relatives à la détection de sursauts gamma (par l'instrument BAT dans cet exemple) sont présentées dans la table 2.27. Nous voyons aussi que les sursauts gamma peuvent être définis, en plus de leurs propriétés physiques, par un spectre qui suit une fonction en loi de puissance, dont l'exposant est noté dans ce tableau « Photon Index ».

GRB	BAT RA (J2000)	BAT Dec (J2000)	BAT 90% Error Radius [arcmin]	BAT T90 [sec]	BAT Fluence (15-150 keV) [10^-7 erg/cm^2]	BAT Fluence 90% Error (15-150 keV) [10^-7 erg/cm^2]	BAT 1-sec Peak Photon Flux (15-150 keV) [ph/cm^2/sec]	BAT 1-sec Peak Photon Flux 90% Error (15-150 keV) [ph/cm^2/sec]	BAT Photon Index (15-150 keV) (PL = simple power-law, CPL = cutoff power-law)	BAT Photon Index 90% Error (15-150 keV)
150302A	175.515	36.852	2.8	23.74	2.6	0.6	0.4	0.1	1.69, PL	0.33
150301C	11.319	41.861	2.2	14	2.1	0.4	0.6	0.2	0.8, CPL	2
150301B	89.159	-57.969	1.0	12.44	18	1	3.0	0.2	1.46, PL	0.07
150301A	244.281	-48.732	1.9	0.48	0.74	0.10	1.0	0.2	1.44, PL	0.23
150222A	198.787	-12.151	1.0	15.90	22	1	4.7	0.3	1.61, PL	0.08
150213B	253.448	34.165	1.8	181	30	4	1.1	0.4	0.80, CPL	0.79
150212A	285.497	47.389	1.2	11.4	8.9	0.6	1.9	0.2	1.50, PL	0.11
150206A	10.076	-63.181	1.0	83.2	139	3	10.1	0.4	1.33, PL	0.04
150204A	160.241	-64.043	1.5	12	8.0	0.4	1.85	0.12	1.62, PL	0.10
150203A	98.394	6.952	1.1	25.8	9.1	0.6	0.9	0.1	1.90, PL	0.12
150202A	39.261	-33.132	1.7	25.7	6.1	0.7	1.0	0.2	1.50, PL	0.19
150201A	11.820	-37.620	1.7	26.1	7.8	1.2	n/a	n/a	2.32, PL	0.24
150120B	39.309	8.064	2.3	24.30	5.4	0.8	1.2	0.2	2.20, PL	0.25
150120A	10.330	33.980	1.5	1.20	1.4	0.2	1.8	0.2	1.81, PL	0.18
150110B	289.374	32.529	1.2	10.6	4.9	0.4	1.4	0.2	1.89, PL	0.13
150103A	131.674	-48.896	2.0	49.1	8.2	1.3	0.5	0.2	-0.03, CPL	1.01
150101B	188.044	-10.956	2.5	0.018	0.23	0.06	n/a	n/a	3.3, PL	0.5
150101A	312.599	36.669	2.5	0.060	0.23	0.05	0.3	0.1	1.26, PL	0.31
141225A	138.754	33.774	2.2	40.24	25	2	1.3	0.4	1.32, PL	0.15

FIGURE 2.27 – Quelques caractéristiques de sursauts gamma détectés par l'instrument BAT/*SWIFT*.

2.5 Quelques simulations pour la détection de sursauts

Parmi les instruments décrits précédemment (tables 2.3 et 2.4), trois sont actuellement en orbite et ont montré de très bonnes performances de détection et de localisation des sursauts. Une fois en vol, ECLAIRs devra prouver qu'il apportera des informations aussi précieuses que BAT et ISGRI, grâce à une bonne sensibilité couplée à une localisation légèrement moins précise que ces instruments. C'est pourquoi la communauté scientifique de SVOM réalise de nombreuses simulations qui visent à évaluer les performances de détection de leur instrument.

Dans cette section, nous focalisons notre étude sur l'estimation indicative du nombre annuel de sursauts que pourra détecter ECLAIRs chaque année en fonction d'un spectre en loi de puissance donné et à partir de la courbe log N – log P de l'instrument BATSE (décrit en section 1), à partir des résultats de modélisation des collaborateurs scientifiques et en se basant sur des hypothèses simplifiées. Nous considérerons des sursauts identiques, pouvant arriver dans la même direction, soit verticalement sur le plan de détection, ou bien avec un angle particulier, et en fixant des paramètres d'entrée liés à l'instrument et à la mission, comme la surface géométrique de détection, le pourcentage de visibilité, le champ de vue et le bruit de fond.

Par la suite, nous étudierons les données fournies par la table BAT/*SWIFT* de manière à appréhender les différents paramètres des sursauts gamma (table 2.5) pour en comprendre leurs caractéristiques.

Enfin nous approfondirons notre estimation du nombre de sursauts détectés par l'instrument ECLAIRs, à partir de différents profils de sursauts.

L'objectif de cette étude est de fournir une approche sur la méthode de calcul du nombre de sursauts attendus dans ECLAIRs, de façon à montrer comment les nombreux paramètres instrumentaux vont impacter la sensibilité, et d'appréhender le développement du plan de détection dans un contexte contraignant, dû notamment à l'environnement spatial (bruit de fond).

Méthodologie et exemples de simulations

En faisant l'hypothèse qu'il arrive sur le plan de détection des sursauts identiques (même durée de 1 s et avec le même spectre en photon, qui est en fonction d'une loi de puissance donnée, avec, dans notre exemple, un exposant alpha qui vaut $-1{,}2$), et arrivant dans la même direction, soit à la verticale sur le plan de détection d'un instrument donné, (puis en fonction d'un angle solide différent pour chaque sursaut pour ajuster l'estimation), nous obtenons les résultats de la simulation qui permettent de donner une estimation du nombre de sursauts que pourrait détecter l'instrument ECLAIRs chaque année, d'abord si l'observation est totale, c'est à dire que le champ de vue est maximal dans tout le ciel, puis si elle est partielle (champ de vue propre à chaque instrument donné dans les tables 2.3 et 2.4). Enfin, nous supposons un bruit de fond vu par ECLAIRs constant, de valeur 2500 c/s (sa variation étant étudiée par des chercheurs du projet et pouvant être introduite dans cette simulation pour une estimation précise des sursauts gamma).

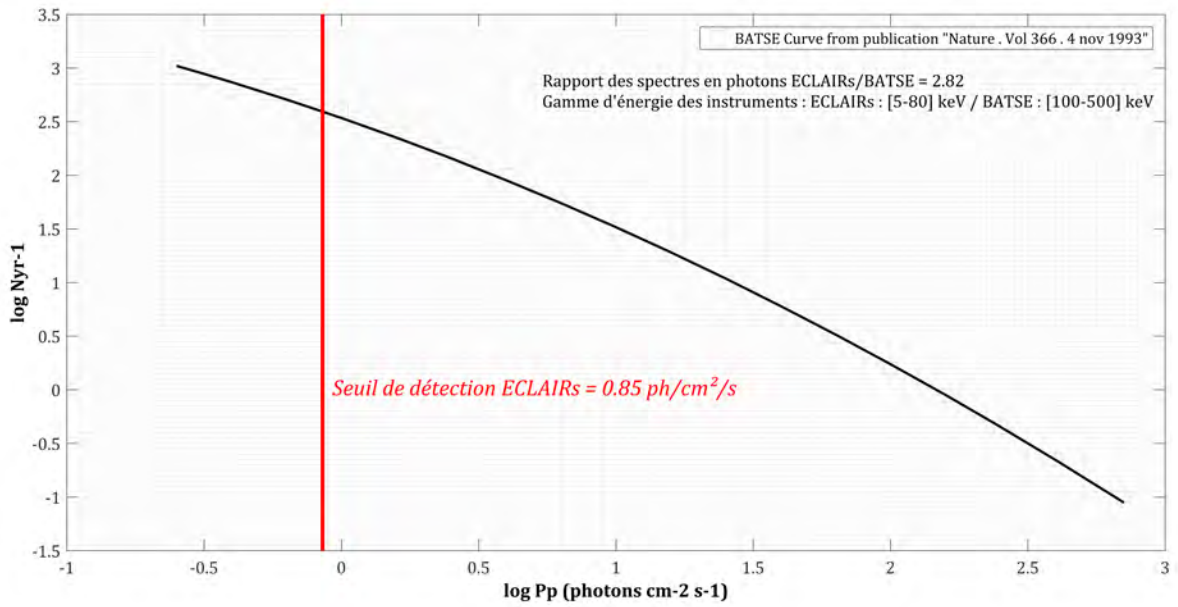


FIGURE 2.28 – Nombre de sursauts détectables dans tout le ciel par l'instrument ECLAIRs dans des conditions d'observation idéales : un bruit de fond constant de 2500 c/s, pour une observation dans la gamme d'énergie [5 - 80] keV, un temps d'intégration de 1 s et un spectre en photons en loi de puissance $E^{-1,2}$ - La barre verticale (en rouge) correspond à la sensibilité de l'instrument ECLAIRs, qui croise la courbe de distribution log N - log P de BATSE.

La figure 2.28 illustre un cas simple de simulation, en montrant la courbe de distribution en P de l'instrument BATSE et le nombre des sursauts que pourrait détecter ECLAIRs dans sa gamme d'énergie, s'il observait les mêmes sursauts dans l'ensemble du ciel. Pour réaliser, nous commençons par calculer le seuil de détection de l'instrument en fonction de ses données géométriques et du bruit de fond qu'il voit. Par ailleurs, nous calculons le rapport du nombre de photons dans la gamme d'énergie de l'instrument ECLAIRs, réduite à [5 - 80] keV dans notre exemple. Ensuite, nous divisons le seuil de détection par ce rapport ce qui nous permet de positionner cette nouvelle valeur (droite bleue de la figure 2.28) sur la courbe de BATSE (courbe en noir).

Nous trouvons dans ce cas un nombre de 911 sursauts potentiellement détectables par an, ce qui est bien plus élevé que ce que nous attendons en réalité, étant donné les paramètres invariants ou supposés maximaux dans cette première approche (par exemple, nous n'avons pas introduit la valeur du champ de vue de ECLAIRs).

Utilisation de la table des sursauts détectés par BAT.

Dans cette étude, j'ai utilisé la base de données de SWIFT, donnant les caractéristiques des sursauts que BAT a détectés (arrivant sur ECLAIRs). C'est ainsi que des paramètres essentiels sont listés dans cette table : le nombre de photons (index photon), la fluence, le peak photon flux et le T90 de plus de 870 sursauts. Les graphes ci-après (Fig.2.29) montrent différentes corrélations nous permettant de comprendre les populations, telle que la fluence en fonction du T90.

Par ailleurs, j'ai inséré une partie de ces sursauts uniques dans les simulations précédentes

ainsi qu'un affinement des paramètres instrumentaux tels que le champ de vue, la visibilité, l'angle d'arrivée, de façon à obtenir un nombre de sursauts plus réalistes. En regardant la cartographie générale des sursauts détectés par SWIFT (en vert sur la figure 2.30), nous pouvons voir les sursauts qui ne seraient pas détectés par l'instrument ECLAIRs (en rouge) à un rapport signal sur bruit donné (de valeur 7), dans la gamme d'énergie de 4 à 80 keV, en prenant l'hypothèse d'une surface efficace constante valant 409,6 cm^2.

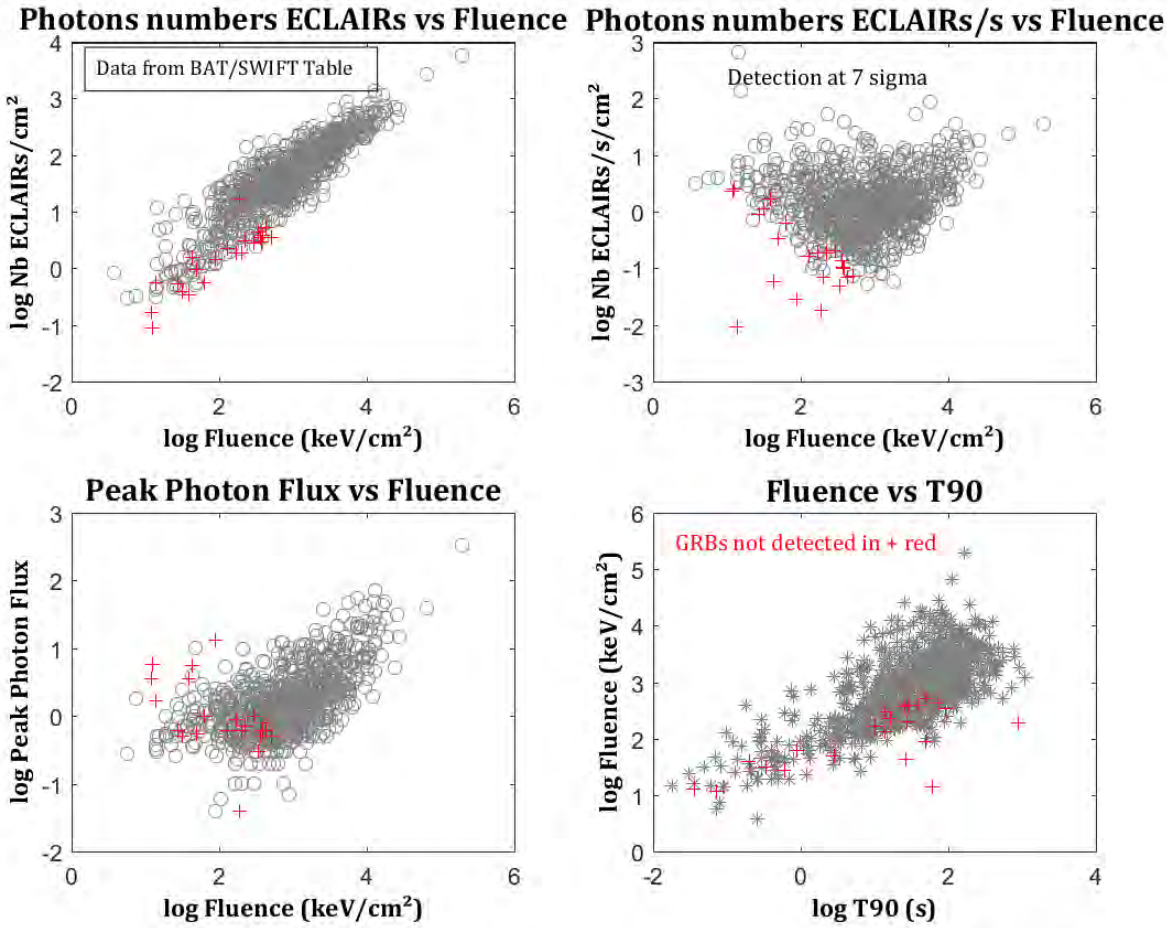


FIGURE 2.29 – Graphes obtenus à partir des données de la table SWIFT : En haut à gauche : Le nombre de photons en fonction de la fluence - En haut à droite : Le nombre de photons/sec en fonction de la fluence - En bas à gauche : Le peak photon flux en fonction de la fluence -En bas à droite : La fluence en fonction du T90.

Ces graphes permettent de voir que les sursauts que ne détecterait pas ECLAIRs, parmi ceux qui ont été détectés par SWIFT, seraient plutôt ceux qui ont une faible fluence. De plus, les sursauts détectés préférentiellement seraient davantage des sursauts longs, avec des durées se situant entre 10 et 100 s, toujours par rapport à la table de SWIFT, qui contient tout de même moins de sursauts courts, qui reste une population méconnue et par voie de conséquence, importante à détecter.

Combien de sursauts pour ECLAIRs ?

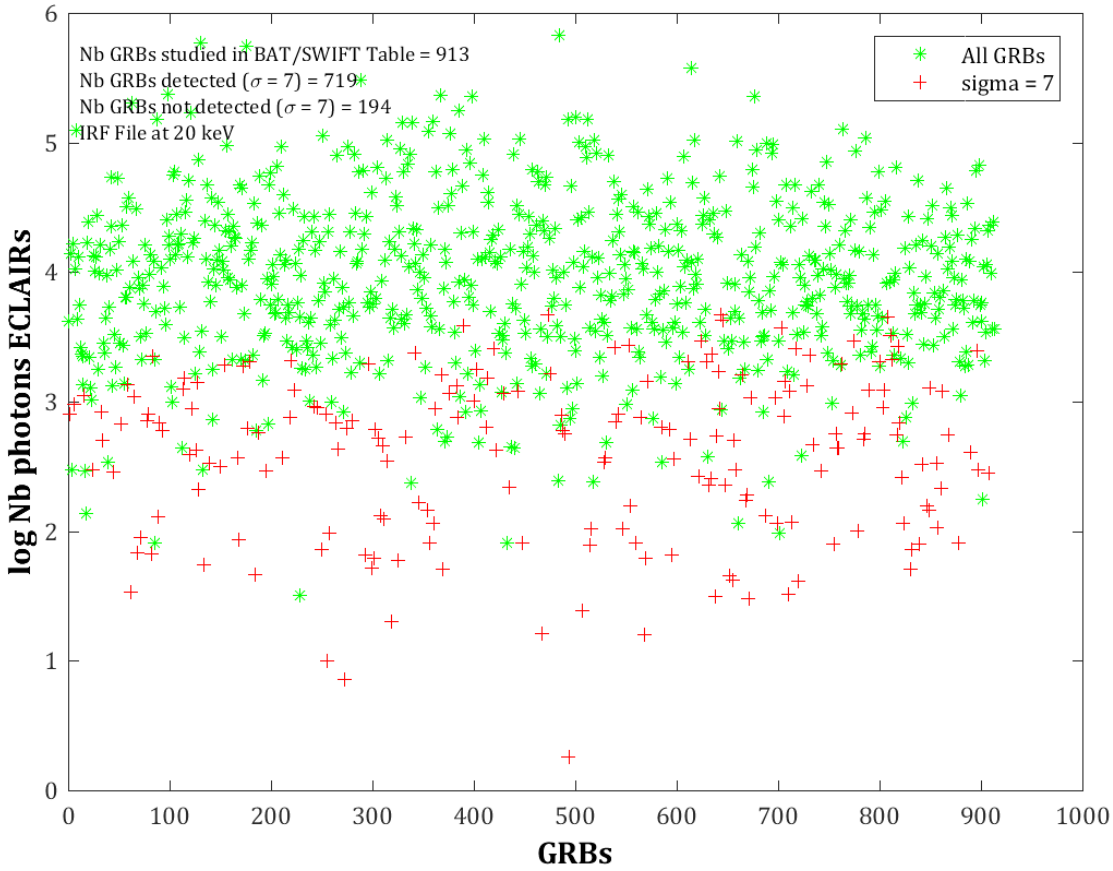


FIGURE 2.30 – Carte de 913 sursauts ayant été détectés par l'instrument BAT de *SWIFT* (vert) – En rouge sont identifiés les sursauts de cette table qui ne seraient pas détectés par l'instrument ECLAIRs de SVOM en considérant un seuil de détection à 7 sigma, en tenant compte d'une surface efficace dépendant d'un angle solide d'arrivée différent pour chaque sursaut. (basé sur un fichier de simulation IRF à 20 keV).

Le graphe 2.30 termine cette section sur les simulations permettant l'estimation du nombre de sursauts que pourra détecter ECLAIRs, dans le cas où les sursauts arriveraient de façon aléatoire sur le plan (variation du paramètre angulaire, différent pour chacun des sursauts de la table SWIFT). La surface efficace dépend alors de l'angle solide d'arrivée de 913 sursauts.

A titre d'illustration, il y aurait 719 sursauts sur 913 qui seraient détectés par ECLAIRs sur une durée d'observation maximale et avec un champ de vue identique à celui de *SWIFT*. J'ai assimilé les spectres en photons comme des spectres en loi de puissance pour l'ensemble des simulations. En appliquant une correction d'un champ de vue de 0,9 pour ECLAIRs par rapport à 1,4 pour BAT, et en multipliant par la durée efficace d'observation de ECLAIRs, qui est d'environ 51 % contre 85 % pour *SWIFT*, il n'y aurait plus que 30 % du nombre de sursauts total qui seraient détectés par l'instrument ECLAIRs. Nous comprenons alors que la surface de détection n'est pas le seul paramètre impactant sur la performance de détection de la caméra. En conclusion, nous pouvons voir l'impact des différents paramètres comme la

gamme d'énergie des observations, la surface de détection, le bruit de fond (défini par l'orbite choisie pour la mission), qui vont agir sur l'efficacité de détection des sursauts gamma.

En conclusion, ce chapitre nous a permis d'appréhender l'imagerie des sources transitoires à haute énergie, en se familiarisant avec des notions clés ayant trait aux problématiques de cette technologie. Ce contexte maintenant défini, je vais poursuivre le manuscrit en présentant ma contribution au développement d'un imageur de sursauts gamma : l'instrument ECLAIRs de la mission spatiale SVOM.

Chapitre 3

L'instrument ECLAIRs de la mission sino-française SVOM

La mission SVOM, pour « Space Variable Object Monitor », est une importante coopération Sino-Française, débutée en 2006 avec la signature d'un premier « Memorandum of Understanding » entre le Centre National d'Etudes Spatiales (CNES) et la China National Space Administration (CNSA). Le satellite sera lancé en 2022 par un lanceur chinois « Longue Marche » (LM-2C) depuis la base de Xichang et placé sur une orbite basse, à une altitude de 625 km et avec une inclinaison de 30°, pour une durée orbitale de 96 min. Son but majeur étant la détection d'imprévisibles sursauts gamma et leur étude, ses instruments auront de grands défis techniques à relever !

C'est ainsi qu'ils vont devoir montrer une bonne sensibilité aux basses énergies mais aussi une excellente localisation des sursauts détectés, objets lumineux transitoires, pour ne pas dire éphémères, et fortement énergétiques. Ces sursauts gamma seraient liés à l'effondrement des cœurs d'étoiles massives, ou bien même à la fusion d'astres compacts. Ce sont des phénomènes astrophysiques qui engendrent la formation de trous noirs, objets impossibles à observer directement. Nous comptons donc sur les sursauts gamma pour apprendre à mieux les connaître, et comprendre leur processus de création. En effet, à la naissance d'un trou noir, celui-ci peut accélérer un jet de particules appelé « jet relativiste », qui se manifeste par une émission lumineuse appartenant à la partie du spectre électromagnétique des X et des γ, pour un observateur situé dans l'axe du jet. Le satellite est conçu pour détecter ces flashs, et se tourner dans leur direction, de manière à les localiser et à les caractériser en temps et en énergie.

SVOM est une mission d'astronomie dédiée à la détection, à la localisation et au suivi des sursauts gamma et d'autres phénomènes astrophysiques transitoires en rayons X durs, et à l'observation multi-longueurs d'ondes de sources cosmiques variables. SVOM permettra d'étudier la physique des sursauts, avec l'exploration du domaine des sursauts mous, avec une très bonne sensibilité, surveillera également l'activité des sources galactiques de rayons X durs et effectuera des observations de suivi, à plusieurs longueurs d'onde, des sources transitoires, avec notamment l'étude de l'émission prompte optique. Près de 80 sursauts par an pourront être observés, avec des données complètes sur leurs rémanences. Par ailleurs, SVOM fonctionnera en concomitance avec des détecteurs de haute technologie, dédiés à la détection des ondes gravitationnelle, offrant l'opportunité de rechercher les corrélations entre ces ondes et les sursauts gamma. Enfin, les sursauts que détectera SVOM, pourront bénéficier

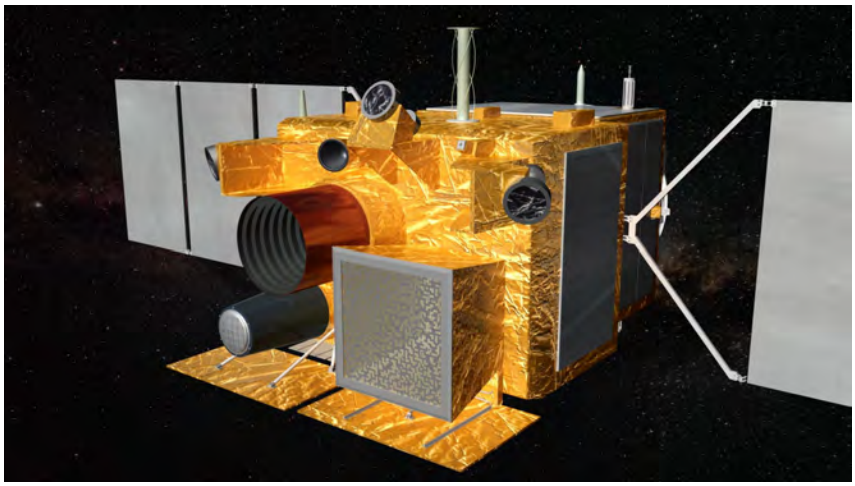


FIGURE 3.1 – Satellite SVOM en vue d'artiste. Credit CNES

d'un suivi d'une nouvelle génération d'instruments astronomiques.

Pour mieux comprendre ces sursauts, la Chine et la France ont décidé d'unir leurs efforts pour proposer un satellite qui aura de grands objectifs scientifiques et techniques.

Ainsi, les Français devront :

— développer et fournir aux Chinois les instruments ECLAIRs et MXT,
— implémenter un réseau sol d'alerte,
— mettre à disposition une station bande X pour toute la durée de la mission, et une station bande S si besoin, pour les cibles prioritaires, pendant la phase opérationnelle,
— implémenter un centre de mission scientifique pour l'instrumentation française et un centre de contrôle de la charge utile française.

SVOM débutera ses opérations dès son lancement, de 2022 à 2025 en phase nominale, en coopérant avec un ensemble de grands télescopes astronomiques, dans l'espace et au sol [Cordier et al., 2015]. Parmi ces futurs projets, SVOM sera le partenaire scientifique de PAN-STARRS et LSST dans le domaine optique, de MeerKAT et ASKAP, les précurseurs du projet SKA dans la bande radio, CTA et HAWC pour les hautes énergies, les détecteurs d'ondes gravitationnelles LIGO et VIRGO, les détecteurs de neutrinos IceCube et KM3NeT.

L'orbite de SVOM sera de type LEO (Low Earth Orbit) à une altitude de 625-650 km, avec une inclinaison de $\approx 30°$ et un pointage quasi anti-solaire, ce qui permettra d'éviter le centre galactique ainsi que les sources X les plus brillantes. De plus, la plupart des sursauts seront suivis par des télescopes au sol, comme cités précédemment, situés à des latitudes tropicales. Les objectifs scientifiques de SVOM sont détaillés dans son livre blanc [Wei et al., 2016].

Après une courte description des instruments de la mission SVOM (paragraphe 3.1.1), nous exposerons en détail les spécificités techniques d'ECLAIRs dans la section 3.2. Puis, nous expliquerons le fonctionnement complet de cet instrument majeur dans les sections suivantes de ce chapitre 3.

FIGURE 3.2 – Le modèle STM (Modèle Structurel et Thermique) de la plate-forme SVOM, avec quelques-uns de ses instruments en cours de montage. Credit CNES

3.1 Les instruments de SVOM

3.1.1 Les instruments spatiaux de SVOM

La plate-forme est munie de fonctions multiples, parfois liées, parfois indépendantes, qui sont, entre autres, dédiées au calcul d'orbite et d'attitude, à la gestion de l'alimentation électrique, au système de commande et de contrôle des instruments, à la communication avec la Terre, au contrôle thermique, à la propulsion, etc.

Nous comprenons alors que la complexité de la gestion du satellite sera d'autant plus forte qu'il y aura d'instruments à bord. Le satellite SVOM va embarquer quatre instruments (Fig. 3.2 et Fig. 3.3), deux chinois et deux français, chacun jouant un rôle à la fois spécifique et majeur.

Le détecteur gamma GRM, pour « Gamma-Ray burst Monitor », est développé par les équipes chinoises. C'est un ensemble de trois détecteurs de type scintillateur associé à des photomultiplicateurs. L'instrument mesurera la courbe de lumière et les paramètres spectraux de l'émission prompte des sursauts détectés par ECLAIRs, dans la gamme des rayons X durs et des rayons gamma de basse énergie (de 15 keV à 5 MeV). Un détecteur de particules est également associé au GRM.

Un autre instrument, également sous maîtrise d'œuvre chinoise, le « Visible Telescope » (ou VT) est un télescope à petit champ, de 30 minutes d'arc, dédié à l'observation de l'émission rémanente débutante, dans le domaine du visible. S'agissant de l'observation des sursauts gamma, la mise en œuvre du VT implique que la plate-forme s'oriente automatiquement dans la direction du sursaut telle que définie par ECLAIRs. Les coordonnées des étoiles de référence obtenues sur les pixels CCD seront utilisées pour affiner la position du satellite, ce

qui favorisera la rapidité de déclenchement des observations de suivi au sol.

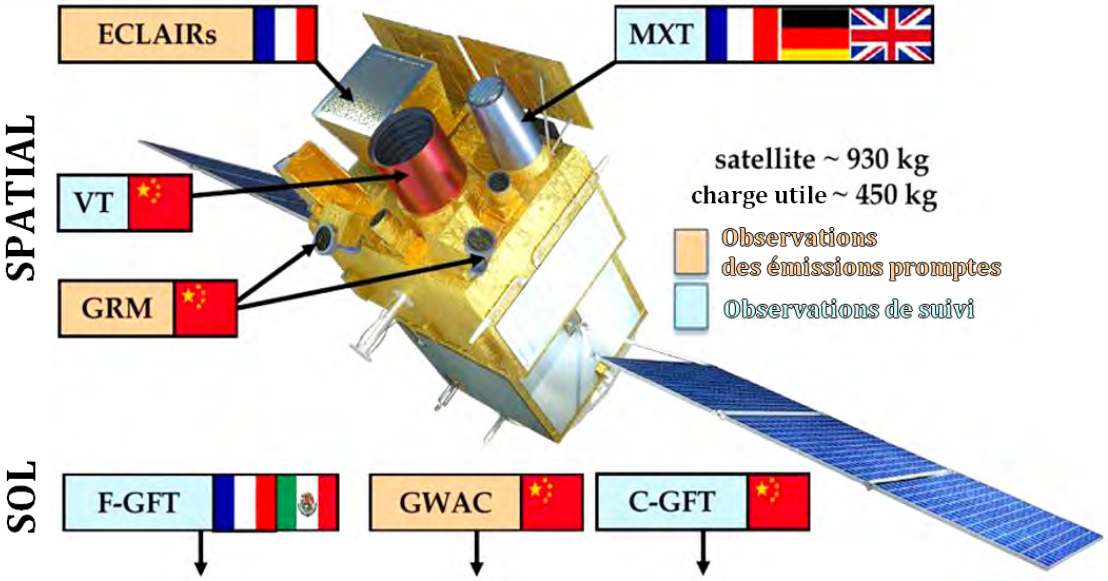


FIGURE 3.3 – Les instruments de SVOM. A bord, le GRM (Spectromètre de champ de vue 2 sr, dans la gamme d'énergie [15 - 5000] keV, constitué de trois « Gamma Ray Detectors »), VT (télescope visible de champ de vue 26' x 26'), MXT (télescope X de champ de vue 64' x 64' travaillant entre 0,2 et 10 keV) et ECLAIRs (décrit dans la section 3.2) / Au sol, les 3 instruments F-GFT (franco-mexicain), GWAC et C-GFT (chinois) / Le satellite pèsera près de 930 kg, dont la moitié sera la masse de la charge utile. Les instruments ECLAIRs, GRM et GWAC observeront les émissions promptes, quand les autres instruments s'occuperont du suivi ([Cordier et al., 2015] [Wei et al., 2016]).

L'instrument MXT, pour « Microchannel X-ray Telescope », figure parmi les instruments français (Fig. 3.4). Ce télescope sensible dans le domaine spectral des rayons X mous, doté d'un champ de vue d'environ 1,1° sera capable de localiser très précisément la position du sursaut gamma sur la voûte céleste avec une précision meilleure qu'1 minute d'arc. MXT, compact et léger (moins de 35 kg), est basé sur une optique à base de galettes à micro-canaux pour focaliser les rayons X dans la bande spectrale [0,2 - 10] keV sur une caméra située à 1 m de distance focale contenant un détecteur pixelisé en silicium de type pnCCD à faible bruit, pour réaliser l'imagerie et la spectroscopie. Il a une surface efficace d'environ 45 cm^2 sur l'axe, à 1 keV. Pourvu d'une PSF (Fonction d'Étalement du Point) meilleure que 4,2 minutes d'arc, MXT pourra ainsi garantir une précision de localisation des rémanences des sursauts gamma meilleure qu'1 arcmin avec des données collectées dans les 5 minutes après le déclenchement. Le télescope MXT sera performant pour la détection des rémanences de la quasi-totalité des sursauts de SVOM, mais aussi pour les observations d'objets astrophysiques autres que des sursauts gamma.

ECLAIRs est l'imageur de rayons X-durs et le trigger du satellite SVOM. Instrument spatial français, c'est un télescope à grand champ de vue, conçu pour détecter et localiser rapidement des sources transitoires cosmiques dans la gamme d'énergie [4 - 150] keV. Il a pour fonction de surveiller le ciel et de détecter puis localiser les sources transitoires, afin de mesurer leurs propriétés spectrales et temporelles, et ce pendant trois ans. Véritable sentinelle,

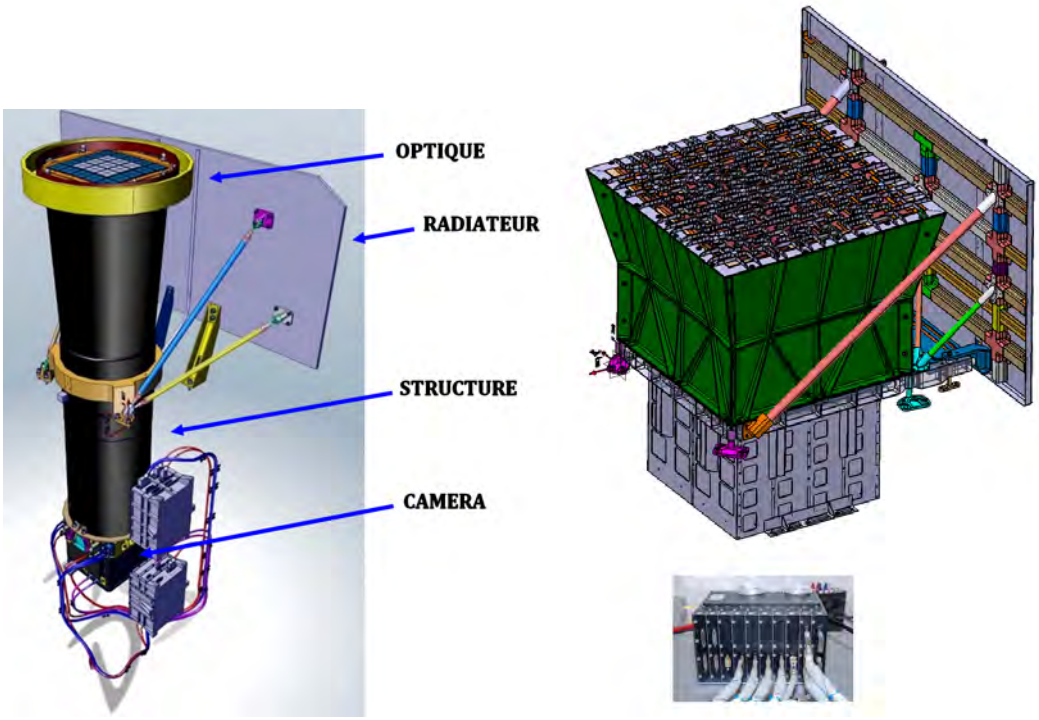


FIGURE 3.4 – Image de gauche : L'instrument MXT. Sa caméra est composée d'un ensemble de galettes de micro-canaux de 40 µm de côté (optique à « micropores »), d'une roue de calibration, d'un plan focal, qui intègre le détecteur et son électronique de proximité, ainsi qu'un blindage conçu pour protéger le détecteur des radiations spatiales. Un radiateur permet le refroidissement à −65°C nécessaire à la diminution du bruit de lecture du détecteur. / Image de droite : L'instrument ECLAIRs, comprenant un radiateur, un masque codé, un plan de détection, un blindage, une structure mécanique et un coffret métallique à l'intérieur duquel sont montés les électroniques « ELS », et un calculateur de bord appelé « UGTS » (boîtier noir), pour Unité de Gestion - des détecteurs XRDPIX - et de Traitement Scientifique.

ECLAIRs va guetter l'espace et signaler rapidement aux télescopes sol chaque découverte d'une nouvelle source transitoire.

A bord, tous ces instruments vont s'orchestrer selon un enchaînement typique des observations, en suivant la logique de détection des sursauts suivante : le GRM détecte, ECLAIRs détecte et localise ; la position qu'il détermine est envoyée au sol (au French Science Center) et redistribuée aux observateurs en près de 30 secondes. Les premières observations depuis le sol vont donc commencer quelques dizaines de secondes après le déclenchement à bord. Le satellite prend alors 3 à 5 minutes pour pointer en direction de la source, et dès que celle-ci entre dans le champ de vue des instruments MXT et VT, ceux-ci prennent alors le relais et commencent leurs observations !

3.1.2 Le segment sol

Le segment sol français s'inscrit dans un système complet avec de multiples interfaces avec nos partenaires chinois. Le système sol est articulé autour de deux entités principales :

— Le centre de commande contrôle qui assure le contrôle et la commande du satellite SVOM pendant les différentes phases de vie de la mission. Il comprend le centre de contrôle chinois et les stations bande S, mais sera aussi en relation avec les stations françaises bande S en cas de « Target of Opportunity », c'est-à-dire si l'on souhaite observer des cibles prioritaires et en faire le suivi.

— Le centre de mission scientifique qui comprend le centre de mission chinois, le centre de données scientifiques spatial, deux centres scientifiques, le centre d'opération de la charge utile française (FPOC), deux centres pour la gestion des instruments ECLAIRs et MXT, les stations en bande X, le réseau VHF, les télescopes sol de suivi (F-GFT et C-GFT), le GWAC, caméra au sol chinoise pour l'observation des émissions promptes dans le visible, et le centre de gestion de l'instrument GFT.

Pour maintenir une communication quasi-continue entre la Terre et l'espace, la mission SVOM utilisera trois liens bord/sol différents : la bande S sera utilisée via les stations sol chinoises, pour les envois de commandes et la récupération d'une partie de la télémesure de la plate-forme, la réception au sol se fera en bande X, par les stations chinoises et françaises, et un réseau de stations VHF assure la réception des messages courts et quasi-instantanés transmis par le satellite SVOM ; les stations s'appuient sur des fournisseurs d'accès Internet locaux, et sur le réseau Internet pour communiquer avec les autres entités du système d'alerte.

3.2 L'instrument ECLAIRs

Des objectifs scientifiques de la mission spatiale franco-chinoise SVOM découlent plusieurs exigences auxquelles l'instrument ECLAIRs doit répondre : pour la mission, il aura comme but premier la détection de 200 sursauts pendant la mission nominale de 3 ans, ensuite il devra avoir la capacité de localiser ces sursauts gamma avec une précision de 13 arcminutes, valeur nécessaire pour placer la source dans le champ de vue des instruments de SVOM à champ plus réduit (60' pour la MXT et 26' pour le VT). Afin de remplir les objectifs qui lui ont été assignés, ECLAIRs devra détecter tous les types de sursauts, y compris les « X-ray Flashes » qui sont des sursauts gamma ou spectres très mous avec un maximum de la densité spectrale d'énergie $E_{peak} < 30$ keV, enfin il mesurera les propriétés de l'émission prompte des sursauts gamma avec une bonne résolution spectrale et temporelle.

Par ailleurs, la plate-forme ajoute à toutes ces spécifications scientifiques, des contraintes strictes à l'instrument ECLAIRs en matière d'allocation de taille, de masse et de puissance. L'ensemble de ces exigences scientifiques pourra être atteint grâce à la combinaison d'un large champ de vue (2 sr), d'un grand plan de détection de 1024 cm^2, pixélisé avec 6400 détecteurs et sensible au dessus de 4 keV, d'un blindage passif, d'un masque codé innovant, et d'une électronique embarquée de gestion et de traitement scientifique (appelée « UGTS ») qui fera l'image du ciel pour détecter et localiser les sources transitoires.

Les principales caractéristiques de l'instrument sont résumées dans le tableau 3.1, et une vue globale puis schématique de l'instrument sont fournies sur les figures 3.4 et 3.5 [Godet et al., 2014].

Gamme d'énergie	4 – 150 keV
Surface caméra	1000 cm^2
Surface efficace à [10 - 70] keV	> 340 cm^2
Surface efficace à 6 keV	> 200 cm^2
Champ de vue	2,05 sr total
Sensibilité pour un sursaut d'1 s	2,5 10^{-8} erg cm^{-2} s^{-1} dans la gamme [5 - 50] keV
Erreur de localisation	11,5 arcminutes pour des sources avec un SNR = 8
Résolution en énergie à 60 keV	$< 1{,}6$ keV
Résolution temporelle	20 µs
Temps mort	< 5 % pour un taux de comptage de 10^5 c/s
Débit de données	< 18 Gb/Jour

Table 3.1 – Caractéristiques et performances de l'instrument ECLAIRs.

3.2.1 Le plan de détection, avec ses électroniques associées et la régulation thermique

Le plan de détection DPIX

Le plan de détection d'ECLAIRs se compose de 6400 détecteurs Schottky CdTe, de dimensions 4 x 4 x 1 mm^3. Ils sont disposés de manière à obtenir un plan pixélisé carré de 80 x 80 détecteurs, offrant ainsi une surface géométrique de 1024 cm^2.

Les détecteurs CdTe sont très bien adaptés aux applications spatiales, à la fois pour faire de la spectroscopie et de la détection de rayons X durs, grâce notamment à leur très bon pouvoir d'arrêt au-dessous de 200 keV, à la maturité des procédés de fabrication et à l'expérience acquise grâce à leur utilisation généralisée pour des missions spatiales (*INTEGRAL* ou *SWIFT* par exemple, comme présenté dans le chapitre 2).

De plus, ce type de détecteurs possède l'avantage d'avoir un très faible courant de fuite ($<$ 100 pA à -20°C pour une tension de polarisation inférieure à -500 V), ce qui permet d'atteindre le seuil bas en énergie de 4 keV à la température nominale de -20°C (température en vol). Pour ce faire, des caloducs réaliseront la régulation thermique pour assurer le maintien dans la gamme de température opérationnelle de l'instrument. Le plan de détection viendra se fixer sur la face supérieure de la ceinture d'interface entre le télescope ECLAIRs et le satellite (Fig. 3.6).

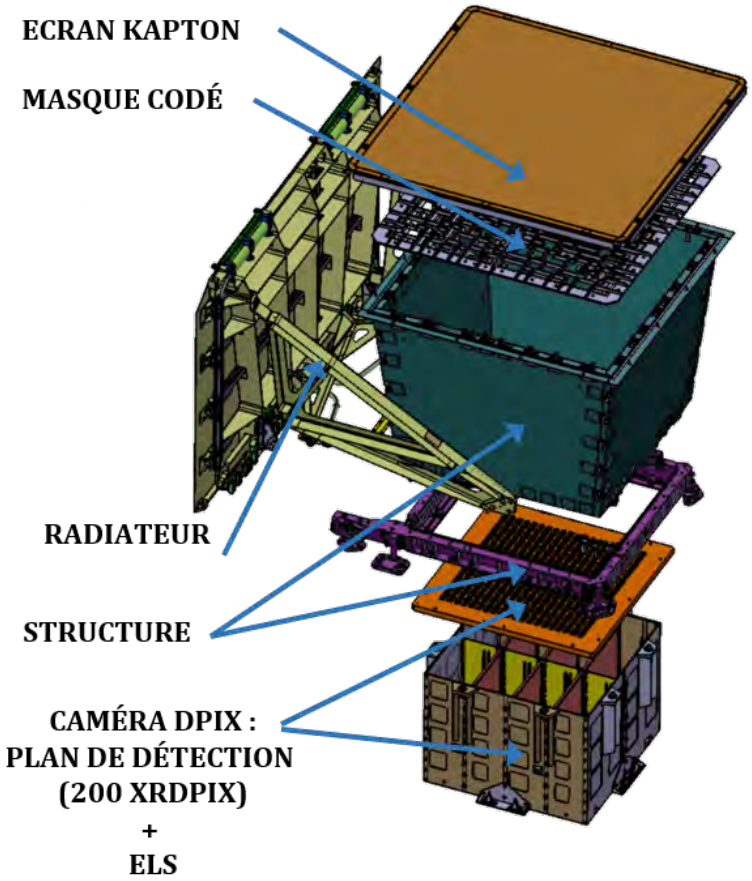


FIGURE 3.5 – Structure du télescope ECLAIRs en vue éclatée : il est constitué d'un masque codé, d'un blindage passif, d'un plan de détection refroidi à $-20°C$ au moyen d'un radiateur, et d'une électronique Front-End ELS.

Ainsi, le plan de détection est divisé en 200 modules de détection, appelés « XRDPIX », qui sont des matrices de 32 détecteurs, lues par une électronique faible bruit (que nous décrirons dans le chapitre 4). Ces modules sont regroupés par 25, et gérés par 8 secteurs électroniques indépendants « ELS », fournissant la haute tension (programmable entre 0 et -450 V) et codant chaque événement en énergie (1024 canaux calibrés de 0 à 150 keV, avec une résolution spectrale meilleure que 1,6 keV au pic de 60 keV), en temps (avec une précision de 20 µs), et en position (avec une précision de 2 mm).

Enfin, la stratégie de détection d'ECLAIRs permet de distinguer les interactions qui touchent un pixel unique (événement simple ou « single event ») des événements multiples qui touchent plusieurs détecteurs simultanément (pixels), provenant par exemple de particules chargées.

La figure 3.7 montre une première image de la caméra DPIX formée par les 200 modules XRDPIX de vol.

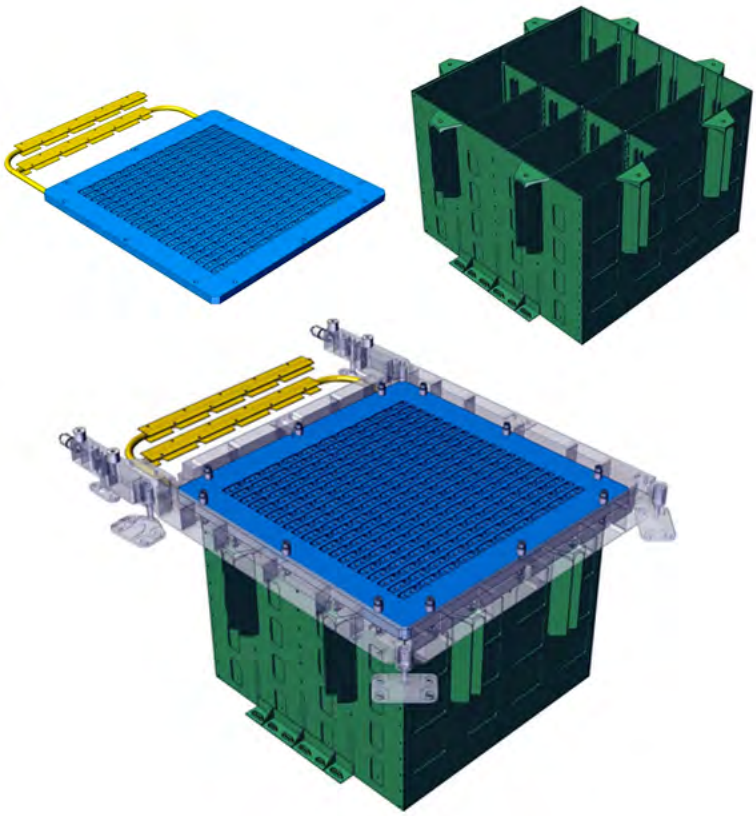


FIGURE 3.6 – Caméra DPIX et ses caloducs, intégrés autour de la ceinture d'interface, réalisant la régulation thermique. En haut à gauche : Plan de détection de la caméra DPIX équipée de ses caloducs vue de face supérieure / En haut à droite : ELS Box de l'instrument ECLAIRs.

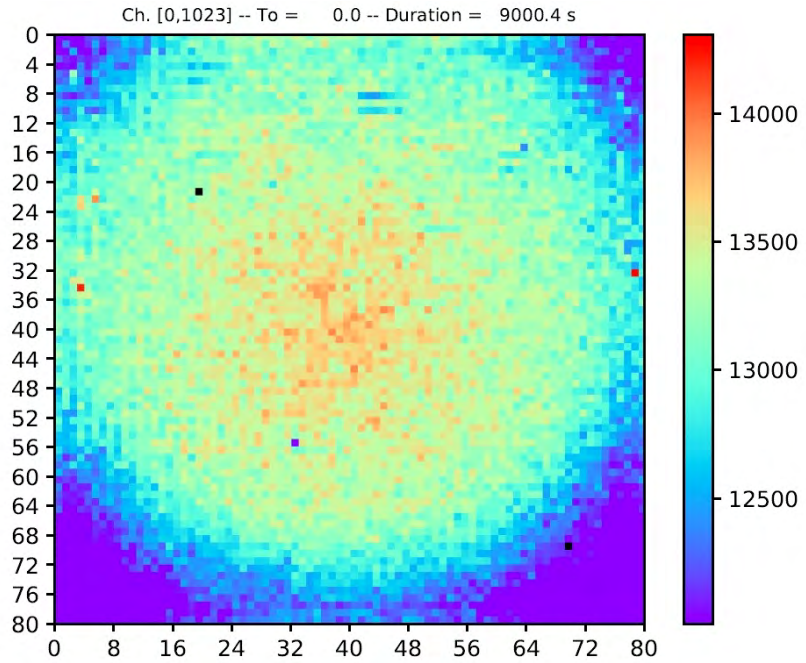


FIGURE 3.7 – Première image de la caméra pixélisée du télescope ECLAIRs, avec ses 6400 détecteurs CdTe fonctionnant dans les conditions de vol (à basse température et sous vide secondaire) éclairés par des sources de ^{55}Fe et ^{241}Am.

La régulation thermique

Dans le cas de la caméra DPIX, il existe deux interfaces thermiques : l'interface radiative et l'interface conductive.

Par exemple, la surface supérieure du plan de détection (constituée des détecteurs et de la face supérieure du plateau froid) est en interface radiative avec la cavité du blindage. Elle est une source de fuites thermiques pour le plan de détection. Les propriétés thermo-optiques de cette face sont, d'une part, l'émissivité infra-rouge de 0,51 pour les détecteurs (valeur issue de mesures réalisées par le CNES), et d'autre part, l'émissivité infra-rouge de 0,12 pour le plateau froid (composé en Albemet avec un revêtement alodine). Pour ce qui est de l'interface conductive, le contrôle thermique du plan de détection est réalisé principalement par des caloducs (Fig. 3.8) faisant partie du sous-système bus thermique de l'instrument, qui est piloté pour que les détecteurs soient maintenus dans leur gamme de température de fonctionnement. Les boîtiers ELS sont contrôlés thermiquement surtout par rayonnement (via les cinq faces de l'ELS box). Des sondes de température sont positionnées sur le DPIX, se partageant la localisation du plan de détection et celle des secteurs ELS.

La fonction de régulation thermique de l'instrument ECLAIRs, et notamment du DPIX, doit répondre à plusieurs spécifications techniques, de stabilité et de flux d'interface. En effet, la spécification spatiale exige que la différence de température au niveau des 6400 détecteurs reste inférieure à 5°C, à chaque instant, en mode opérationnel. Chacun d'eux doit varier au maximum de 3°C sur chaque orbite, toujours dans ce mode. De plus, le flux thermique échangé par évaporation entre le plateau froid et les dissipateurs thermiques doit être inférieur à 7 W/cm^2.

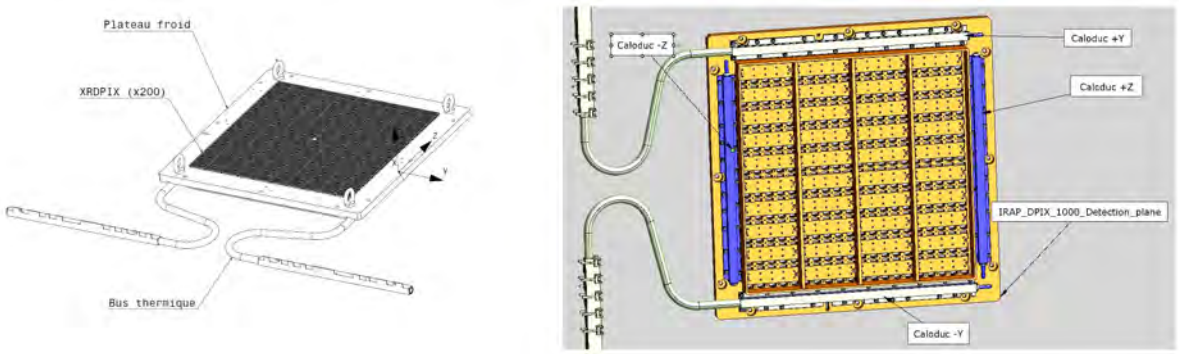


FIGURE 3.8 – Plan et image du système de caloducs utilisés pour le contrôle thermique du plan de détection. Credit IRAP et CNES

3.2.2 Le masque codé et le blindage

D'une part, les détecteurs CdTe étant très sensibles à la lumière, il nous faut les faire fonctionner dans un environnement opaque au spectre visible, mais qui doit rester transparent aux rayons X. De plus, il est nécessaire de protéger le plan de détection du fond diffus X, qui se trouve hors du champ de vue. C'est pour cette raison qu'il est blindé avec un blindage passif en plomb avec une transparence aux rayons X inférieure à 1 % à 50 keV.

Les faces internes du blindage sont recouvertes d'une couche de cuivre qui produit une raie de fluorescence à 8,06 keV (Kα) induite par l'irradiation de particules sur la caméra. Ce pic, proche du seuil bas de détection, permettra de contrôler régulièrement l'étalonnage en énergie des détecteurs. D'autres raies, obtenues à partir de la fluorescence du plomb et du tantale, matériaux composant l'instrument ECLAIRs, seront également utilisées pour surveiller une évolution de la calibration au cours du temps. D'autre part, les détecteurs voient le ciel au travers d'un masque codé de 54 x 54 cm^2 situé à 46 cm au-dessus du plan de détection. Ce masque est constitué d'une feuille de tantale prise en sandwich entre deux couches de titane ; il est formé de 46 x 46 éléments carrés et présente une ouverture de 40 %, fraction étudiée et simulée de façon approfondie étant donné son impact sur la détection des sursauts gamma (Fig. 3.11). Le principe de l'imagerie à masque codé est décrit dans la section 2.3.3.

Un revêtement spécifique de type MLI (pour « Multi Layer Insulation »), recouvre le masque pour d'une part, servir de filtre optique coupant les photons dans le visible et l'UV et éviter qu'une lumière parasite ne vienne exciter les détecteurs et d'autre part, assurer une isolation thermique du masque codé. Le choix des couches de MLI et leur mise en œuvre, sont déterminés par une contrainte majeure, à savoir une transparence aux rayons X, qui doit être supérieure à 90 % à 6 keV. Il y a donc un compromis à trouver pour que le plan de détection ECLAIRs soit dans l'obscurité totale tout en laissant passer les photons X de très basse énergie. La figure 3.10 montre le résultat d'une étude sur l'absorption due à différentes couches de MLI qui seront placées au dessus du plan de détection. En définitive, après des campagnes d'essais et des réunions de trade-off, la sélection s'est portée sur une couche de SLI (« Single Layer Insulation ») devant le masque, et sur deux couches de SLI devant le plan de détection.

Nous voyons que la couche de mylar absorbe peu, et que si le besoin apparaît (protection supplémentaire contre les micro-météorites par exemple, optimisation de l'obscurité), nous pourrions en mettre une troisième, soit une couche de Kapton couplée à 3 couches de Mylar.

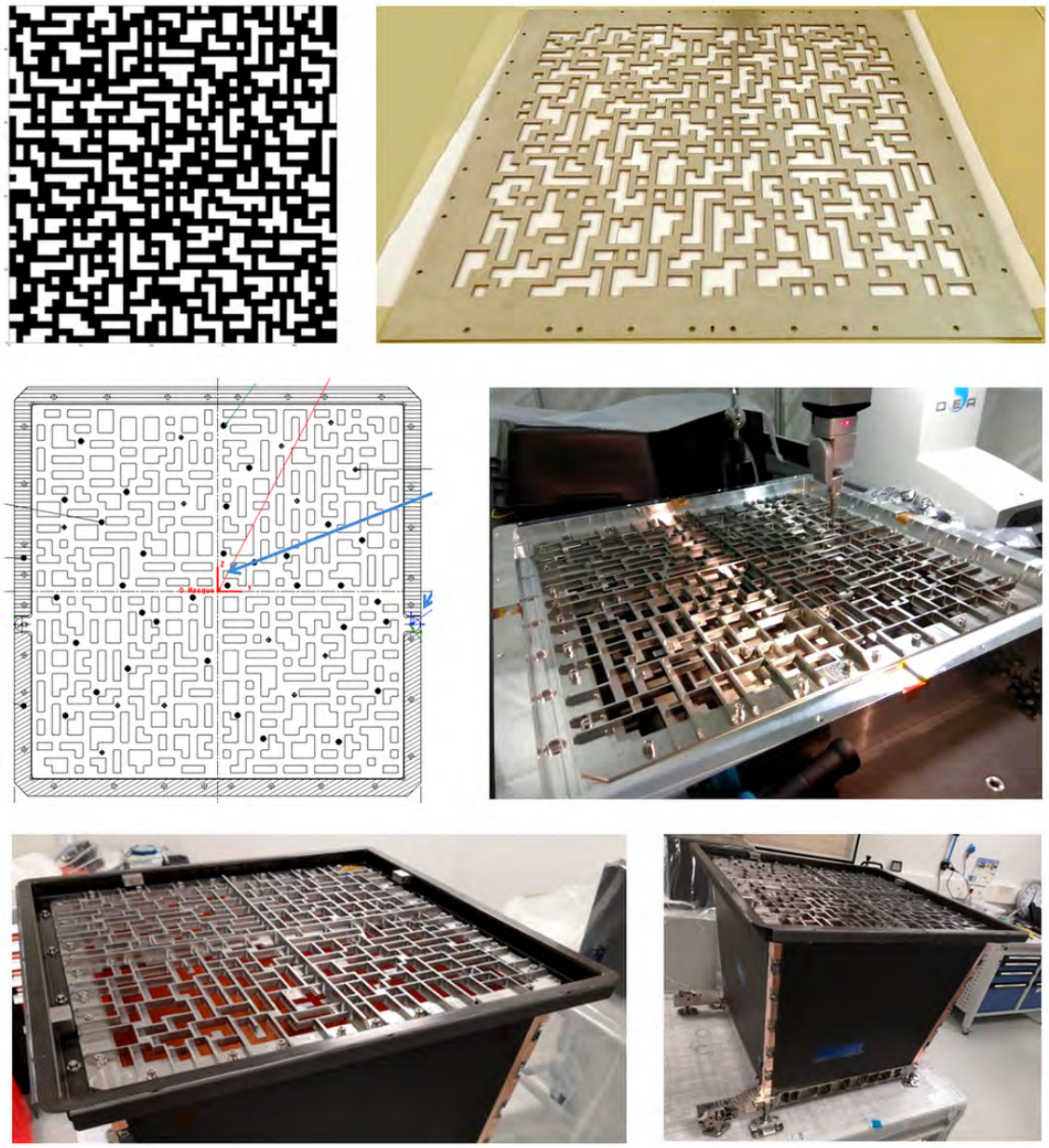


FIGURE 3.9 – Image en haut à gauche : Une des premières versions du motif du masque ECLAIRs (la version finale a un renforcement en forme de croix à l'intérieur du carré) / Image en haut à droite : Prototype de masque codé ECLAIRs / Image au centre à gauche : Repères du masque sur la version finale du motif / Image au centre à droite : Mesures du masque assemblé à la machine à mesurer tridimensionnelle / Image en bas à gauche : Modèle structural et thermique du masque (à partir de la dernière version de motif) / Image en bas à droite : STM de la structure mécanique et du masque de l'instrument ECLAIRs. Credit APC : Alain Givaudan et Cyril Lachaud

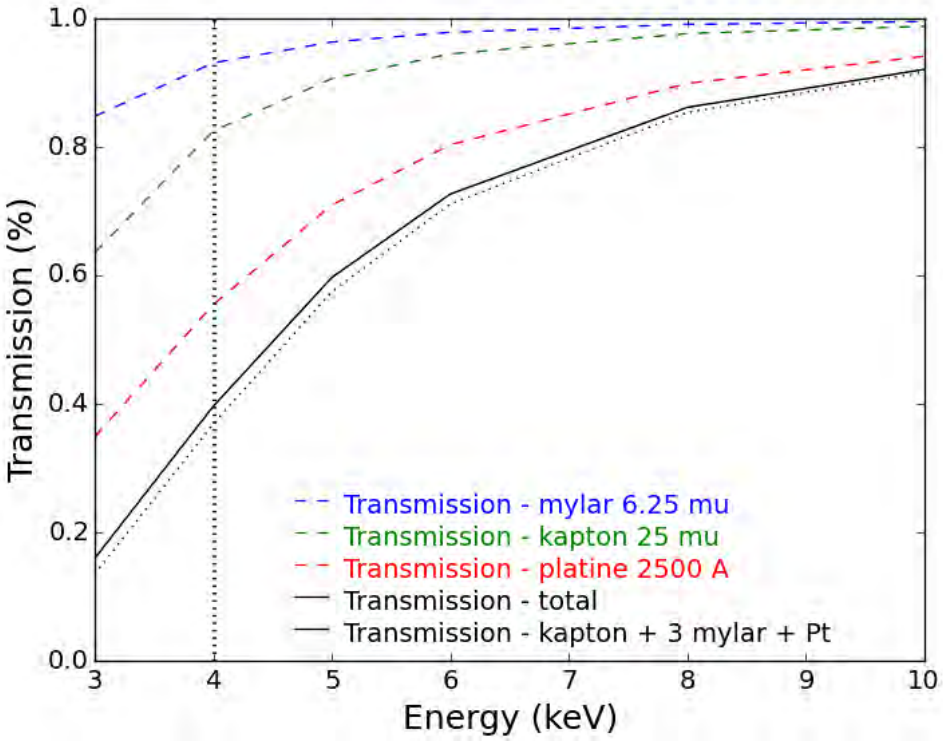


FIGURE 3.10 – Absorption estimée de 3 couches de MLI avec la couche de platine.

3.2.3 Les logiciels UGTS et Trigger

Que seraient nos yeux sans la direction de notre cerveau ? Dans cette section, nous décrivons un sous-système clé à la compréhension et à l'analyse des observations de la caméra DPIX d'ECLAIRs.

L'UGTS est l'unité de gestion et de traitement scientifique d'ECLAIRs ; elle comprend un logiciel de gestion de la configuration de l'instrument, qui va contrôler la température du plan de détection, les seuils bas en énergie, les housekeepings (paramètres des instruments tels que les températures internes, les tensions, les courants,...), les modes de fonctionnement, les paramètres de déclenchement (ou « trigger »), la gestion des pixels bruyants, ainsi qu'un logiciel de déclenchement, qui va chercher les excès de signal liés aux sources transitoires.

Lors de la détection d'un excès, le logiciel construit l'image du ciel pour localiser la source qui l'a provoqué (voir section 3.5). Les excès alertent le sol via une séquence de messages VHF et, lorsqu'ils sont importants, génèrent des requêtes de repointage du satellite pour des observations de suivi avec les instruments MXT et VT. Le mode d'observation nominal d'ECLAIRs est le mode d'acquisition de photons, dans lequel tous les événements enregistrés, y compris leur horodatage, leur énergie et leur position, sont constamment mémorisés dans la mémoire de masse avant la transmission au sol.

A ces fonctions principales s'ajoute la gestion des voies bruyantes : en effet, le logiciel de bord va mener une stratégie d'identification et d'étude des voies dont le comptage excède un taux préalablement défini. C'est ainsi que la gestion à bord est basée sur l'existence de plusieurs états possibles pour une voie, comme par exemple :

— voie nominale : les comptages sont « normaux ».

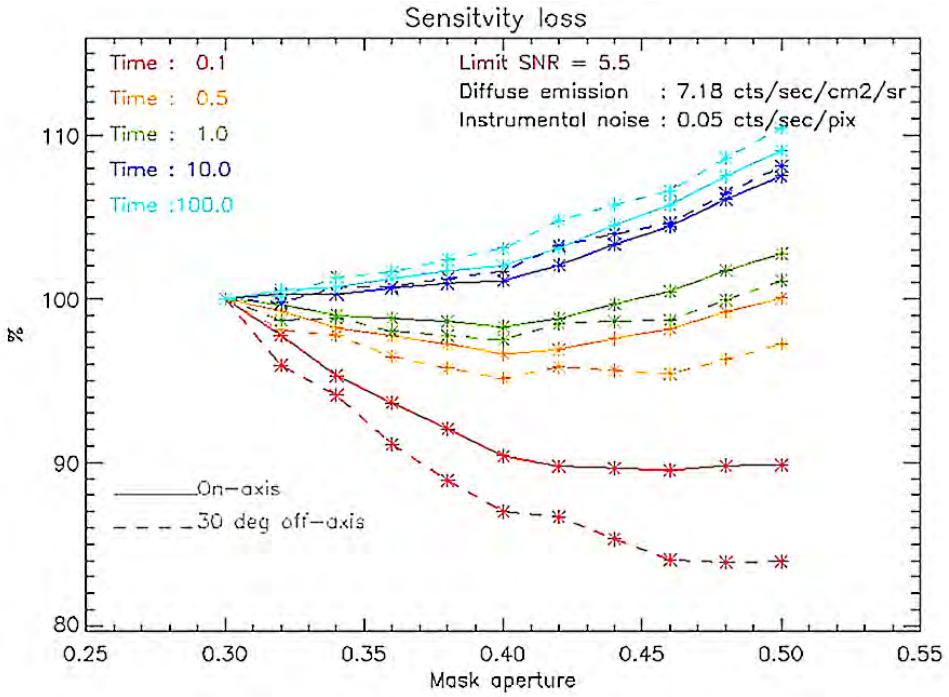


FIGURE 3.11 – Impact de la fraction d'ouverture du masque codé sur le taux de détection des sursauts gamma, avec différentes courbes selon la durée du sursaut : cette figure montre la perte de sensibilité en fonction de l'ouverture du masque codé (entre 0,3 et 0,5). Les courbes au dessus de 100 % indiquent une perte de sensibilité. En augmentant l'ouverture du masque, nous améliorons la détection des sursauts courts.

— voie bruyante : les comptages sont en excès par rapport aux taux de comptage mesurés sur les autres voies. Dans ce cas on propose de conserver la voie active, tout en l'inhibant pour le déclenchement.
— voie très bruyante : les comptages sont susceptibles de perturber la chaîne de lecture (taux de comptage supérieur à quelques centaines de coups/seconde) ; dans ce cas, la voie est désactivée.

La gestion des voies bruyantes

Gérer les voies bruyantes, qu'elles le soient au début de la mission ou potentiellement en devenir, demande une pré-étude au sol pour comprendre la phénoménologie, et ainsi les traiter au mieux en vol avec l'UGTS.

Au fil des essais que j'ai réalisés sur les modules unitaires, et sur le ProtoDPIX, j'ai pu constater différents comportements montrant l'apparition de bruits singuliers, et non attendus. En effet, voici les cinq types de voies bruyantes observés sur les détecteurs XRDPIX :

- Les voies défectueuses,

- Les voies dont le seuil est réglé trop bas,

- Les voies P8 et P16 dues à une diaphonie intra-module (dont nous parlerons plus en détail dans les chapitres 4 et 5),

- Les voies P15 et P23 dues à une diaphonie inter-modules,

- Les voies instables.

Les voies défectueuses (appelés aussi « pixels bruyants », même si ce ne sont pas toujours les détecteurs CdTe qui produisent le bruit dominant, comme nous le verrons dans la section 5.2.1) sont généralement désactivées avant de commencer un test et, au vu de nos expérimentations, elles sont peu nombreuses, autour de 1%. Sur le modèle de vol, il faudra prévoir la désactivation de certaines voies de façon permanente, c'est à dire qu'elles seront programmées avec un seuil numérique de valeur 63, soit une efficacité égale à 0.

S'agissant des voies dont le seuil est réglé trop bas, elles se manifestent par un pic de bruit à basse énergie et des comptages excessifs (Fig. 3.12). Dans ce cas, il suffit de monter légèrement le seuil bas pour obtenir des comptages corrects.

C'est un tout autre phénomène qui survient sur les voies P8 et P16. Ce problème, que j'avais constaté assez tôt lors des tests des Céramiques ASIC, puis des phases de conception et de tests des modules unitaires XRDPIX, s'est ensuite observé sur le ProtoDPIX. Une diaphonie intra-module apparaît au niveau de la Céramique ASIC et se traduit par le déclenchement intempestif des voies P8 et P16 pour chaque coup enregistré par l'une des 32 voies. Nous voyons par exemple que si la voie touchée n'est pas l'une de ces voies, alors il apparaît trois voies touchées, tandis que si la voie touchée est P8 ou P16, nous remarquons deux voies touchées. L'origine de ce bruit est lié à l'électronique et au design de la Céramique ASIC.

Les voies bruyantes présentant une diaphonie inter-modules sont identifiées comme les voies P15 et P23 des XRDPIX : leur origine est proche de la précédente, à cela près que la perturbation provient d'un module voisin. Ainsi, les comptages parasites sont provoqués par l'influence des signaux numériques d'un module sur les voies analogiques (dans notre cas, c'est le module XRDPIX situé sur la gauche du ProtoDPIX qui est concerné). Une solution consiste à « geler » un ASIC/XRDPIX pendant une soixantaine de µs chaque fois que le module situé immédiatement à sa droite compte un événement, ce qui, par voie de conséquence, introduit un temps mort variable sur le module.

Pour ce qui est des voies instables, l'origine est souvent difficile à déterminer. L'évolution de la courbe de lumière devient erratique, comme nous pouvons le voir sur la figure 3.12 (graphe de droite).

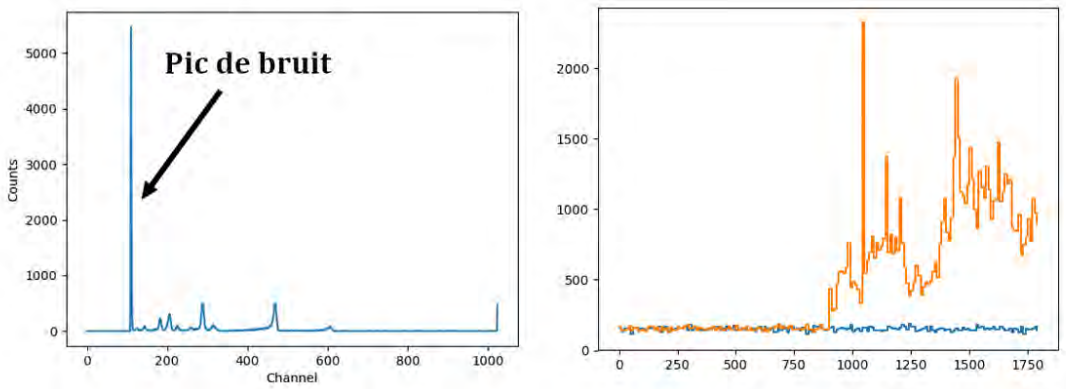


FIGURE 3.12 – Gauche : Spectre d'une voie bruyante dans le cas où son seuil numérique est programmé à une trop faible valeur / Droite : Courbe de lumière de 2 voies ProtoDPIX : la courbe bleue est une voie normale et la courbe orange montre une voie instable.

3.3 Les performances scientifiques d'ECLAIRs

Les caractéristiques de l'instrument décrites dans la section précédente nous donnent une idée des performances que pourra atteindre ECLAIRs. Dans ce chapitre, nous allons parler de la géométrie de l'instrument, à savoir la surface efficace, le champ de vue, le bruit de fond attendu, la sensibilité et la précision de localisation des sources ponctuelles, paramètres essentiels à la définition des performances scientifiques [Triou et al., 2018]. L'ensemble de ces paramètres ont été définis au chapitre précédent, sur l'imagerie des sources transitoires à haute énergie.

3.3.1 La surface efficace

Une première exigence est la détection de sursauts mous, comme les « X-ray Flashes » (XRF), qui implique un seuil bas en énergie de quelques keV. Tandis que la sensibilité aux sursauts durs classiques ne dépend que faiblement du seuil en énergie (Fig. 3.18), ce n'est pas le cas pour les sursauts mous (comme les XRFs) qui émettent la majorité de leurs photons à faible énergie. Comme l'ont montré les missions BeppoSAX et HETE-2, la sensibilité à ce type de sursauts dépend fortement du seuil bas du détecteur. C'est pourquoi, dans le cas d'ECLAIRs, nous cherchons à être sensibles à partir de 4 keV.

Nous montrerons dans le chapitre 5 que les mesures spectroscopiques réalisées sur les modules XRDPIX Flight Model donnent des seuils bas en énergie inférieurs à cette valeur (exemple d'une voie détecteur sur la figure 3.13 qui montre une FWHM du pic à 60 keV de 1,05 keV et un seuil bas en énergie calculé à 6 sigma de 1,95 keV).

En tenant compte de l'absorption du masque et de la couverture thermique, l'instrument devra avoir une surface efficace supérieure à 200 cm^2 à 6 keV, et supérieure à 340 cm^2 entre 10 et $\approx$ 70 keV, ce que nous pouvons lire dans le tableau 3.1). D'après les simulations Monte Carlo

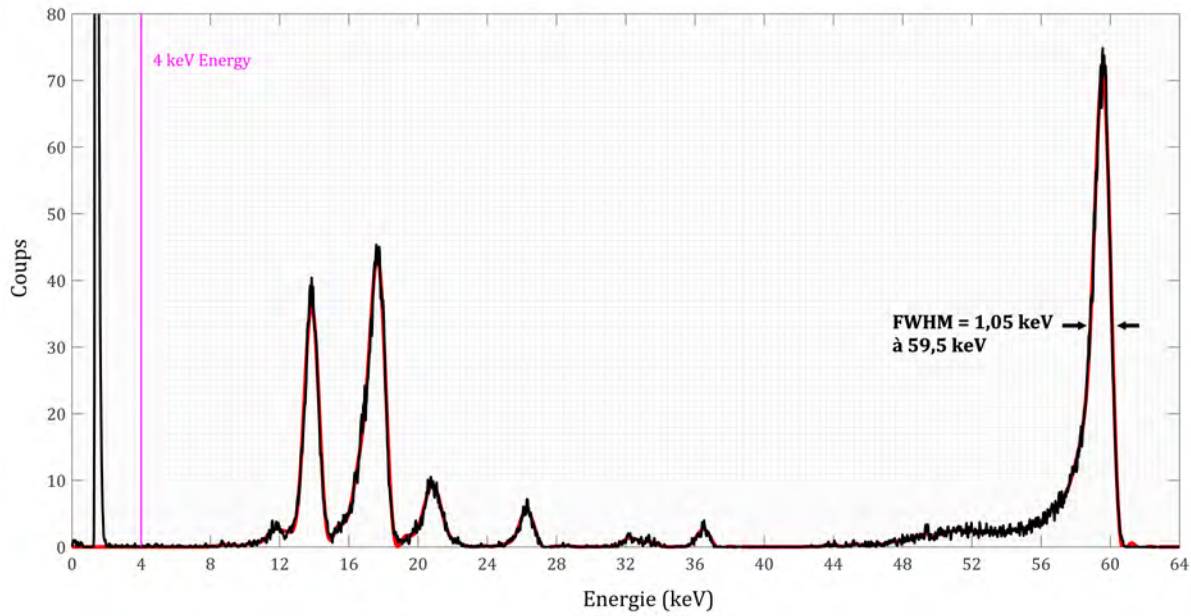


FIGURE 3.13 – Spectre en énergie d'une source calibrée d'^{241}Am, obtenu sur une voie (P10) d'un XRDPIX FM (module XR105) de l'instrument ECLAIRs. Le module est refroidi à $-20°$C, testé sur le banc BC1 et configuré à (HT = -400 V ; tp = 4,4 µs) à un seuil numérique programmé de façon automatique tel qu'il fait apparaître le pic de bruit spectral de la voie (tables de configuration 5.2 et 5.3).

du plan de détection (Fig. 3.14), cet objectif pourra être atteint, grâce à un détecteur CdTe (dans notre cas de 1 mm d'épaisseur) très bien adapté à la gamme d'énergie de l'instrument ECLAIRs [4 – 150] keV.

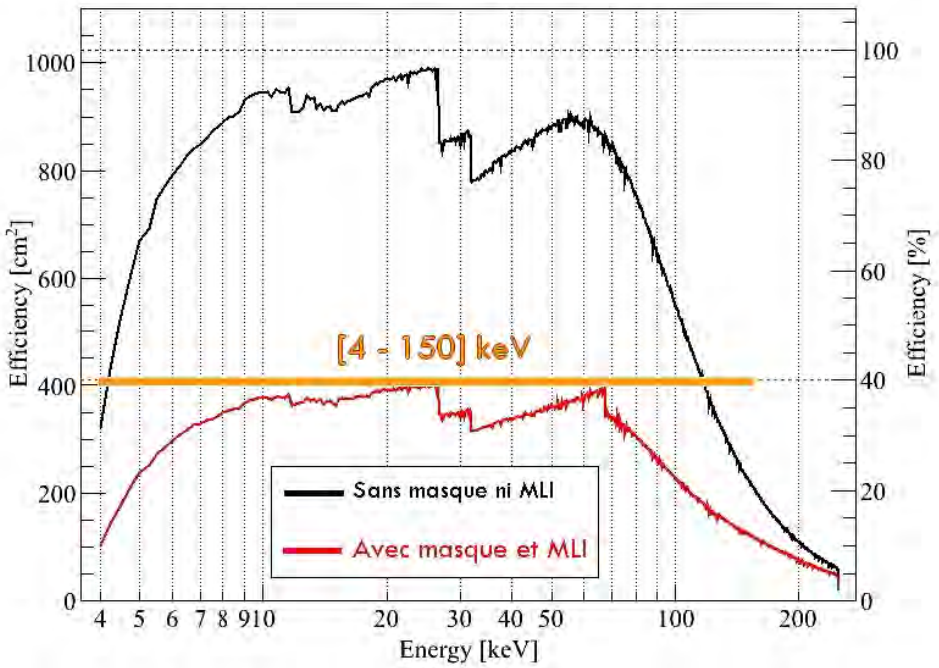


FIGURE 3.14 – Comparaison des courbes d'efficacité du télescope ECLAIRs, avec masque et couche de MLI (courbe rouge) et sans masque ni MLI (courbe noire).

3.3.2 Le champ de vue

Le champ de vue choisi pour ECLAIRs est le résultat d'un compromis entre l'objectif de détecter un grand nombre de sursauts gamma et les limites de volume et de masse allouées à l'instrument. Plusieurs études ont permis d'optimiser sa géométrie, et ont conduit à la conception d'un instrument compact avec un masque carré de 54 x 54 cm^2 situé à environ 46 cm au-dessus du plan de détection de 36 x 36 cm^2.

Cette géométrie aboutit à un champ de vue total de 89° x 89°, avec une région centrale totalement codée de 22° x 22°. Compte tenu de ce grand champ de vue, et des différentes contraintes de la mission (proche du pointage anti-solaire, besoin de se tourner vers les sursauts), ainsi que de l'angle de la Terre vue du satellite (un cercle de 68° de rayon), la Terre sera dans le champ de vue d'ECLAIRs pendant une durée non négligeable du temps d'observation.

3.3.3 Le bruit de fond

Après avoir coupé le bruit électronique en programmant un seuil numérique suffisamment haut, nous voyons apparaître d'autres sources de bruit de fond sur le plan de détection ; il comporte plusieurs composantes : le fond diffus X, le bruit de fond des particules sur l'orbite du satellite, l'albedo de l'atmosphère terrestre et le bruit de fond radioactif induit par l'interaction des rayons cosmiques et des particules chargées de la SAA avec les matériaux du satellite et de l'instrument ECLAIRs. De plus, le satellite *SWIFT* a observé d'autres variations du bruit de fond, orbitales et saisonnières, qui affecteront probablement SVOM.

Les simulations montrent que, dans le cas d'ECLAIRs, c'est le fond diffus X (DXRB) qui est la principale source de bruit dans la gamme d'énergie inférieure à 80 keV. En tenant

compte de la stratégie de pointage de l'instrument (ECLAIRs a un pointage quasi antisolaire), nous constatons que le flux reçu par le plan de détection varie fortement au cours de l'orbite, lorsque la Terre est dans le champ de vue. Ceci est illustré sur les figures 3.15 et 3.16, qui affichent le taux de comptage attendu et les spectres à différentes positions le long de l'orbite, dans la gamme d'énergie [4 - 200] keV. Par exemple, dans le cas de la première figure montrant l'évolution du taux de comptage du bruit de fond au cours du temps, nous pouvons voir qu'à partir d'une trentaine de minutes, le bruit de fond se stabilise autour de 3000 c/s en moyenne, et ce pendant plus d'une heure orbitale.

Aussi, les estimations actuelles montrent un bruit de fond variant de 400 c/s lorsque la Terre obstrue le champ de vue, à ~3500 c/s quand ECLAIRs regarde le ciel en dehors du plan galactique. Ces valeurs peuvent augmenter jusqu'à respectivement 7200 c/s et 14000 c/s) lorsque la source binaire X galactique SCO X-1 se retrouve dans le champ de vue totalement codé. Cet environnement très dynamique est pris en compte par l'algorithme de déclenchement (section 3.5) ainsi que dans l'estimation des performances de l'instrument. Les transits terrestres sont obtenus à partir d'un simulateur de mission fournissant la position du satellite SVOM sur son orbite, son pointage et la position du sursaut gamma dans le champ de vue de l'instrument ECLAIRs.

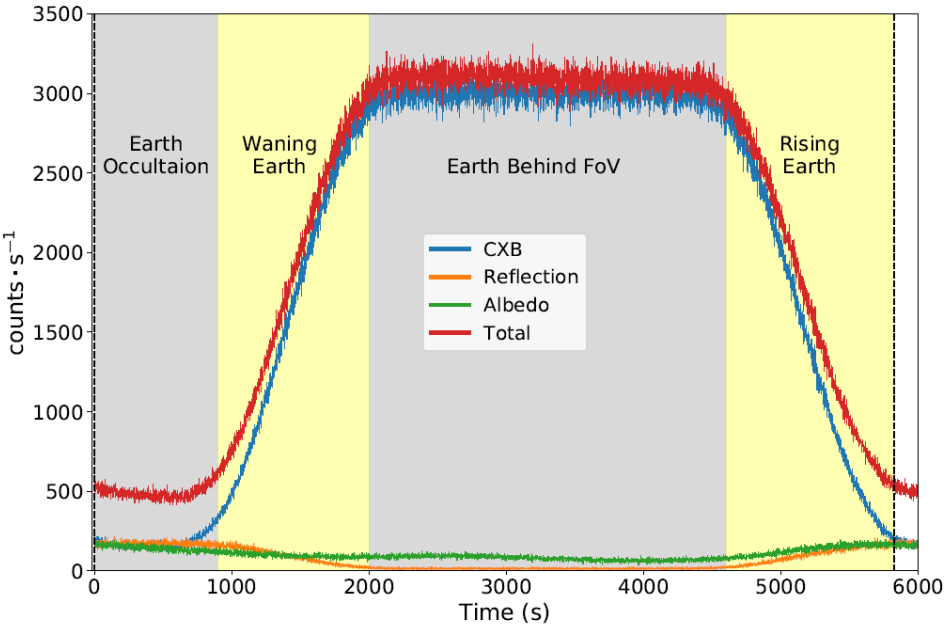


FIGURE 3.15 – Simulation des comptages du bruit de fond dans la gamme d'énergie [4 - 150] keV, sur l'ensemble du plan de détection [Mate et al., 2019].

La SAA : la particularité des orbites terrestres basses

L'Anomalie Atlantique Sud est une région qui résulte de la géométrie locale des lignes du champ magnétique terrestre. Située au-dessus de l'océan Atlantique Sud, elle montre une forte concentration de particules chargées, telles que des électrons et des protons. Les contours de la SAA dépendent de plusieurs paramètres : l'altitude, la géométrie du champ magnétique terrestre, l'activité solaire, qui évoluent au cours du temps, et définissant alors des contours

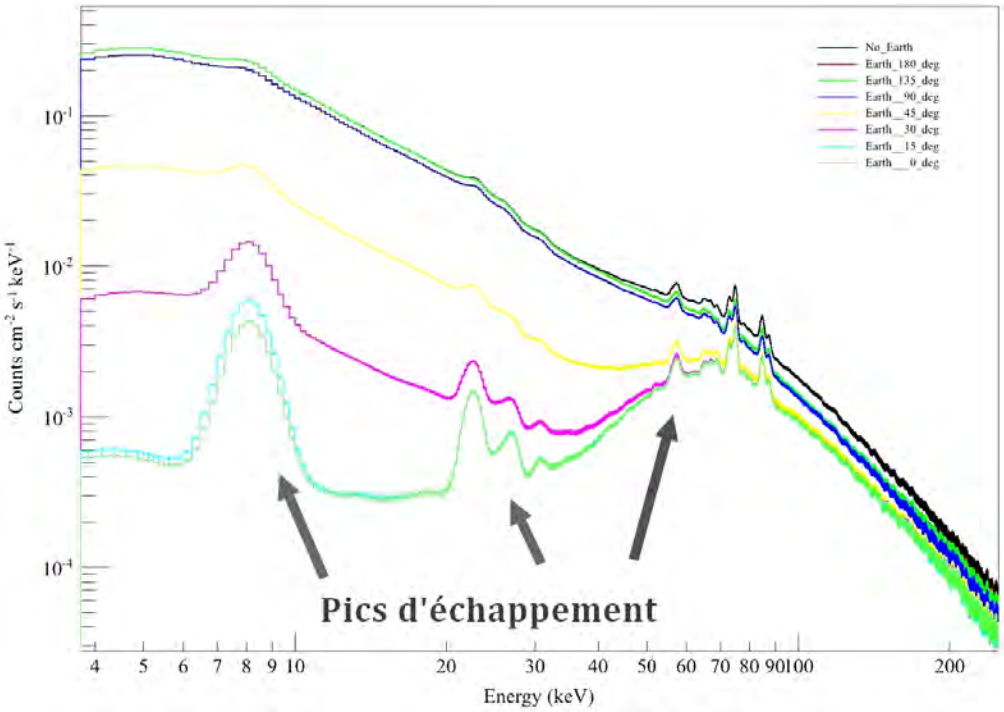


FIGURE 3.16 – Simulation du spectre du bruit de fond dans la gamme d'énergie [4 - 200] keV en fonction de la position de la Terre dans le champ de vue d'ECLAIRs - En dessous de 80 keV, le bruit de fond est dominé par le CXB si l'instrument ne voit pas la Terre ; quand le satellite est dirigé vers la Terre, ECLAIRs ne voit pas un spectre de CXB très élevé à plus basse énergie (E $<$ 40 keV), mais peut détecter des raies de fluorescence provenant de plusieurs matériaux : cuivre (blindage) à 8 keV, CdTe (détecteur) autour de 26 keV, raie X de tantale (masque) à 57 keV.

fluctuants. Afin de limiter l'impact de la SAA sur les opérations de l'instrument ECLAIRs, deux contours sont définis (Fig. 3.17) :

1. Le contour « SAA profonde » qui délimite la région dans laquelle toute opération de l'instrument est impossible. Cette région est définie par la limite à partir de laquelle on observe une augmentation significative du niveau de bruit de fond liée aux particules chargées, typiquement d'un facteur 10.
2. Le contour « SAA étendue » qui englobe une région périphérique de la SAA profonde, dans laquelle les particules énergétiques (essentiellement des électrons) modifient le niveau de bruit de fond en le rendant plus fort et plus variable. ECLAIRs sera maintenu en opération dans cette zone, mais dans une configuration spécifique, limitant les risques de faux déclenchements.

De par son orbite, SVOM va traverser plusieurs fois par jour la SAA (5 à 10 fois), durant quelques minutes à 1/2 h, ce qui aura pour conséquence la très forte concentration de particules énergétiques, conduisant à une forte augmentation du bruit de fond et du taux de comptage qui peut amener l'instrument à saturer.

L'impact de protons énergétiques sur les noyaux des atomes constitutifs de l'instrument (ou du satellite) conduit à la création de noyaux excités (processus d'activation). Quand ils se désactivent pour revenir à leur état initial, ces noyaux émettent des rayons gamma qui vont venir augmenter le niveau du bruit de fond détecté par le plan de détection.

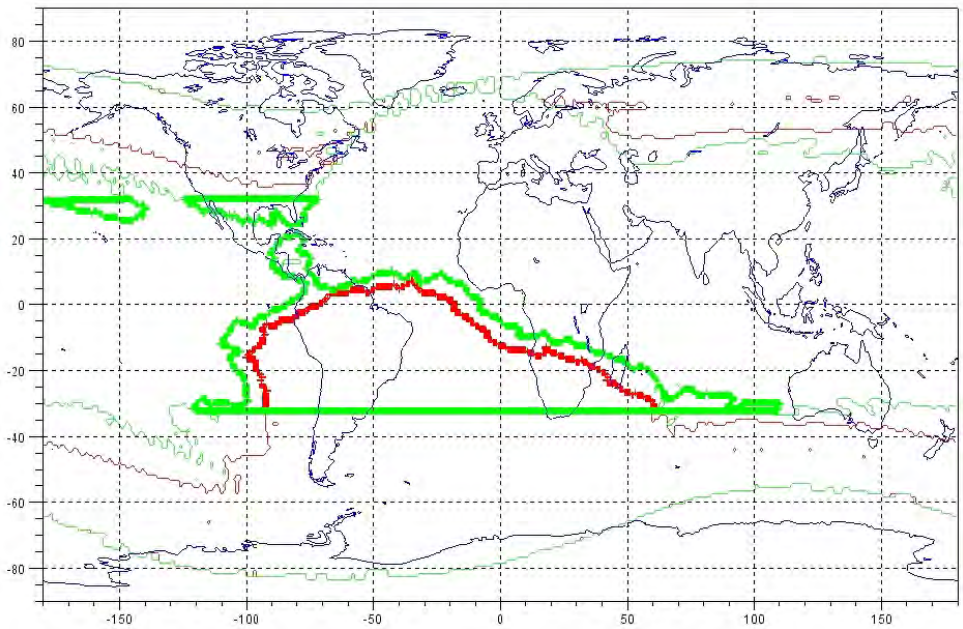


FIGURE 3.17 – Illustration des deux contours de la SAA définis pour l'instrument ECLAIRs : Contour de la SAA étendue (vert) et contour de la SAA profonde (rouge).

3.3.4 La sensibilité

Par suite des variations du bruit de fond reçu, la sensibilité de l'instrument ECLAIRs évolue le long de l'orbite. Dans ce paragraphe nous allons parler de la sensibilité de l'instru-

ment regardant un ciel dégagé de tout obstacle (pas de Terre, pas de plan galactique), et qui observe une source dans l'axe.

Nous reprenons ici les calculs du chapitre 2 en les adaptant à ECLAIRs. En supposant un spectre en loi de puissance avec un indice égal à -1 (valeur courante dans cette gamme d'énergie), la limite de flux attendu pour une détection à 6,5 sigma, dans la plage [5 - 50] keV, est de 2,5.10^{-8} erg cm^{-2} s^{-1} pour un sursaut de 1 seconde (le flux est dix fois plus petit pour un sursaut long de 100 s). Le flux limite, toujours entre 5 et 50 keV, pour un sursaut mou de 1 seconde et un indice alpha = -2, est de 1.7 10^{-8} erg cm^{-2} s^{-1}.

Des simulations plus réalistes, avec des hypothèses de spectres de sursauts basés sur la fonction de Band, conduisent à la figure ci-dessous 3.18, qui compare la sensibilité attendue de ECLAIRs/*SVOM* avec d'autres instruments de détection des GRBs [Antier et al., 2014] [Götz & SVOM Collaboration, 2012] [Godet et al., 2009]. Nous parvenons à la conclusion que l'instrument ECLAIRs est plus sensible que BAT de *SWIFT* pour des sursauts avec un pic d'énergie $E_{peak} < 30$ keV, ce qui permet de détecter des sursauts gamma faibles comme les XRFs avec une bonne efficacité.

Par ailleurs, avec sa gamme d'énergie étendue à quelques keV, ECLAIRs va détecter de nombreuses sources dans le plan galactique, ce qui réduira sa sensibilité dans cette région. La figure 3.19 montre la perte de sensibilité en fonction de la direction de pointage, entre 4 et 120 keV.

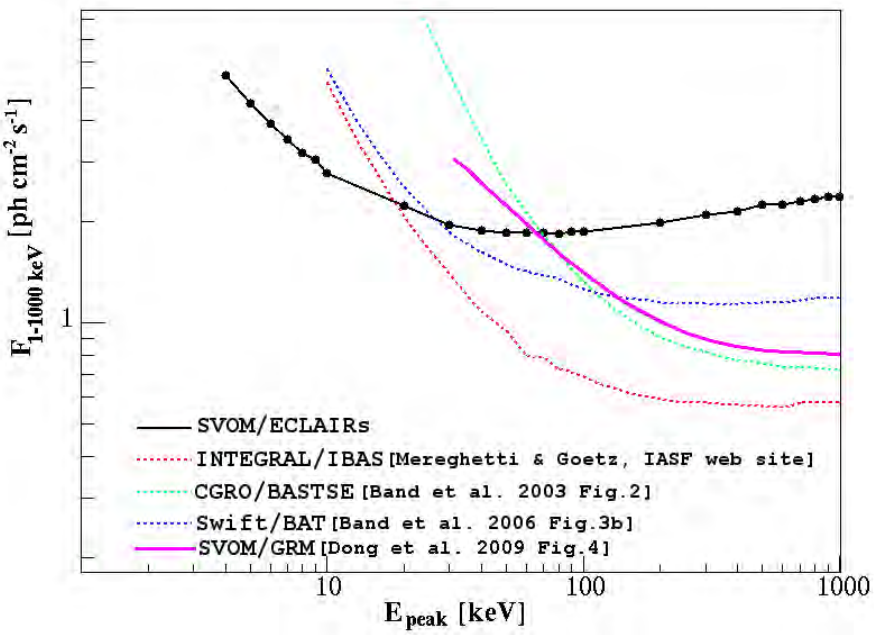


FIGURE 3.18 – Sensibilité de l'instrument ECLAIRs (en noir) à un sursaut d'une durée de 1 s en fonction de l'énergie maximale E_{peak}, caractéristique du sursaut. La sensibilité est mesurée dans la gamme d'énergie [1 - 1000] keV. L'instrument est plus sensible que *SWIFT* / BAT pour la détection des sursauts mous ayant une énergie E_{peak} inférieure à 30 keV [Mandrou et al., 2008].

Cette fin de section sur les performances scientifiques d'ECLAIRs, va s'ouvrir sur la description des caractéristiques techniques conduisant à la détection des sources transitoires : imagerie, déclenchement, spectroscopie, opérations en vol, calibration, données. Pour autant,

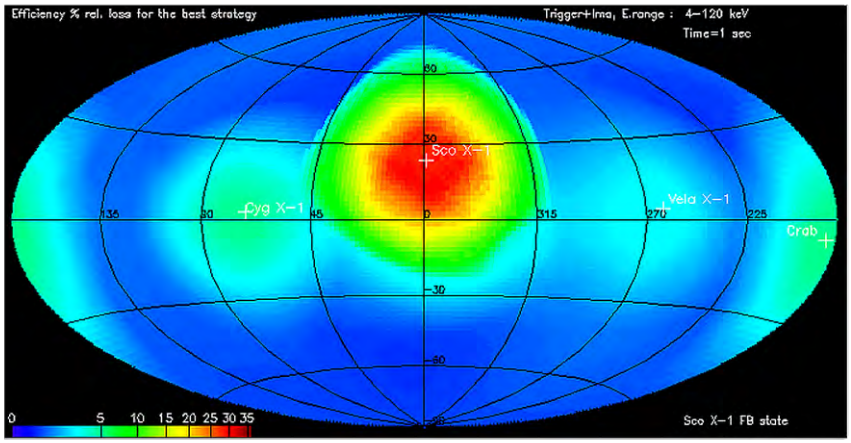


FIGURE 3.19 – Perte de sensibilité de l'instrument ECLAIRs (%) à la détection de sursauts gamma dans la gamme d'énergie [4 - 120] keV, en fonction de la direction de son pointage [Gros, 2017].

le programme général de SVOM n'impose pas d'exigences de sensibilité spécifique aux sources permanentes et variables de rayons X durs.

3.4 L'imagerie d'ECLAIRs

ECLAIRs utilise l'imagerie à masque codé avec un plan de détection pixélisé, de 80 x 80 détecteurs et un masque codé (Fig. 3.9) présentant une ouverture de 40 %, comme décrit dans la section 3.2.2.

Le rapport de la taille du pixel du masque sur la taille du pixel détecteur est m / d = 2,6. Ce rapport joue un rôle important sur la sensibilité et les performances de localisation. Compte tenu du champ de vue du VT, en choisissant ce masque, tous les sursauts gamma seront dans son champ de vue. Si ce rapport avait été augmenté, l'instrument aurait été encore plus sensible, mais au détriment de la précision de localisation, ce qui fait que les boîtes d'erreur n'auraient été que partiellement couvertes par le champ de vue du « Visible Telescope ». Initialement ce rapport était de 1,2 ce qui était plus performant en termes de localisation mais moins performant en sensibilité, ce qui montre que l'étude du motif du masque, comme pour beaucoup de sous-systèmes d'un télescope, est faite de compromis techniques et scientifiques. La figure 3.20 illustre cela, avec la localisation en fonction de la sensibilité, pour différents rapports m / d. Ces caractéristiques conduisent à un instrument compact, avec une précision de localisation qui est meilleure que la taille du champ de vue des instruments à champ étroit.

3.4.1 La précision de localisation

La précision de localisation de l'instrument ECLAIRs est déterminée par sa géométrie. La FWHM (full width at half maximum ou largeur à mi-hauteur) d'une source reconstruite est de 1,56°, conduisant à un PSLE de 13' pour une source dans l'axe à 6,5 sigma [Gros, 2017]. Cette valeur théorique peut être affinée avec des simulations détaillées qui prennent en compte la distribution des sursauts gamma dans le champ de vue, ainsi que la répartition

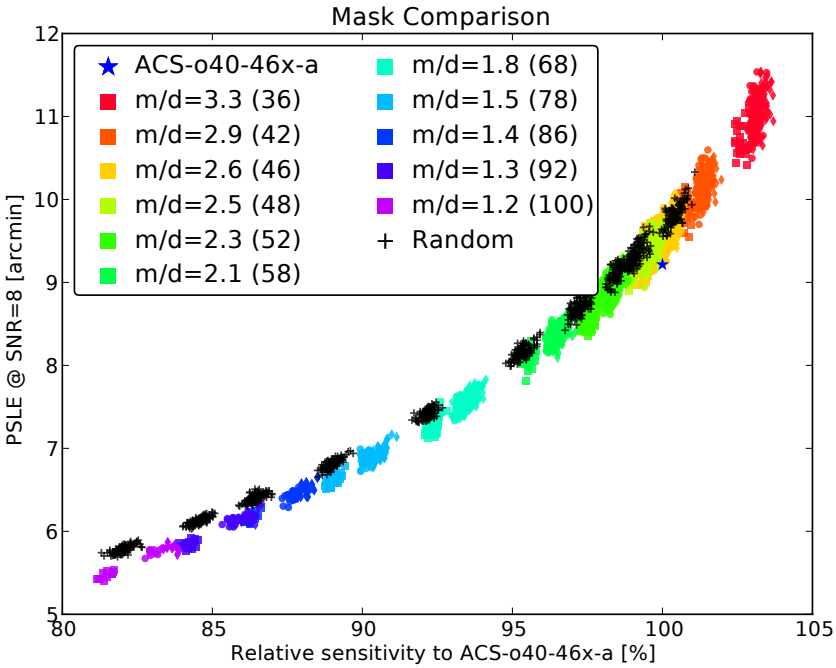


FIGURE 3.20 – Comparaison de plusieurs masques codés ayant des rapports m/d différents, compris entre 1,2 et 3,3. La figure montre la précision de localisation en fonction de la sensibilité. Credit C. Lachaud

de leur luminosité et la méthode de déconvolution. Lorsque tous ces paramètres sont intégrés dans les calculs, nous constatons que 90 % des sursauts avec un SNR de 8,5 ou plus sont correctement localisés dans un cercle d'erreur de rayon de 10 arcminutes (figure 3.21). La précision de localisation à bord du satellite, dans le système astrométrique J2000, est de 12' dans le cas pire, si nous considérons les erreurs d'alignement internes et les déformations thermo-élastiques entre l'instrument ECLAIRs et la structure de référence du satellite.

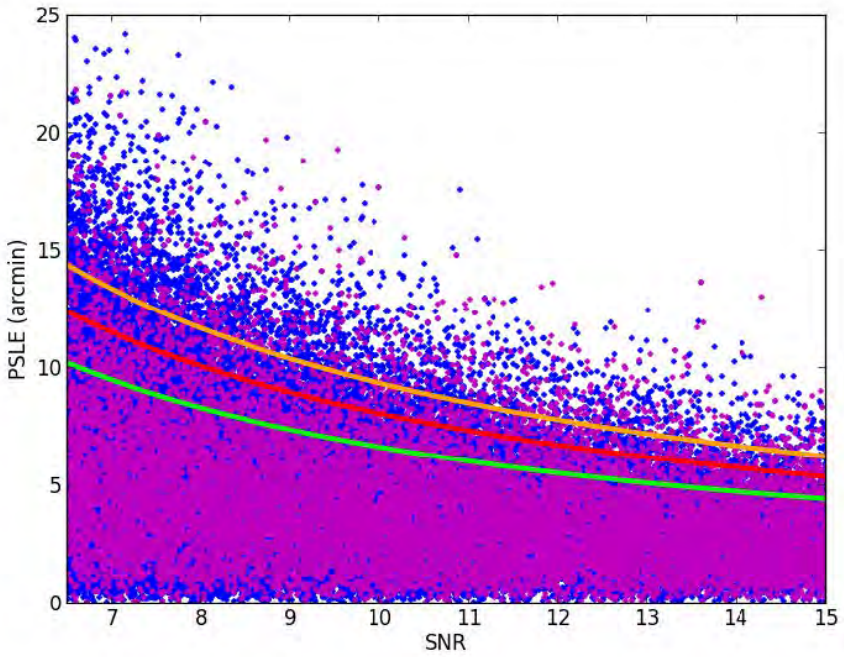


FIGURE 3.21 – Simulation montrant la précision de localisation d'une population de sursauts gamma selon différents SNR, distribués aléatoirement dans le champ de vue - Cela permet de voir que 90 % des sursauts avec un SNR de 8,5 sont correctement localisés dans un rayon de 10 arcmin (courbe rouge).

3.4.2 L'imagerie à bord

La puissance de calcul de l'UGTS permet de construire des images du ciel en vol, de façon systématique sur une durée de 20 secondes et à chaque fois que le trigger « taux de comptage » détectera un excès sur des périodes allant de 10 ms à 20 s. Comme expliqué dans le paragraphe précédent, la précision de localisation d'ECLAIRs garantit que le sursaut sera dans le champ de vue des instruments à champ étroit de SVOM, une fois la rotation du satellite effectuée.

L'exploitation des premières minutes de détection du sursaut, qui suivent le déclenchement (avant le positionnement du télescope et la détection de l'émission rémanente en X avec l'instrument MXT) ne peut se faire que dans la boîte d'erreur de l'instrument ECLAIRs, et pendant plus longtemps si la rotation n'est pas possible et/ou autorisée. Il est donc important d'avoir aussi des télescopes optiques de suivi au sol avec des champs de vue suffisamment grands pour couvrir complètement la boîte d'erreurs ECLAIRs.

3.5 Le déclenchement d'ECLAIRs

3.5.1 Le déclenchement ou trigger en vol

ECLAIRs utilise un algorithme de déclenchement complexe, visant à détecter des sources transitoires courtes (durée d'une fraction de seconde à plusieurs secondes) ainsi que des sources transitoires plus longues (jusqu'à 20 minutes) qui apparaissent dans les images du ciel. La principale difficulté de cet algorithme est le bruit de fond variable durant l'orbite, qui est dû au transit de la Terre dans le champ de vue et à l'environnement de particules variables (Fig. 3.22). Ces variations fréquentes contraignent le trigger à des stratégies spécifiques, que nous allons expliquer dans ce paragraphe [Schanne et al., 2014].

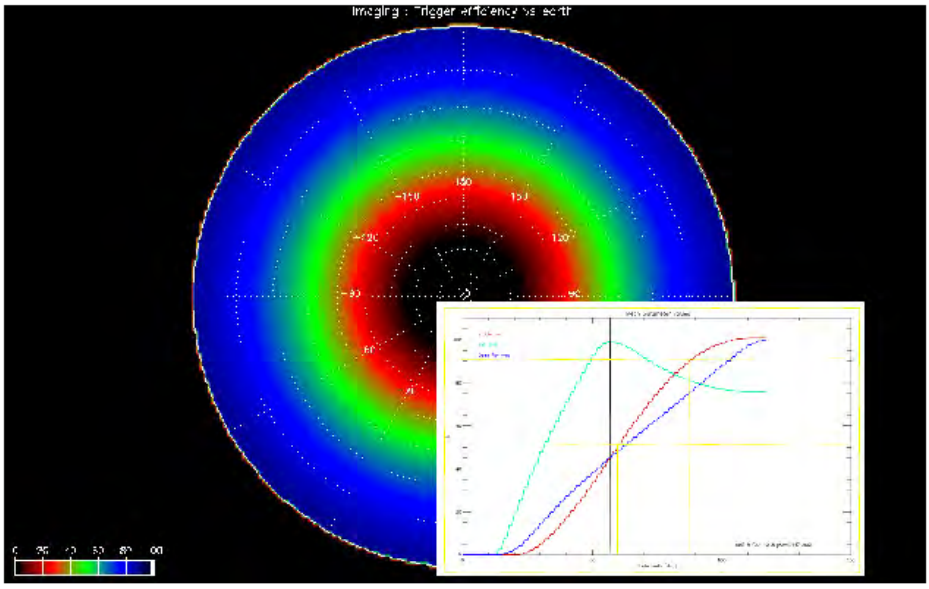


FIGURE 3.22 – Impact de l'occultation de la Terre sur l'efficacité du trigger. La figure montre l'efficacité du trigger en fonction de l'angle entre la direction de pointage et la Terre [Gros A., 2016].

La détection des excès transitoires courts est basée sur la recherche d'excès de comptage sur des périodes de temps variant de 10 ms à 20 s, sur quatre plages d'énergie et neuf zones du plan de détection. Toutes les 2,5 s, une image est construite en utilisant les photons correspondant à l'excès le plus significatif (temps, énergie, zone de détection). L'algorithme de détection des sources utilise un catalogue de sources connues pour aider à la décision : il permet d'éviter la rotation vers des sources transitoires connues de rayons X, tout en permettant la rotation vers les nouvelles sources. Si l'excès est dû à une nouvelle source et qu'il a une valeur de mérite suffisante, une alerte sursaut est déclenchée. Cela peut conduire à la rotation du satellite, s'il y a dépassement du seuil de déclenchement prédéfini, et le satellite sera alors autorisé à pointer vers la direction de la source.

La détection de longs transitoires est basée sur l'application de l'algorithme aux images construites dans quatre bandes d'énergie, en empilant des images de 20 s sur des périodes allant de 20 s à 20 min. En fixant les limites d'énergie d'une bande d'énergie de déclenchement à de faibles valeurs (typiquement [4 - 30] keV), ECLAIRs aura la capacité de détecter des

sursauts gamma très mous émettant la plupart de leurs photons en dessous de 20 à 30 keV.

Pour les sursauts courts, réaliser une image avec ECLAIRs requiert un minimum de comptage (supérieur à 100 événements pour un sursaut de 1 seconde).

Les sursauts ultra-longs demandent une stratégie de pointage différente : ECLAIRs va regarder dans la même direction au cours de plusieurs orbites successives, pour détecter des sursauts longs et d'autres sources transitoires longues.

Par définition, les déclenchements sont associés à un signal significatif dans une image, et à une position de sources X non connue dans le ciel. En conséquence, la fiabilité des alertes ECLAIRs sera élevée, puisque l'imagerie a un fort pouvoir discriminant contre de faux déclenchements, qui seraient dus par exemple aux particules chargées. Dès qu'elle est disponible, la position mesurée par ECLAIRs est transmise à la plate-forme (avec ou sans demande de repointage, selon le SNR de l'excès). La plate-forme la transmet immédiatement à l'antenne VHF, et peut commander le repointage du satellite, une fois les contrôles de sécurité validés.

3.5.2 La configuration du déclenchement

ECLAIRs disposera de plusieurs dizaines de critères du déclenchement, et chacun d'eux sera basé sur une combinaison unique d'un intervalle de temps, et d'une gamme d'énergie d'une zone du plan de détection. Pour chaque critère, ECLAIRs utilisera deux niveaux de déclenchement, un pour les « petits excès » (entraînant une alerte au sol) et un pour les « grands excès » (dont l'alerte envoyée au sol sera suivie d'une demande de repositionnement du satellite). Le déclenchement doit également gérer des seuils spécifiques pour les excès se produisant à la position des sources connues de rayons X.

La configuration du déclenchement d'ECLAIRs nécessite donc la mise en place d'un grand nombre de paramètres devant être mis à jour chaque semaine afin de détecter autant de sursauts que possible tout en maintenant le nombre de faux déclenchements à un niveau acceptable spécifié par la mission SVOM.

3.5.3 Le déclenchement au sol « Off-line »

La disponibilité de tous les photons (ou événements) détectés par l'instrument ECLAIRs au sol environ 12 heures après leur détection permettra d'exécuter au sol un déclenchement en temps différé ; en effet, il arrivera en retard par rapport à la chaîne de détection en temps réel, mais bénéficiera d'une plus grande puissance de calcul et d'une meilleure connaissance du contexte pour rechercher des sources transitoires faibles, avec par exemple la disponibilité des données avant et après la période de recherche et avec la connaissance des sources dans le champ de vue. Ce déclenchement différé (ou « trigger off-line ») sera utilisé pour rechercher des sursauts faibles ou mous, pour des sursauts ultra-longs, mais aussi pour optimiser les paramètres du déclenchement en vol afin de trouver les valeurs qui permettront la meilleure performance du déclenchement en vol. Il pourrait également être utilisé pour surveiller la variabilité de sources connues, pour détecter d'autres types d'événements transitoires non détectables à bord et pour rechercher des contre-parties électromagnétiques d'alertes multi-messager.

3.6 La spectroscopie d'ECLAIRs

La très bonne résolution en énergie et le seuil bas en énergie de l'instrument ECLAIRs vont permettre une caractérisation spectrale précise des sursauts gamma, des sources transitoires et variables, des sources quiescentes de rayons X, ainsi que du fond diffus X. Grâce à son mode d'acquisition des photons, ECLAIRs va étudier de façon innovante l'évolution spectro-temporelle des sources de rayons X transitoires et variables. C'est pourquoi il est réalisé un étalonnage en énergie précis pour chacune des 6400 voies du plan de détection.

Du fait du recouvrement d'une partie de la gamme spectrale d'ECLAIRs avec les autres instruments haute énergie de SVOM (MXT et GRM), il sera possible de mesurer le spectre large bande de l'émission prompte des sursauts avec le GRM et de l'émission rémanente en X (ou afterglow) avec l'instrument MXT, travaillant respectivement dans les gammes d'énergie [15 keV - 5000] keV et [0,2 - 10] keV.

3.7 Les opérations en vol et de calibration d'ECLAIRs

ECLAIRs dispose d'un plan d'opérations en vol simplifié. Lorsqu'il n'est pas dans la SAA (Anomalie Sud Atlantique), l'instrument fonctionne et acquiert les données en continu. Une fois dans la SAA, la haute tension du plan de détection est éteinte, afin d'éviter de saturer les modules XRDPIX et conséquemment la mémoire de masse, avec d'importants flux de particules chargées. Lors de leur passage dans la SAA, les détecteurs d'ECLAIRs sont ainsi réinitialisés et subissent moins l'effet de polarisation (discuté en section 2.2.2.3), même si ce comportement est très amoindri, voire imperceptible à basse température.

Le flux de données en orbite est dominé par les photons issus du fond diffus X, qui est bien connu et qui permet d'effectuer un calcul approché du nombre de coups que l'instrument devra enregistrer tous les jours. En supposant un taux d'environ 3500 c/s pour le bruit de fond du ciel, et trois fois moins si la Terre se trouve dans le champ de vue, ECLAIRs enregistrera 200 à 250 millions de coups par jour.

La mémoire de masse intégrée d'ECLAIRs va enregistrer les caractéristiques de l'ensemble des événements détectés (temps, énergie, position, multiplicité), pour une simplification du fonctionnement de l'instrument et une fiabilisation du système. La précision et les erreurs de localisation seront calibrées en vol au moyen de sources connues qui seront observées dans différentes régions du champ de vue.

L'étalonnage en énergie se basera sur les pics de fluorescence produits dans l'instrument. Une couche de cuivre déposée sur l'intérieur du blindage fournira par exemple une raie d'étalonnage à faible énergie (8,06 keV). La portion de l'orbite durant laquelle la Terre occulte le champ de vue est tout à fait adaptée à l'étalonnage de l'instrument car les pics en énergie ne sont pas altérés par le bruit diffus de rayons X (figure 3.16).

Par ailleurs, les 6400 voies détecteurs devront être calibrées individuellement, car elles ont des gains différents : il sera nécessaire d'intégrer chaque spectre pendant plusieurs heures voire quelques jours pour pouvoir obtenir suffisamment de statistiques sur les raies en énergie. Une table, contenant les deux coefficients de calibration [canal(10 bits) - énergie(keV)] de chaque voie détecteur, est calculée au sol chaque semaine, pour effectuer la conversion canal-énergie. Cette table permet ainsi d'associer à chaque événement l'énergie déposée dans les détecteurs et pas seulement un numéro de canal. Le centre de contrôle surveillera l'état de l'instrument ECLAIRs, effectuera des activités d'étalonnage et enverra des fichiers de configuration de

façon hebdomadaire pour ajuster les réglages du plan de détection et du déclenchement.

3.7.1 Les modes de fonctionnement d'ECLAIRs

Ce paragraphe décrit les modes de l'instrument ainsi que les transitions de modes. La figure 3.23 présente le diagramme de mode d'ECLAIRs, basé sur le diagramme générique applicable aux instruments français de la mission SVOM.

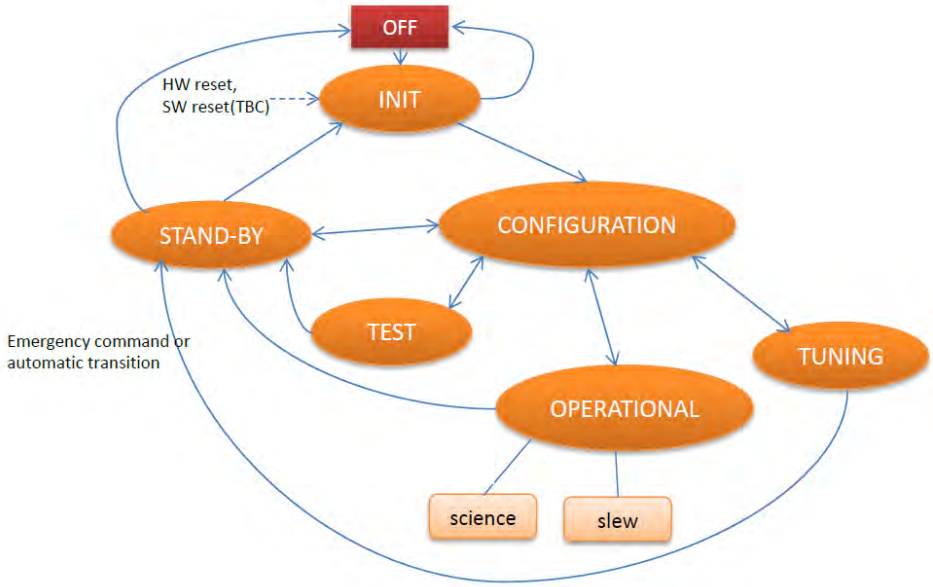


FIGURE 3.23 – Diagramme des modes de fonctionnement de l'instrument ECLAIRs.

Après un état « OFF » pendant lequel ECLAIRs et ses sous-systèmes sont éteints, et son contrôle thermique est maintenu, et assuré par la plate-forme, l'instrument va fonctionner selon six modes :

1. Mode « INIT » : Il s'agit du mode atteint par ECLAIRs suite à sa mise en route (l'UGTS est mis à « ON »). Dans ce cas, il est possible, entre autres opérations, d'effectuer sur le sous-système UGTS des opérations de maintenance du logiciel embarqué. A partir de ce mode, le dialogue entre le PDPU (calculateur du satellite) et l'instrument ECLAIRs est actif, et le contrôle thermique de l'instrument est alors assuré par l'UGTS.
2. Mode « STAND-BY » : Il s'agit d'un mode dit de repli, car il sera accessible à partir de tout mode autre que le mode INITIALISATION sur réception de la commande « emergency ». Ce mode correspond à un état d'ECLAIRs reproductible et stable :
   — L'UGTS est allumé.
   — Les modules XRDPIX sont éteints (+3V de l'ASIC mis à « OFF » et haute tension des détecteurs éteinte), ainsi que les modules ELS.
   — Le contrôle thermique est dans un état indéfini.
   — Le PID qui effectue le contrôle thermique du plan de détection est éteint.
3. Mode « CONFIGURATION » : Il s'agit du mode dans lequel on peut configurer l'instrument. Le plan de détection est mis à « ON », avec une séquence spécifique,

ainsi que le contrôle thermique de la température du plan de détection. Les hautes tensions ne sont activées qu'en dehors de la zone de SAA profonde matérialisée par un sous-mode SAA.

4. Mode « OPERATION » : Il s'agit du mode principal de l'instrument, dans lequel la fonction d'observation d'ECLAIRs est active. Le DPIX envoie les données scientifiques (photons) à l'UGTS qui les analyse pour générer les déclenchements en cas de sursaut gamma. Le déclenchement peut être désactivé en cas de déplacement du satellite, et la fonction de détection peut être ajustée en fonction du niveau de bruit.
5. Mode « TEST » : ECLAIRs fournit des données simulées qui permettent de réaliser des tests de ses principales fonctions, et de tester le logiciel de l'UGTS.
6. Mode « TUNING » : Dans ce mode, on peut modifier les seuils bas numériques des XRDPIX et envoyer au sol les résultats pour procéder ensuite, éventuellement, à un nouveau réglage des seuils.

La procédure de mise en route de la caméra d'ECLAIRs est détaillée en annexe A.2.1.

3.7.2 La commande/contrôle d'ECLAIRs

Beaucoup de données vont être envoyées à l'UGTS depuis le FCU (pour « Flow Control Unit »), l'unité de contrôle des bons échanges de données entre les instruments du satellite d'une part, et avec le segment sol d'autre part. Nous pouvons citer par exemple :

— les paramètres de configuration de l'UGTS (au minimum une fois après chaque mise à « ON »)
— les chargements du logiciel de vol (à chaque demande)
— les changements de paramètres, comme la table des seuils bas numériques à programmer pour chaque voie XRDPIX (chaque semaine)
— l'entrée/sortie dans la SAA (plusieurs fois par jour)
— le temps absolu (1/s)
— l'attitude du satellite (1/s)
— la position du satellite (1/s)
— la notification de démarrage/arrêt de ré-orientation du satellite (à chaque déplacement)
— les données de l'instrument GRM (flux continu de paquets)

De son côté, l'UGTS enverra les données suivantes :

— les données photons
— les paramètres technologiques Housekeeping (à chaque demande du FCU)
— les paquets de sursauts VHF (messages d'alerte) (à chaque alerte de sursaut)
— les paquets de données VHF (toutes les 20 s)
— les données d'urgence (à chaque sursaut gamma)

Par ailleurs, les télécommunications entre le satellite et le segment sol se déroulent de façon bidirectionnelle comme suit :

— dans le sens « ascendant » : ce sont les télécommandes (« TC ») de tous types qui sont envoyées à la plate-forme ou à la charge utile. Les TC sont générées et envoyées par le centre de contrôle via une ou plusieurs stations au sol.
— dans le sens « descendant » : ce sont les données de contrôle des télémesures Housekeeping (« TM »), les télémesures Mission de la plate-forme ou des charges utiles,et

les données Science. L'ensemble de ces données est destiné au centre de contrôle du sol ou aux utilisateurs localisés dans les centres de mission.

Les opérations de l'instrument ECLAIRs sont établies pendant des sessions TM/TC, qui sont des périodes pendant lesquelles le satellite est géométriquement visible par une station sol, et qui sont alors choisies pour établir la liaison sol-satellite et effectuer des échanges TC et TM.

Les stations chinoises seront utilisées nominalement en bande S pour envoyer des télécommandes au satellite et pour obtenir une télémétrie de maintenance. Pour charger des scenarii de télécommande urgents, des stations françaises pourront être utilisées aussi en bande S. Les stations françaises et chinoises seront utilisées pour descendre la télémétrie en bande X. Pour les stations en bande S et en bande X, les sessions TM/TC sont planifiées par le segment sol. Un réseau de stations VHF dédié, à couverture étendue, est utilisé pour transmettre des messages VHF.

3.8 Les types de données d'ECLAIRs

Nous venons de voir comment les données scientifiques vont être formatées puis acheminées vers les centres de contrôle dans le but de les analyser. Il convient ainsi, pendant la phase de développement de l'instrument, d'en définir le type et d'évaluer leur volume.

Le taux de comptage de l'instrument ECLAIRs est dominé par les photons du fond diffus cosmologique dans la gamme des rayons X (CXB pour Cosmic X-ray Background), ce qui permet de bien estimer le débit de données. Compte tenu de la stratégie de pointage nominal de SVOM, et de l'occultation par la Terre, on obtient un taux de comptage réduit : ECLAIRs détectera environ 230.10^6 comptages par jour, ce qui donne un débit de données d'environ 10 Gb par jour. En ajoutant les contraintes d'un flux important de particules à l'entrée de la SAA et ce, avant de désactiver l'instrument, et d'une spécification scientifique complémentaire, à savoir de passer quelques orbites pour observer le plan galactique, le débit de données atteint alors un taux de 15 Gb par jour. Comme l'allocation journalière est de 18 Gb, il y a une marge de 20 % par rapport à l'évaluation initiale.

De plus, cette allocation permet d'envoyer au sol tous les comptages enregistrés par l'instrument ECLAIRs, ce qui simplifie grandement le traitement des données à bord. Tous les comptages sont marqués en temps, en énergie, en position et en type (si c'est un événement simple ou un multiple dans une fenêtre temporelle définie) puis stockés dans la mémoire de masse, pour être transmis au sol. Des informations supplémentaires sont également envoyées, comme la direction de pointage du satellite et les données relatives au bon fonctionnement de l'instrument (paramètres « housekeeping ») : tout cela va permettre la reconstruction complète des événements au sol. La liste complète des photons au sol permet également d'exécuter le trigger « Off-line », ce qui est expliqué dans la sous-section 3.5.

3.9 La science d'ECLAIRs

3.9.1 La science des sursauts gamma

Les objectifs scientifiques de SVOM sont détaillés dans le Livre Blanc [Wei et al., 2016], dans lequel sont décrites les multiples possibilités qu'offre ECLAIRs. Grâce à son seuil bas en énergie, il détectera des XRFs avec une bonne sensibilité, ce qui permettra d'étudier la

corrélation entre les sursauts et les supernovae «normales» de type Ic. Toutes ces études vont aider à la compréhension des sursauts en dévoilant les ingrédients clés nécessaires à la production de ces derniers (par exemple, la rotation stellaire, la binarité, la métallicité, etc.).

Les instruments ECLAIRs et GRM, respectivement sensibles aux photons dans les plages d'énergie [4 - 150] keV et [15 - 5000] keV, mesureront le spectre de l'émission prompte sur une large gamme d'énergie, permettant ainsi la détection de diverses composantes spectrales de cette émission prompte [Bernardini et al., 2016]. Avec l'instrument MXT, ECLAIRs va mesurer la transition entre l'émission prompte et l'émission rémanente précoce avec une précision sans précédent, grâce à la gamme d'énergie commune de [4 - 10] keV entre les deux instruments.

Ces objectifs scientifiques exigent d'ECLAIRs d'avoir un seuil de détection aussi bas que possible, pour explorer l'émission prompte et le début de l'émission rémanente en dessous de 15 keV, avec une bonne sensibilité.

3.9.2 La science hors sursauts

Alors que la conception d'ECLAIRs s'est focalisée sur l'étude des sursauts gamma, les performances de cet instrument s'étendent à une science hors sursauts, comme la mesure de l'activité des sources variables connues ou la découverte de nouvelles sources transitoires ou la surveillance du ciel en X durs.

3.9.2.1 La détection des sources transitoires

ECLAIRs, instrument grand champ, est idéal pour la surveillance du ciel en X durs. L'algorithme de déclenchement détectera automatiquement les sources transitoires brillantes, incluant des objets astrophysiques inconnus autres qu'un sursaut gamma (par exemple nouveau SGR, TDE visible en RX,...) et des sources connues non incluses dans le catalogue embarqué, ainsi que des sources connues faisant partie de ce même catalogue, à partir de déclenchements induits par une forte variabilité. Dans ce dernier cas, une alerte sera envoyée au sol, mais le satellite ne se tournera vers la source que si le SNR dépasse le seuil de déclenchement réglé pour cette source.

3.9.2.2 La surveillance du ciel

Les temps longs d'observation de certaines régions du ciel permettront à ECLAIRs de surveiller l'activité des galaxies actives (AGN pour Active Galaxy Nucleus) et des sources galactiques de rayons X durs puis d'effectuer des études statistiques sur l'activité de ces sources. Une observation des blazars sur le long terme pourrait nous aider à détecter des « flares » étendus qui pourraient ensuite être suivis en ondes radio et dans le domaine des très hautes énergies de façon à caractériser les régions émettrices, et aider à déchiffrer les mécanismes d'émission (Fig. 3.24).

La surveillance longue du centre galactique permettra de détecter de nouveaux événements transitoires, de mieux quantifier le cycle des sources de rayons X connues, d'étudier la variabilité de ces sources sur différentes échelles de temps (limites des régions émettrices, etc.), d'améliorer le suivi multi-longueurs d'onde de ces sources avec des instruments sol et spatiaux. La surveillance du rayonnement X durs d'ECLAIRs, pour rechercher des objets variables autres que les sursauts, sera facilitée par l'existence des catalogues fournis par les instruments BAT (sur *SWIFT*) et e-Rosita (sur *Spectrum-RG*).

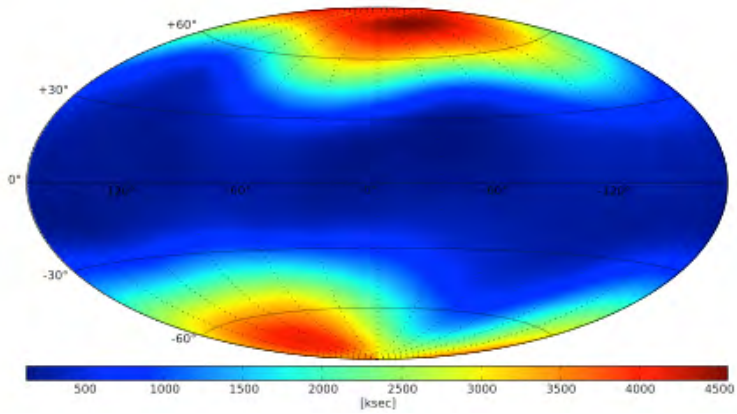


FIGURE 3.24 – Cette carte illustre les temps d'exposition longs vers les pôles galactiques, ce qui permet de surveiller l'activité à long terme des sources de rayons X durs situées dans ces régions (comme les noyaux actifs de galaxies), en se basant sur une annnée d'observation du ciel. Credit SVOM Consortium / Livre Blanc [Wei et al., 2016]

3.10 Conclusion

Comme nous l'avons décrit précédemment, ECLAIRs est l'imageur et le trigger de la mission SVOM. Malgré des ressources limitées en masse et en puissance (~90 kg, ~90 W, un volume de 100 x 100 x 80 cm^3), il permettra de détecter 200 sursauts gamma pendant la durée nominale de la mission prévue pour 3 ans, en mettant l'accent sur la localisation des sursauts mous. Il permettra aussi la détection d'un grand nombre de sources transitoires de rayons X durs de types différents.

L'atout majeur de l'instrument ECLAIRs sera d'assurer un suivi rapide des sources transitoires qu'il aura découvertes, à la fois dans l'espace et depuis le sol. Plus de la moitié des sursauts d'ECLAIRs pourraient ainsi avoir leur redshift mesuré à l'aide des grands télescopes au sol.

Chapitre 4

Développement du module XRDPIX

Ce nouveau chapitre est consacré à la présentation de mes travaux, qui ont débuté avec la conception des modules XRDPIX, et le suivi de leur réalisation, depuis la phase de prototypage jusqu'aux phases série. Tout au long du développement, j'ai caractérisé un à un ces modules hybrides de détection, en gérant les nombreuses campagnes de tests, avec la mise en œuvre des bancs d'essais, la gestion des activités de tests et le management des équipes d'ingénierie. J'ai complété ces travaux avec des modélisations contribuant à la validation des performances des XRDPIX, et terminé la phase de développement par l'analyse d'une large quantité de mesures spectrales, permettant la sélection des modules pour la caméra de vol (chapitre 5).

Pour atteindre les objectifs scientifiques de la mission SVOM, et obtenir un seuil bas de détection en énergie de 4 keV uniformément sur toute la caméra ECLAIRs, il nous a fallu relever un défi technique ambitieux ! En effet, la performance typique obtenue à ce jour, avec ce type de détecteurs, est un seuil bas proche de 15 keV, grâce aux instruments BAT/*SWIFT* et ISGRI/*INTEGRAL*.

Le plan de détection de l'instrument ECLAIRs est équipé de 6400 détecteurs semi-conducteurs en Tellure de Cadmium. Comme présenté au chapitre 2, les détecteurs sont assemblés par groupes de 32 sur un module hybride appelé XRDPIX. Le plan de détection DPIX en comptera 200, regroupés par 25 (soit 800 détecteurs) pour former 8 secteurs, ayant chacun des électroniques de lecture similaires, mais indépendantes.

Nous allons consacrer ce chapitre au module hybride XRDPIX (Fig. 4.1), brique de base du plan de détection ECLAIRs qui devra réaliser la performance de détecter des photons d'énergie aussi basse que 4 keV. Nous allons débuter par une description de ce module, et poursuivre avec l'explication de son fonctionnement. Tout au long de ce chapitre nous utiliserons indifféremment les termes « modules XRDPIX » ou « XRDPIX » pour désigner le composant de base du plan de détection de l'instrument ECLAIRs. Pour alléger la lecture du manuscrit, il sera développé, dans deux chapitres distincts, la description du module XRDPIX (ce chapitre) et les performances de ce module (le chapitre suivant 5), avec la présentation des résultats des nombreux essais effectués sur ces détecteurs.

Le module XRDPIX est un hybride innovant : il associe des technologies inédites à un type de détecteurs que nous avons choisi spécifiquement pour le projet : un semi-conducteur de tellurure de cadmium (CdTe). Cette technologie semi-conductrice possède d'excellentes caractéristiques pour la détection des photons gamma : le matériau est dense et ses composés

ont un numéro atomique élevé (Z_{Cd} = 48 / Z_{Te} = 52). De plus, avec une forte résistivité, il peut fonctionner à température ambiante, même si nous avons préféré le placer à basse température pour limiter le bruit des détecteurs lié à l'agitation thermique et optimiser ainsi ses performances.

Son utilisation est opportune pour une application spatiale, d'autant qu'il permet un fonctionnement à basse énergie. Pourtant, le choix du CdTe pour l'instrument ECLAIRs montre quelques effets négatifs, comme l'élargissement de certains pics pouvant être dû à la collection incomplète des porteurs de charge, mais il reste un très bon candidat pour la gamme d'énergie [4 - 150] keV. Ainsi, il offre de bonnes qualités spectroscopiques, situées entre celles d'un scintillateur et d'un germanium. Nous mesurerons ainsi des résolutions autour de 7 % à 13,9 keV (énergie d'une raie basse énergie de décroissance de l'américium 241), soit inférieures à 1 keV.

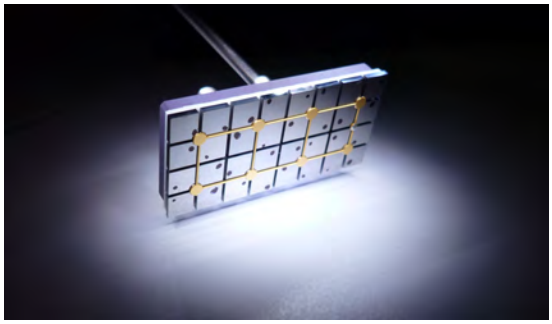


FIGURE 4.1 – Photo d'un module XRDPIX en version modèle de vol.

Chaque XRDPIX est composé de deux sous-ensembles utilisant des substrats de technologies différentes : une « Céramique Détecteurs » et une « Céramique ASIC », que j'ai étudiées séparément, et qui sont décrites en détail dans les sections suivantes.

4.1 Description du détecteur hybride de la caméra ECLAIRs

Pourquoi un hybride ?

Plusieurs arguments vont nous permettre de répondre à cette question.

Tout d'abord, nous parlons de composant hybride du fait du mélange des matériaux le constituant et de la multiplicité des différents processus servant à son développement. La réalisation d'un hybride se base sur la capacité des ingénieurs à affronter les incompatibilités technologiques par l'acceptation de compromis de toutes sortes. D'un point de vue étymologique, « hybride » vient du latin *hibrida* qui signifie « bâtard » ou « sang mêlé » ; au delà du caractère indélicat de ces mots, un hybride désigne par extension ce qui provient de deux (ou plus) espèces différentes.

Cet élément multi-technologies a été conçu dans le but principal d'obtenir des performances uniques en sensibilité aux basses énergies ; en effet, la réalisation d'un hybride permet de réduire le bruit global généré par les différents postes de détection, et atteindre ainsi un seuil bas en énergie inférieur à 4 keV (discussion des différentes sources de bruit dans la section 5.2.1).

Pour ce faire, nous sommes allés chercher les substrats les moins capacitifs (des céramiques HTCC et Couche épaisse, décrites dans les sections 4.2.2), une électronique de lecture intégrée

faible bruit, communément appelée électronique « front-end » (puce ASIC décrite dans la section 4.2.4) et les détecteurs les moins bruyants parmi plus de 14000 cristaux CdTe testés (section 4.2.1).

Ensuite, les contraintes liées à la mission spatiale nous ont amenés à intégrer une électronique à faible consommation, avec des détecteurs semi-conducteurs spéciaux, un circuit haute tension (HT) dédié et des substrats faiblement dissipatifs, dont nous avons dû vérifier la compatibilité mécanique et thermique.

Enfin, nous avons gardé une grande flexibilité dans l'assemblage, le développement et la caractérisation de l'hybride XRDPIX, grâce à sa modularité, en choisissant de le développer en deux sous-éléments, la Céramique Détecteurs et la Céramique ASIC, décrites dans les sections suivantes. Soulignons que, malgré le riche passé des autres missions comme *INTEGRAL*, nous sommes partis dans l'inconnu avec cet hybride, de part la mixité des technologies et l'originalité des procédés mis en œuvre.

La Céramique Détecteurs comprend 32 détecteurs CdTe Schottky, fabriqués au Japon par la société ACRORAD, collés sur une céramique de type couche épaisse et polarisés jusqu'à -450 V grâce à une grille conductrice amenant la haute tension. Cette Céramique Détecteurs est ensuite contrecollée à une Céramique ASIC sur laquelle est hybridée une puce ASIC (IDEF-X Version 2), développée par le CEA (Irfu à Saclay), et encapsulée dans une cavité hermétique avec des composants passifs de filtrage (figure 4.7). Les connexions extérieures à ce module sont réalisées au travers de plages métallisées destinées à recevoir des connecteurs à pointes permettant l'interface avec le reste de l'électronique.

Le choix des composants du module XRDPIX s'appuie sur les avantages suivants : la miniaturisation et le multiplexage de l'électronique grâce à un ASIC, la grande sensibilité à basse énergie du CdTe, les faibles capacités et la stabilité thermique des céramiques. De façon à connaître et maîtriser au mieux le module final XRDPIX, j'ai au préalable analysé les performances des Céramiques Détecteurs et des Céramiques ASIC séparément, pour ensuite identifier les bruits prédominants et optimiser ainsi l'homogénéité des 32 voies lors de leur couplage.

4.2 Caractéristiques physiques et techniques des composants de l'hybride

Dans cette section, nous allons décrire l'ensemble des caractéristiques physiques et technologiques des modules de détection XRDPIX, répondant aux exigences exprimées dans la Spécification Technique de Besoin du projet ECLAIRs [Mandrou et al. (2018)].

4.2.1 Les détecteurs CdTe Schottky

Les détecteurs semi-conducteurs CdTe Schottky permettent la détection des photons selon les étapes suivantes : conversion de l'énergie des photons par absorption photoélectrique, production de paires électron-trou, puis collection et mesure des porteurs de charge. Un photon rencontrant de la matière est susceptible de céder son énergie par effet photoélectrique : ce dernier arrache un électron fortement lié à l'atome, qui va ioniser progressivement le matériau (figure 4.5 et section 2.2). Dans le matériau CdTe, l'ionisation se traduit par une génération de paires électrons-trous dont le nombre est proportionnel à l'énergie déposée par le photon initial (en moyenne, ≈ 2200 paires électrons/trous sont créées pour un photon autour de 10

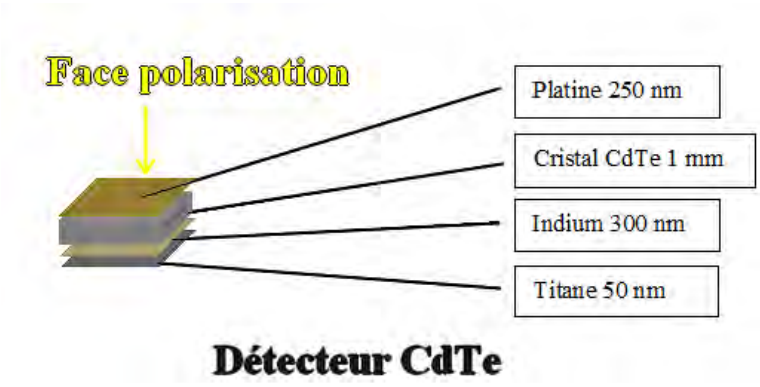


FIGURE 4.2 – Schéma d'un détecteur montrant les matériaux le constituant : un semiconducteur en tellurure de cadmium, des électrodes en platine et indium, une couche très fine de titane.

keV). Sous l'effet du champ électrique appliqué aux électrodes (Pt et In/Ti), les porteurs libres sont séparés et migrent vers les électrodes, induisant un courant mesurable qui est intégré dans le préamplificateur de charges de l'ASIC. La figure 4.2 montre une vue éclatée d'un détecteur CdTe Schottky sélectionné pour l'instrument ECLAIRs. .

L'électrode, qui joue le rôle de cathode, est composée d'une face métallisée de platine ($\approx$ 250 nm), et constitue le contact ohmique sur lequel est amenée la polarisation négative. Elle présente une diffusion du platine dans le semi-conducteur, plus ou moins profonde, qui donne un aspect plus ou moins uniforme de la couche (comme observé Fig.4.3).

L'anode, électrode composée d'indium ($\approx$ 300 nm), et recouverte d'une couche protectrice de titane ($\approx$ 50 nm), constitue le contact Schottky de la diode, et correspond à la sortie du signal (Fig. 4.4). La métallisation présente des zones avec des petites tailles de grain, et des zones où les grains sont plus gros et se déchaussent légèrement (révélation des joints de grain). La couche d'indium est utilisée pour obtenir un contact Schottky réduisant ainsi le courant de fuite et favorisant la résolution en énergie, lorsque la diode ainsi fermée est polarisée en inverse. Le contact platine est fabriqué par dépôt chimique tandis que l'indium et le titane sont fabriqués sous vide en phase vapeur (Fig.4.2).

Dans notre cas, la faible largeur de la bande interdite permet à des électrons de la bande de valence de rejoindre facilement la bande de conduction, contrairement à d'autres types de détecteurs comme les scintillateurs. Cette différence conduit à une meilleure résolution en énergie. Par ailleurs, comme dit précédemment, le CdTe est efficace pour la détection des photons X et gamma, avec des numéros atomiques de ses éléments élevés, favorisant l'effet photoélectrique comme mode d'interaction des photons gamma. De plus, sa densité est élevée (5,85 g/cm^3), si bien que son pouvoir d'arrêt est important. Enfin, son gap de 1,46 eV (valeur typique à 300K) et son utilisation en semi-conducteur quasi-intrinsèque lui donne une résistivité élevée, permettant sa mise en œuvre plus facile.

Par ailleurs, plusieurs choix technologiques et environnementaux ont été faits, pour diminuer sensiblement le courant de fuite : un détecteur de type Schottky plutôt qu'un détecteur ohmique, des dimensions adaptées aux énergies étudiées (faible épaisseur de 1 mm), un refroidissement du détecteur à $-20°$C.

La figure 4.5 (graphe de droite) montre le principe de fonctionnement du détecteur CdTe d'un XRDPIX.

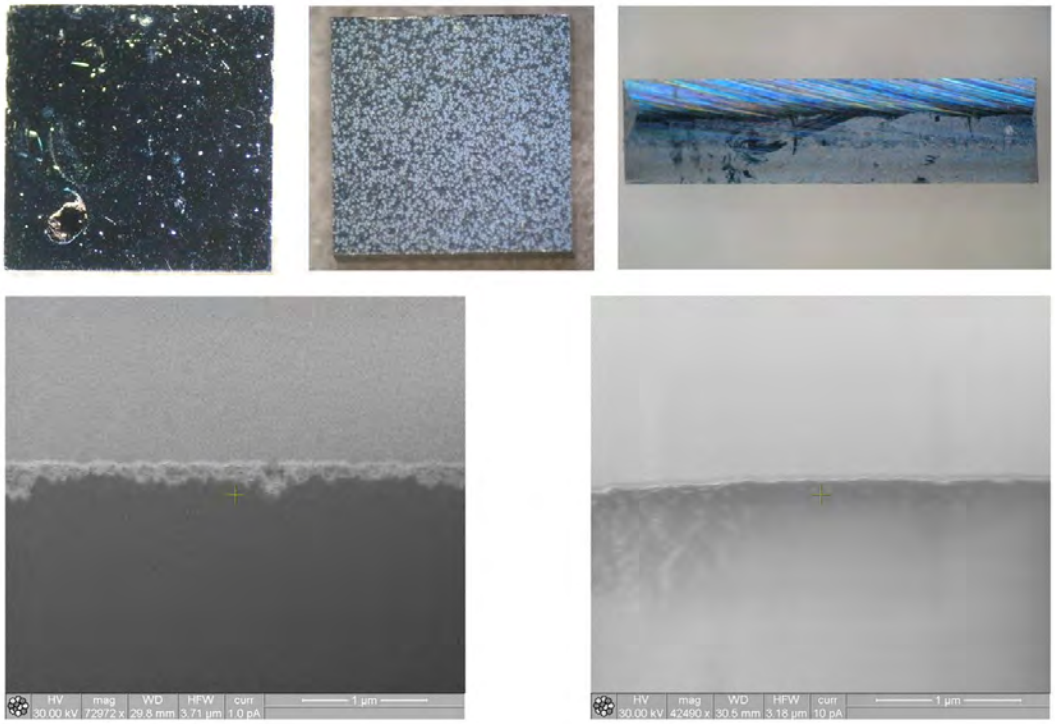


FIGURE 4.3 – Haut : Vue du CdTe sous binoculaire - Gauche : face Platine correspondant à la cathode (Une tâche d'encre noire permet de la différencier de l'autre face.) / Centre : face Indium correspondant à l'anode (sortie du signal détecteur) / Droite : Tranche du CdTe - Bas : Imagerie FIB - Gauche : diffusion du contact ohmique (platine) dans le cristal de CdTe / Droite : Zoom sur l'anode : fine épaisseur de titane et flash d'indium (plus blanc car plus émissif).

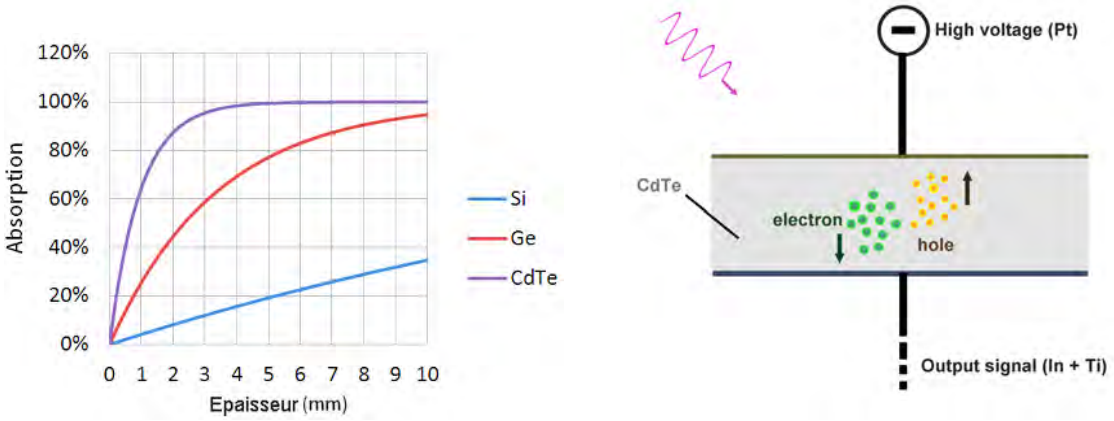


FIGURE 4.5 – Graphe de gauche : Courbes d'absorption à 100 keV en fonction de l'épaisseur du matériau semiconducteur - Silicium, Germanium et Tellure de Cadmium - Credit ACRORAD / Graphe de droite : Principe de fonctionnement d'un détecteur CdTe Schottky utilisé sur ECLAIRs.

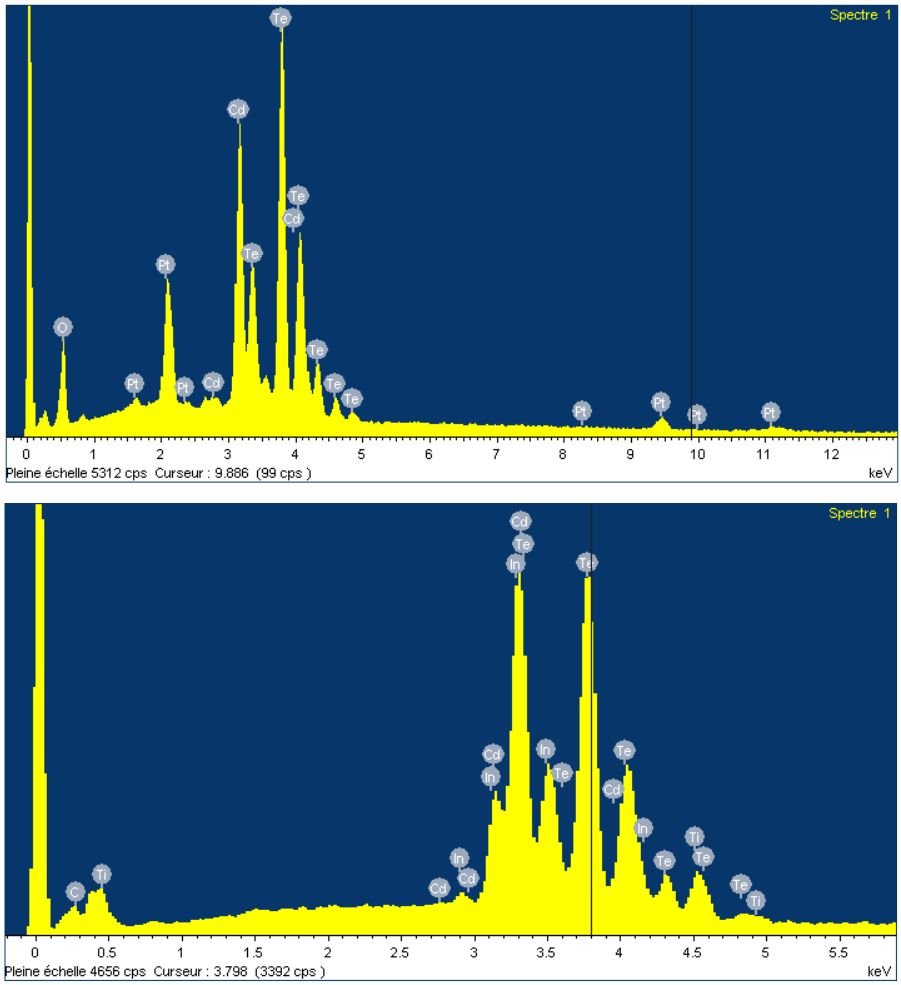


FIGURE 4.4 – Analyse par EDX (« Energy Dispersive X-ray Spectroscopy », technique permettant la détermination de la composition chimique de la surface examinée, par analyse spectrale de rayons X) des matériaux constituant un détecteur CdTe utilisé pour ECLAIRs - Haut : analyse EDX face Platine sur CdTe / Bas : analyse EDX face Titane et Indium (par exemple, nous pouvons voir les pics caractéristiques, ici majoritaires, de Cadmium (Cd) et de Tellure (Te) autour de 3 et 4 keV).

4.2.2 Les substrats

Avant de débuter la réalisation de prototypes d'une Céramique Détecteurs et d'une Céramique ASIC, et bien avant celle d'un XRDPIX, j'ai mené une phase de « Trade-Off » technologique (*compromis*), qui consiste en l'étude de différentes solutions de substrats. En effet, ils jouent un rôle crucial sur la performance finale de l'hybride détecteur, car les effets capacitifs qu'ils vont engendrer sont un des paramètres importants qui va orienter notre choix définitif.

C'est la raison pour laquelle j'ai commencé par comparer quatre types de substrats en céramique, en étudiant les caractéristiques électriques et technologiques des céramiques CE, HTCC, LTCC et DBC (respectivement « Couche épaisse ou Thick-film Ceramics », « High

Temperature Co-fired Ceramic », « Low Temperature Co-fired Ceramic » et « Direct Bonded Copper »). Après avoir estimé par calcul les plus capacitives, et écarté alors les deux dernières, j'ai étudié de façon plus approfondie les technologies CE et HTCC, en mesurant les capacités, de très faibles valeurs, sur les premiers designs de céramiques (pré-implantations de circuit).

Dans un premier temps, j'ai sélectionné la céramique Couche Épaisse comme substrat pour les détecteurs, après avoir mesuré ses capacités et les avoir évaluées légèrement plus faibles que celles de la HTCC. Par ailleurs, avec un routage moins complexe que pour la céramique devant recueillir la puce ASIC, la céramique CE portant les détecteurs a montré des avantages de faisabilité technologique.

Dans un second temps, j'ai choisi le type de substrat servant de support à l'ASIC et ses composants passifs. Nous aurions pu rester avec la même technologie mais, après avoir mesuré les capacités de chaque type de céramique nue sur un design identique, puis le bruit sur des céramiques comprenant une puce ASIC connectée par des fils de « bonding », la HTCC est apparue comme la meilleure céramique en termes de bruit capacitif. C'est ainsi que les résultats des essais ont montré que la CE, dans le cas d'un design pour la Céramique ASIC, était plus capacitive de 1 pF en moyenne. De plus, la céramique ASIC de type CE a montré un bruit plus élevé (en moyenne, 20 e- RMS en plus) que la céramique ASIC de type HTCC, au peaking time de 9,6 µs.

En tenant compte des aspects coûts, des risques technologiques (pour ce qui est du report et de la qualification du cadre, la céramique CE présente un risque supplémentaire par rapport à la céramique HTCC pour laquelle le procédé de brasage est plus connu et donc mieux maîtrisé), et de la complexité technique (le routage de la céramique CE est plus difficile à réaliser car il n'est pas possible de faire des vias traversants), j'ai finalement décidé d'utiliser une céramique dédiée pour chacune des fonctions de l'hybride, ajoutant une technologie supplémentaire aux autres déjà multiples !

Ces deux technologies se différencient essentiellement par leur processus de fabrication ; ainsi, la couche épaisse consiste à appliquer sur le substrat une pâte ou une encre, après avoir masqué les zones du substrat ne devant pas recevoir ce dépôt. Une étape de cuisson à haute température (900°C) fixe l'encre et doit être réalisée après chaque dépôt de couche. On peut donc de cette manière déposer successivement des matériaux conducteurs, diélectriques ou isolants.

Pour ce qui est de la HTCC, elle permet l'association de fonctions diverses (filtrage, amplification...) sur une surface planaire faite de plusieurs couches (céramique, polymide,teflon..) dans lesquelles les motifs conducteurs et les éléments passifs sont déposés par divers procédés (couche mince, sérigraphie). Cette technique va allier différentes technologies de type uniplanaire qui, disposées sur plusieurs niveaux, peuvent être connectées par trous métallisés ou peuvent être couplées par champs électromagnétiques. Une seule cuisson est nécessaire pour toutes les couches, ce qui permet un meilleur contrôle de la céramique finale.

Pour autant, il y a des avantages communs à l'utilisation de ces deux types de céramiques : l'assemblage de composants est possible avec différentes techniques de fabrication, les substrats utilisés sont des isolants à faible perte qui évacuent bien la puissance dissipée, les résistances imprimées peuvent être réglées avec précision sur la valeur souhaitée. Par ailleurs, les mesures que j'ai réalisées sur des prototypes, ont confirmé que l'implantation de la HTCC avait les plus faibles capacités sur les 32 entrées de la puce ASIC, avec un substrat en couche épaisse plus capacitif de 1 pF en moyenne.

En définitive, la technologie couche épaisse, utilisée comme substrat détecteurs, a montré une moyenne des 32 capacités par rapport au plan de masse d'environ 0,4 pF ; la technologie

HTCC utilisée comme substrat pour la partie électronique front-end (« Céramique ASIC ») a des capacités allant de 0,4 pF pour la voie la moins bruyante à 1,3 pF pour la voie la plus bruyante, à la fréquence de 100 kHz et hors capacités inter-pistes (allant de 0,3 à 1 pF selon la piste). Au final, la capacité moyenne équivalente d'un XRDPIX vaut 2 pF avec un écart-type sur 32 voies de 0,4 (tableau 4.6).

	Mesures par rapport à la masse [x32 capacités] (pF)				**Mesures inter-pistes impaires [x8 capacités] (pF)**	**tan δ**	**tan δ**
Type de susbtrats	**Substrat Céramique ASIC HTCC**	**2 substrats contre-collés Céramique Détecteurs / ASIC HTCC**	**Substrat Céramique ASIC CE**	**2 substrats contre-collés Céramique Détecteurs / ASIC CE**	**2 substrats contre-collés Céramique Détecteurs / ASIC HTCC**	**2 substrats contre-collés Céramique Détecteurs / ASIC HTCC**	**2 substrats contre-collés Céramique Détecteurs / ASIC CE**
Valeur maximale	1,3	1,75	2,8	3,25	0,98		
Valeur minimale	0,4	0,65	0,86	1,24	0,32		
Moyenne	0,89	1,24	1,91	2,34	0,54	$2{,}2.10^{-3}$	$4{,}2.\ 10^{-3}$
Ecart-type	0,25	0,31	0,58	0,6			

FIGURE 4.6 – Synthèse des mesures de capacités effectuées sur différents types de substrats céramique (couche épaisse CE et cofrittée HTCC), avec l'exemple de mesures par rapport à la masse, de mesures inter-pistes et de calcul de l'angle de perte. Nous pouvons constater que la capacité maximale de la céramique HTCC contre-collée est de 1,75 pF et de 3,25 pF pour la céramique Couche épaisse contre-collée (toutes deux sont contre-collées à des céramiques CE pour les détecteurs). Pour ce qui est de la moyenne des 32 valeurs de capacités par rapport à la masse, la HTCC évolue autour de 1,24 ±0,31 pF tandis que la CE se trouve à 2,34 ±0,60 pF, soit approximativement le double, et traduisant une plus grande homogénéité pour le substrat HTCC ; dans les deux cas, l'angle de perte est très faible ce qui garantit de faibles pertes diélectriques.

4.2.3 La Céramique Détecteurs

La Céramique Détecteurs correspond au premier sous-ensemble qui formera le module hybride XRDPIX. Son rôle est majeur : c'est l'œil de la caméra, le lieu où les interactions physiques se créent, le détecteur du rayonnement gamma.

Nous l'avons nommée ainsi car elle est composée d'une grille en Kovar (alliage de Fer, Nickel et Cobalt qui présente un faible coefficient de dilatation thermique), montée sur les 32 détecteurs CdTe au moyen d'une colle conductrice époxy chargée Argent (de résistivité électrique 4.10^{-4} Ω cm). Les détecteurs CdTe sont collés sur une céramique de type couche épaisse d'épaisseur 1 mm (de dimensions 50,5 x 32,5 mm^2) et composée de 96 % d'alumine. Les détecteurs CdTe Schottky ont pour dimensions 4 x 4 mm^2 (+0/−0,05 mm) sur 1 mm d'épaisseur (−0/+0,05 mm). La face de polarisation est en platine et la face de sortie signal est couverte d'indium et environ 50 nm de titane. Un fil en aluminium conduit la haute tension depuis la « Céramique ASIC » jusqu'à la grille, faite de huit pastilles circulaires reliées entre elles par des segments équidistants (figure 4.7). Les performances des Céramiques Détecteurs, en termes de courant de fuite par exemple, sont discutées dans la section 5.2.2 du chapitre suivant.

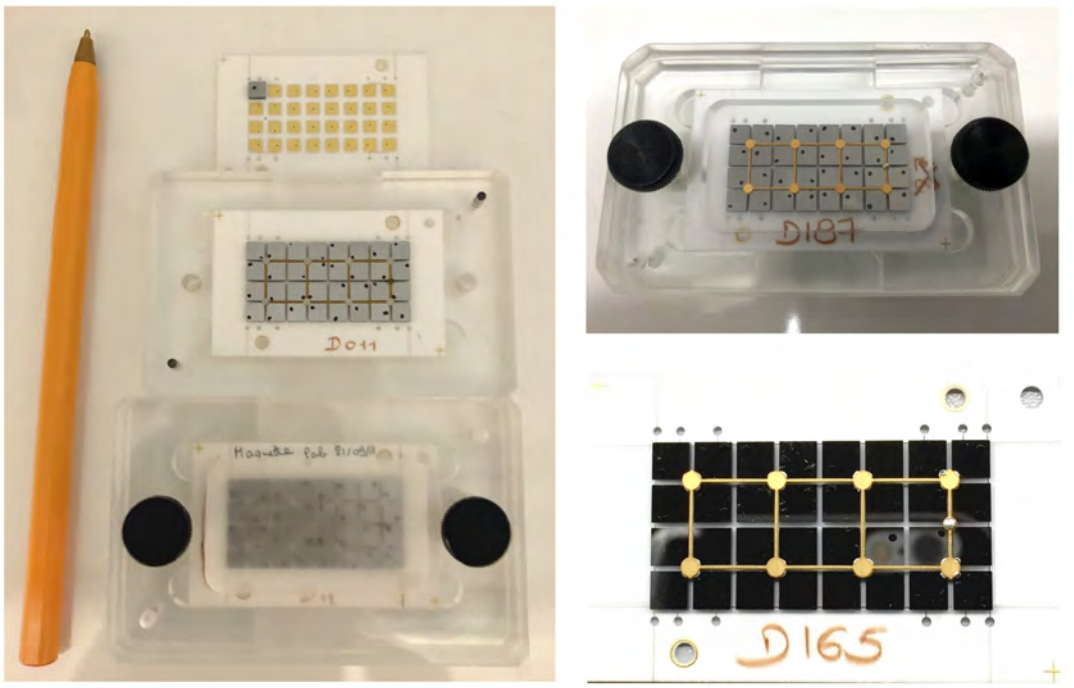


FIGURE 4.7 – Images de différentes Céramiques Détecteurs avec trottoirs, soit avant leur contre-collage avec une Céramique ASIC - Ces photos mettent en évidence la grille de polarisation en Kovar (initialement en Constantan) amenant la haute tension : elle comprend 8 pastilles reliées les unes aux autres, chacune polarisant quatre détecteurs CdTe, et un plot étamé (positionnée sur la droite) faisant le lien avec l'autre céramique (Céramique ASIC) par un fil traversant. Credit IRAP

4.2.4 La Céramique ASIC

Dans cette section, nous allons décrire le sous-ensemble que nous avons communément appelé « Céramique ASIC » et qui fait office d'électronique front-end, au plus proche des détecteurs. Tout d'abord, la Céramique ASIC est constituée d'un composant central, une puce ASIC (circuit intégré particulier, propre à une application), appelé « Idef-X », formé d'un étage de pré-amplification, de filtrage, d'un discriminateur de seuil, d'un multiplexage des canaux [Delagnes et al., 2010] [Gevin et al., 2012].

La figure 4.8 montre l'architecture électrique simplifiée de cet ASIC conçu par le CEA (Irfu, Centre d'étude de Saclay).

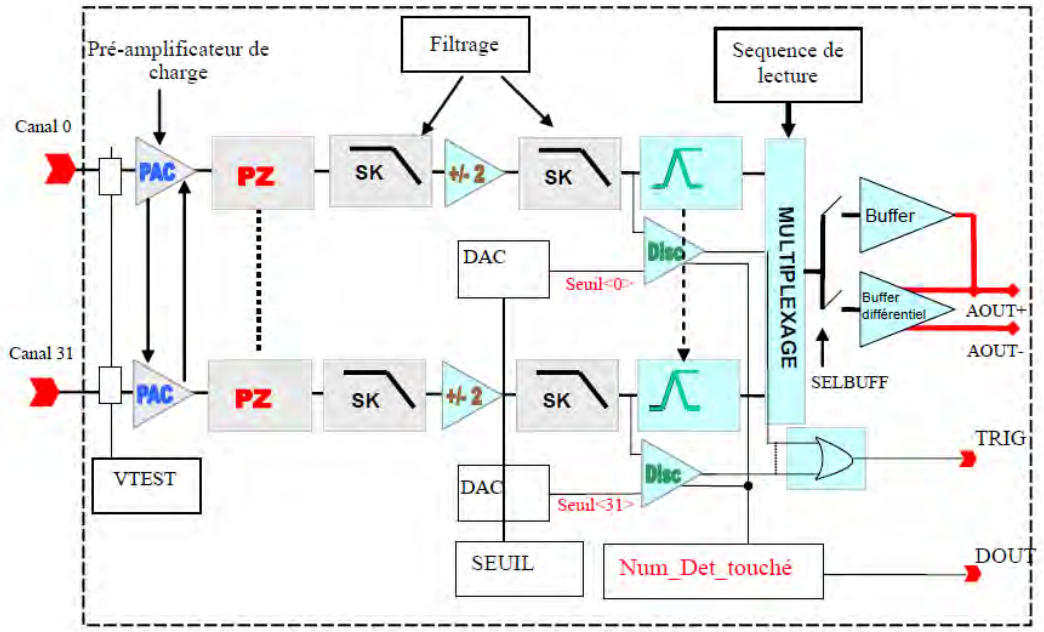


FIGURE 4.8 – Architecture électrique de la puce ASIC Idef-X. Credit CEA

L'ASIC est un microcircuit monolithique en technologie silicium, qui a été conçu dans la norme AMS CMOS 0,35 µm avec une couche épitaxiale de 14 µm. La puce mesure 6,41 mm x 2,83 mm avec une épaisseur de 0,52 mm. Elle est constituée de 32 canaux pour traiter des détecteurs faiblement capacitifs ayant un faible courant de fuite.

Chaque canal de l'ASIC (que nous appelons aussi « voie » pour un module XRDPIX) est connecté à l'anode d'un détecteur CdTe ; il comprend un préamplificateur de charge à couplage et reset continu, un étage de compensation pole-zéro, un circuit de mise en forme (ou « shaper ») constitué de deux filtres de type Sallen & Key, un amplificateur inverseur/non inverseur de mise en forme du signal, un détecteur de pic et un discriminateur.

Chaque voie mémorise le maximum de la charge d'entrée et le discriminateur détecte les charges supérieures à un seuil programmable. Dès qu'une voie a franchi ce seuil, la lecture séquentielle débute. Il est possible de programmer la valeur numérique du « peaking time » de l'étage de mise en forme du signal (shaper) parmi huit valeurs possibles, ainsi que le seuil de discrimination, appelé aussi « seuil numérique », et ce pour chaque canal. Le peaking time du signal en sortie de filtre est le temps mis par le signal pour passer de 5 % de son sommet à son sommet : c'est un temps de filtrage qui nous permet d'optimiser la charge équivalente de bruit du circuit connecté à un détecteur.

Tout comme le peaking time, le seuil numérique est un registre important de l'ASIC. Nous pouvons choisir de le régler à la même valeur pour toutes les voies d'un même XRDPIX, voire d'un secteur entier (soit 800 détecteurs), comme nous pouvons le régler individuellement pour chacune des voies, à partir de ce que nous appelons une table des seuils, élaborée, entre autres, lors des tests de calibration des détecteurs. Nous avons coutume de le noter « SBN » (pour Seuil Bas Numérique) suivi de la valeur numérique programmée, typiquement 8, (qui laisse apparaître le pic de bruit), 12 (correspondant à un seuil en énergie bas), 16 (valeur proche du seuil bas en énergie de 4 keV), 30 (qui nous sert à réaliser la calibration) et 63 si nous souhaitons désactiver la voie. C'est un paramètre clé pour permettre d'ajuster au mieux le

seuil bas en énergie (tableau 5.3).

L'ASIC Idef-X a une dynamique allant jusqu'à 50 ke- avec un gain typique de 200 mV/fC, qui varie en fonction du peaking time comme nous le verrons par la suite, au travers des mesures. La puce ASIC est entourée de composants passifs dont trois condensateurs, en technologie céramique, et cinq résistances à couche mince. Elle est collée sur un substrat céramique de type HTCC (comprenant 90 % d'alumine) de dimensions 34,5 x 16,5 mm^2 et d'épaisseur 2,22 mm. La sérigraphie des couches externes est réalisée avec une finition Nickel/Or et le cadre encapsulant la puce, tout comme la grille des détecteurs, est en Kovar, avec une fermeture à la molette. Pour fermer le cadre, un capot (dans le même matériau) est usiné et muni de deux fûts pour fixer mécaniquement l'hybride XRDPIX sur le plateau froid de la caméra (Fig. 4.9).

FIGURE 4.9 – Image d'une Céramique ASIC .

4.2.5 Le module XRDPIX

Dans cette section, nous allons décrire le module XRDPIX, puis l'ensemble des étapes de son développement, pour finir sur les essais de validation et de qualification qui jalonnent les phases de sa fabrication.

Après avoir testé et validé chaque Céramique ASIC et chaque Céramique Détecteurs, nous les contre-collons une à une pour obtenir le module final. Les dimensions d'un XRDPIX sont 35,5 x 17,5 x 8,87 mm^3 (longueur x largeur x épaisseur), avec une masse de 14 g ± 0,5 (Fig. 4.1). Après des essais de qualification exhaustifs et de validation technologique, le module XRDPIX atteint un niveau TRL (Technology Readiness Level) de 8.

Après des essais spécifiques effectués indépendamment sur la Céramique Détecteurs et sur la Céramique ASIC, le module complet a passé des essais de qualification spécifiques. A titre d'exemple, les pièces Céramiques Détecteurs ont subi des tests de stockage de 1000 h à +40°C. Lors de la séquence de sélection, la totalité des pièces Céramiques ASIC a subi des chocs mécaniques à la valeur de 1500 g, ainsi que des tests de « burn-in » (*déverminage*) à la température de +125°C pendant 240 h, qui consiste à chauffer les composants afin d'en éliminer les défauts de jeunesse, ou de déterminer les plages de fonctionnement dans les spécifications extrêmes du sous-système.

En ce qui concerne les modules XRDPIX, ils ont passé des essais de cyclages thermiques (dix cycles dans la gamme de température [−45/+40°C]), ont subi des chocs mécaniques (cinq chocs à 1500 g), ont enduré des tests d'irradiation (avec par exemple, des essais sur le faisceau de l'accélérateur de particules « Tandem » avec un flux de protons d'environ 20 MeV et de particules alphas de 30 MeV, pour étudier le comportement de la chaîne électronique, dont le codage de l'énergie des photons et la gestion des saturantes, lorsqu'un module XRDPIX

est irradié de particules chargées, simulant ainsi l'environnement radiatif que rencontrera le satellite SVOM incliné à ~30° et positionné dans une orbite basse).

A ces tests de qualification s'ajoutent des tests complémentaires, répondant aux exigences techniques du projet, comme l'étude du comportement des XRDPIX dans des conditions non nominales : à plus basse température, après des vibrations très élevées, pendant des durées de polarisation longues, avec des couches thermiques différentes, avec un flux lumineux variable, etc.

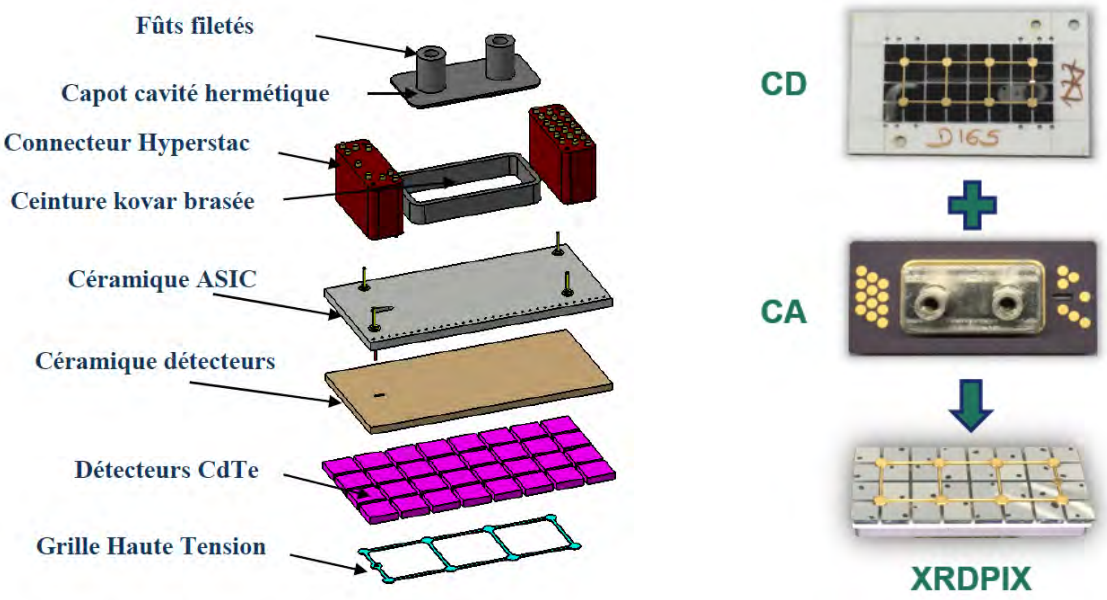


FIGURE 4.10 – Gauche : Vue éclatée d'un module XRDPIX / Droite : Séquence de développement d'un XRDPIX.

La réalisation de l'hybride a suivi un séquencement particulier : après chaque étape de montage (détecteurs seuls, céramiques nues, détecteurs sur céramique, ASIC sur céramique, Céramique Détecteurs sur Céramique ASIC et finalement XRDPIX complet), des tests de validation, en fonctionnement et en performance, ont été menés sur la quasi-totalité des voies [Lacombe et al., 2013].

Ces activités d'hybridation ont démarré avec ce que nous appelons dans notre jargon, un « Trade-Off » technologique (dans notre cas c'est un compromis entre plusieurs techniques, plusieurs technologies et plusieurs matériaux) : comme expliqué plus en amont, j'ai débuté une étude spécifique sur les différentes options de substrats : CE, LTCC, HTCC, DBC, en réalisant pour chacun d'eux une implantation dédiée, et en évaluant par calcul puis par mesure, les capacités parasites de ces céramiques (section 4.2.2). La conclusion de cette étude m'a amenée à choisir non pas une, mais deux technologies de substrats différentes, la couche épaisse pour la Céramique Détecteurs et la HTCC pour la Céramique ASIC, rendant le module XRDPIX encore plus hybride et unique ! De la même manière, j'ai décidé de travailler sur deux lignes de développement en parallèle, celle de la Céramique Détecteurs et celle de la Céramique ASIC, chacune étant définie selon un cahier des charges propre.

S'agissant des Céramiques Détecteurs, une fois le choix de la technologie couche épaisse effectué, une activité de validation des procédés de collage a été lancée : d'une part, le pro-

cessus de collage des détecteurs sur la céramique CE (avec par exemple l'étude du temps de polymérisation de la colle) et d'autre part, le procédé de collage de la grille de polarisation sur les 32 détecteurs (apprentissage du collage par dépôt manuel et définition des outillages de collage). De plus, des tests mécaniques d'arrachement des céramiques contrecollées permettant la validation du contre-collage de ces deux céramiques de technologies différentes, ont été menés et validés.

Quelques détails de l'histoire 'XRDPIX' à ses débuts

Pour parvenir à l'exigence scientifique du seuil bas à 4 keV, et montrer toute la difficulté de ce challenge technique, je vais revenir quelques années en arrière pour détailler la description des premières activités précédemment évoquées.

Tout a commencé en 2007 par une étude R&T sur les détecteurs CdTe, aboutissant à l'écriture d'un cahier des charges définissant l'hybride XRDPIX, et servant de base à la contractualisation des travaux de mise en production d'un module hybride de détection X/Gamma par la société SAFRAN (à l'époque SAGEM), recommandée par le CNES. Un premier trade-off technologique a convergé vers la mise en place d'un développement du module destiné à être industrialisé, en débutant une phase de préparation du passage en mode 'Projet' avec, par exemple, la caractérisation approfondie d'un premier lot de détecteurs, soit 500 détecteurs CdTe ACRORAD, obtenue grâce à la mise en place d'un banc de test spécifique pour la mesure des courants de fuite allant jusqu'à la précision du pA, l'installation d'une enceinte thermique, le développement d'outillages mécaniques « sur-mesure » et d'électroniques très faibles bruits. S'est ensuivie une campagne de tests intensive, de près de 13000 détecteurs CdTe unitaires !

Dans le même temps, un contrat IRAP – SAFRAN a vu le jour, avec la constitution d'un marché négocié, comprenant une tranche ferme et des tranches conditionnelles, nécessaires à l'évolution incertaine du projet, ponctué de possibles aleas comme beaucoup de projets spatiaux.

Après l'étude des substrats, la conception des différentes pré-implantations, le calcul des capacités parasites, l'identification des technologies à valider, la prise en compte du coût, des risques technologiques et du planning, j'ai entrepris la phase suivante : l'étude et la fabrication des pré-prototypes de céramiques XRDPIX. Plusieurs technologies (Couche Epaisse - CE et Cofrittée - HTCC) ont été caractérisées pour parvenir à la conclusion que, la CE pour la Céramique ASIC, était finalement plus capacitive de 1 pF en moyenne, et que nous allions ainsi concevoir un substrat hybride !

Après avoir sélectionné les technologies, et rédigé les spécifications techniques des besoins XRDPIX, j'ai lancé la réalisation de 10 prototypes, et en parallèle, conçu le premier banc d'essais XRDPIX.

Les activités d'hybridation du côté du sous-traitant ont commencé par s'intensifier, ce que nous avons pu constater à l'IRAP avec :

- les livraisons des premières céramiques et des outillages de production par le sous-traitant,
- les réunions de suivi de fabrication des prototypes XRDPIX,
- les fournitures des composants tels que les grilles Haute Tension, les wafers de puces ASIC, etc...dont avait besoin SAFRAN

Les tests des prototypes « Céramiques Détecteurs » et des prototypes « Céramiques ASIC » ont suivi, avec notamment les premières mesures de courant de fuite à température ambiante

de chaque détecteur après son report sur le substrat.

Par ailleurs, j'ai organisé un nouveau trade-off, autour de problèmes de compatibilités électro-magnétiques, après avoir constaté sur la version 1 de la Céramique ASIC, qu'il survenait des déclenchements intempestifs sur de nombreuses voies. S'agissant de la Céramique Détecteurs, de nombreuses réunions techniques se sont également tenues, pour, par exemple, fiabiliser le procédé de collage des détecteurs (aspects fonctionnel et performance) et qualifier ce demi-module en VRT et stockage (aspect technologique).

En parallèle, la fabrication de quelques nouvelles Céramiques Détecteurs, avec la proposition de nouveaux designs de grilles HT, ainsi que l'utilisation de deux outillages de collage avec des tolérances différentes, ont permis la sélection d'un design final pour la partie détection, et l'étude de l'impact sur le fonctionnement et la performance des détecteurs, de leur mise en place dans les compartiments de ces outillages (processus possiblement auteur de dégradations du cristal CdTe).

Après ces multiples activités, un rythme de développement 'série' a pu s'amorcer, donnant naissance à une dizaine de modules prototypes, une cinquantaine de modules de qualification (phase pré-série) et près de 250 modules de vol (phase série).

Exemples de problèmes rencontrés lors du développement du XRDPIX

Le développement a été jalonné par de multiples problèmes, souvent mineurs et parfois complexes voire majeurs : j'ai choisi quelques exemples qui me semblent pertinents pour comprendre le stress que j'ai pu endurer !

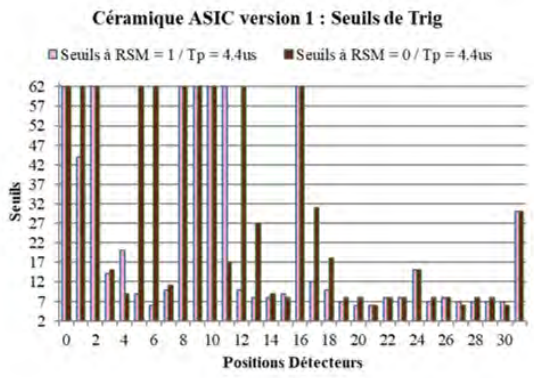
La première difficulté à laquelle j'ai dû faire face, et qui m'a accompagnée toutes les années de création de l'hybride, concerne la manipulation des détecteurs CdTe ; j'ai commencé par l'apprentissage de sa préhension, en tenant compte de sa fragilité, et poursuivi par la formation des personnes du laboratoire dédiées aux tests de caractérisation, ainsi que des personnes de la société en charge de la production série. Pour ce faire, j'ai rédigé les procédures décrivant les différentes opérations à mener, et suivi la réalisation des outils mis en œuvre tout au long du process de fabrication. J'ai également dû créer un vocabulaire spécifique, et défini des types de défauts (propres aux détecteurs ou dus à la préhension par les opérateurs et utilisateurs).

Au cours de la phase de prototypage, j'ai rencontré un problème technologique, d'ordre majeur, qui a conduit au changement de la grille Haute Tension : les premières années, le matériau initial était du constantan (alliage métallique constitué principalement de cuivre et de nickel) qui n'a pas tenu jusqu'au bout des 210 VRT (*Variation Rapide de Température*) exigés par les niveaux de qualification spatiale du projet. Malgré une ré-étude avec le sous-traitant (changement d'isolant pour une meilleure tenue thermo-mécanique), j'ai dû prendre la décision de changer de matériau conducteur, ainsi que de fabricant (qui ne pouvait faire les modifications demandées) pour réaliser une grille HT en Kovar.

Un troisième exemple est la constatation, lors des essais de qualification des procédés chez le fournisseur SAFRAN, de la non-tenue aux tests de « pull-up » (*arrachement*) des fils de bonding de la Céramique ASIC, après la phase de cyclages thermiques (VRT). Suite aux discussions avec l'équipe technique de SAFRAN, et après avoir rencontré la société EGIDE (France), fabricant du substrat HTCC, j'ai décidé d'approvisionner les substrats pour les Céramiques ASICs auprès d'un autre fabricant, NTK (Japon). Lors d'un point clé, j'ai pu remarquer le sérieux de leur équipe de production, et conclure au très haut niveau de qualité des procédés de cet industriel.

Un autre exemple, qui confirme la citation latine « Errare humanum est », a été le stockage à très haute température (+150 °C) durant plusieurs heures de plusieurs Céramiques Détecteurs, contrairement à la spécification maximale de +40°C. La température de consigne n'ayant pas été reprogrammée à la valeur correcte après une opération de maintenance, ceci a conduit à une dégradation globale des performances en termes de courant de fuite des détecteurs CdTe, l'indium ayant probablement diffusé dans le cristal du semi-conducteur, détériorant alors la barrière Schottky.

Enfin, un dernier exemple, avec cette fois-ci un problème fonctionnel affectant grandement la performance, s'est révélé plus critique : lors des tests de validation des premières Céramiques ASIC (version prototype), j'ai observé des problèmes de déclenchements intempestifs, et de bruits importants sur près de la moitié des voies. Étant donné l'impact négatif sur le fonctionnement (Fig. 4.11), et plus tard sur la performance, j'ai organisé des réunions de trade-off techniques, réunissant des ingénieurs de plusieurs domaines d'expertises, dont une réunion décisive impliquant des experts de l'IRAP, du CEA, de SAFRAN, et du CNES. Cela a conduit à plusieurs modifications sur le design initial, dont le changement majeur a été l'ajout d'un plan de masse séparant les voies analogiques des voies numériques (blindage électrique entre les signaux venant des détecteurs et les signaux numériques de contrôles/commandes).



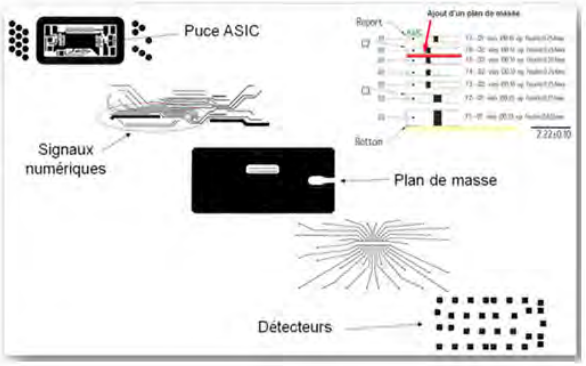


FIGURE 4.11 – Graphe de gauche : Valeurs des seuils numériques pour lesquels une voie ASIC déclenche à un même taux de coups injectés en entrée (correspondant à un niveau nominal spécifié par la mission), en fonction de la position des voies ASIC d'une Céramique ASIC version 1 (prototype). Nous voyons que certaines voies déclenchent à la valeur maximale de 62 (soit environ 17 keV) ce qui illustre les problèmes de déclenchements intempestifs sur une partie des voies que nous avons rencontrés sur les premiers modèles de Céramique ASIC ; la seule solution était alors de désactiver la voie bruyante, ce qui n'était pas acceptable étant donné la forte proportion de voies mauvaises sur une même Céramique ASIC (plus d'un tiers selon la valeur du registre RSM). / Image de droite : Étapes de corrections sur le nouveau design pour corriger le phénomène perturbateur « d'auto-déclenchements » observé sur l'ensemble des Céramiques ASICs version 1, étant donné le caractère « hardware » du problème.

En conclusion, tout au long des phases de prototypage, présérie, série, j'ai appris de nouvelles technologies, maîtrisé leur hybridation, et optimisé les procédés de fabrication du module XRDPIX pour répondre aux spécifications techniques et scientifiques de l'instrument

ECLAIRs. Le développement a nécessité un suivi industriel très poussé, avec la mise en place de réunions hebdomadaires pendant plusieurs années, et des rencontres régulières chez le sous-traitant. L'ensemble des anomalies ont été consignées et référencées dans un outil numérique de gestion des documents, dont les données sont formalisées pour améliorer les échanges entre l'IRAP, le CNES et les sous-traitants. Finalement, tout au long du processus, mon souci a toujours été la tenue des exigences permettant la performance scientifique.

C'est ainsi que les fonctionnalités aux températures ambiante et mission, les performances à froid, l'architecture mécanique et thermique, les procédés et la qualification spatiale, ont été validés. Ces travaux ont été publiés à l'occasion de plusieurs conférences ([Amoros et al., 2018][Lacombe et al., 2016a]).

4.3 Le fonctionnement d'un XRDPIX

De par sa composition hybride, le module XRDPIX a de multiples fonctions, à la fois analogiques et numériques ; l'ASIC IDef-X réalise un pré-traitement des signaux de sortie des détecteurs, et communique avec le reste de l'électronique de l'instrument (ELS), au moyen d'écritures et de lectures de ses registres. L'architecture et des images d'un secteur ELS sont présentées dans la figure 4.12.

Dans ce chapitre, nous détaillerons les différentes fonctionnalités, et leur séquencement, en nous appuyant sur des exemples concrets (Fig. 4.17). En effet, la caméra d'ECLAIRs composée des modules XRDPIX suit une architecture fonctionnelle commune à beaucoup d'instruments de détection des hautes énergies :

— la phase de détection, c'est à dire lorsqu'un pixel (dans notre cas, un détecteur d'un XRDPIX) est touché par un photon,
— la sauvegarde de l'état : le registre d'événements et les détecteurs de pic sont figés,
— la lecture de l'événement (donnant les numéros des voies touchées),
— la lecture puis le codage de l'impulsion d'énergie,
— le réarmement de l'électronique front-end (ici l'ASIC Idef-X), c'est à dire sa réinitialisation pour une future nouvelle acquisition photon.

4.3.1 Le fonctionnement analogique

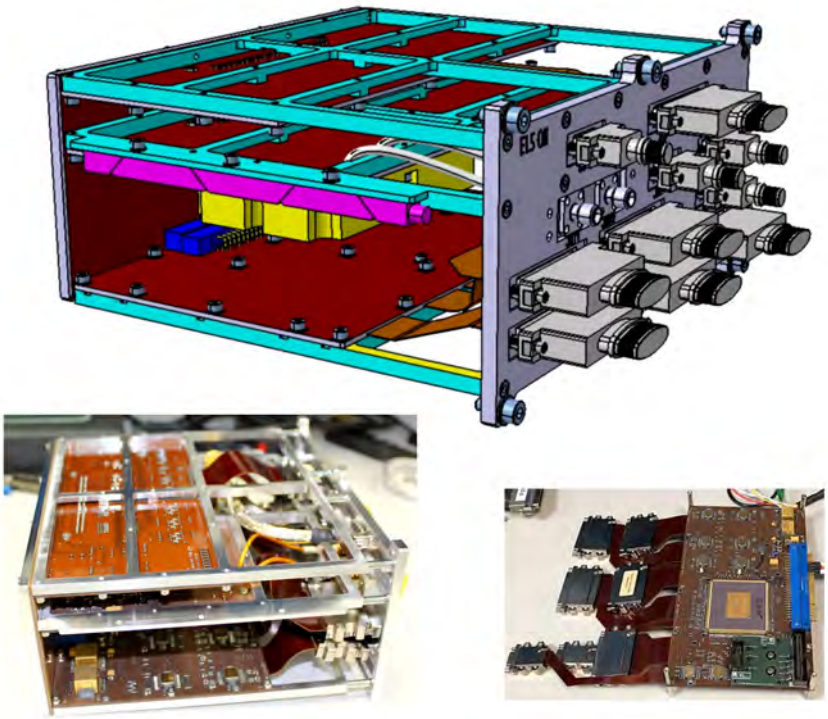


FIGURE 4.12 – Electronique ELS de la caméra de l'instrument ECLAIRs. Figure du haut : Vue mécanique 3D d'un module ELS comprenant les ceintures mécaniques de maintien des différentes cartes électroniques (carte ADC et multiplexage, carte haute tension « HVPS », carte basses tensions « LV », carte pré-processeur contenant le FPGA) / Figures du bas : à gauche, image d'un module ELS modèle EQM ; à droite, image d'une carte pré-processeur dont nous pouvons voir le composant FPGA au centre.

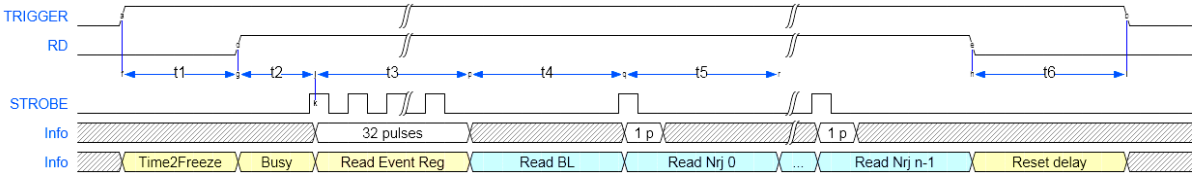


FIGURE 4.13 – Schéma et timing de commande et lecture d'un ASIC/XRDPIX : lorsqu'un déclenchement survient (une voie détecteur est touchée), l'information est donnée par la montée du signal TRIG au niveau haut (ici « TRIGGER »). Suite à un délai de gel de la lecture (Time2Freeze), le contrôleur FPGA fait passer le signal READ (ici « RD ») à '1' pour débuter la lecture de l'ASIC puis envoie 32 impulsions du signal STROBE. A chacun de ses fronts descendants, le signal D_{OUT} indiquera le contenu du registre d'événement, pour connaître la (les) voie(s) qui a (ont) déclenché.

Les détecteurs CdTe fonctionnent en compteurs de photons avec spectrométrie : nous

mesurons l'énergie, le temps et la position de chaque photon de façon individuelle.

La séquence de codage d'un photon est la suivante : la détection débute par l'émission du signal de déclenchement « TRIG » par l'ASIC, et se poursuit par la datation de ce signal par le FPGA de l'ELS. Ensuite il y a une temporisation d'une vingtaine de µs, durée correspondant au « Time2freeze » que nous expliquerons par la suite. Puis, la lecture du registre d'événements commence avec le gel de l'état interne de l'ASIC, l'envoi de 32 coups d'horloge (nécessaires pour lire 32 voies détecteurs), et l'incrémentation du compteur de la (des) voie(s) touchée(s). Nous terminons la séquence avec l'étape de codage de l'amplitude de l'impulsion, comprenant les numérisations de la ligne de base et de la sortie analogique ASIC/XRDPIX, le calcul de l'énergie brute (en faisant la différence de la sortie analogique moins la ligne de base), le calcul de l'énergie calibrée, la libération de l'ASIC, la redescente du signal TRIG, la temporisation selon la valeur du registre RSM et finalement l'attente d'une nouvelle détection de photon.

A la fin de la séquence de codage d'un photon (*Détection*, *Temporisation*, *Lecture registre événement*, *Codage amplitude impulsion*), un message « événement » est fabriqué par le FPGA de l'ELS, donnant la datation de cet événement et le numéro du module XRDPIX, puis le type single ou multiple (c'est à dire si plus d'une voie détecteur sur 32 a déclenché), le numéro du pixel et la valeur de l'énergie. Ces messages « événement » sont fabriqués au cours de la séquence de codage d'un photon, pour être envoyés vers l'unité de gestion et de traitement (UGTS) par un lien photon (à 3,2 Mb/s) propre à chaque ELS.

Le codage d'une énergie se déroule de la manière suivante :

— Positionnement des multiplexeurs sur la voie A_{out} de l'ASIC qui a déclenché,
— Numérisation de la ligne de base,
— Numérisation de l'énergie.

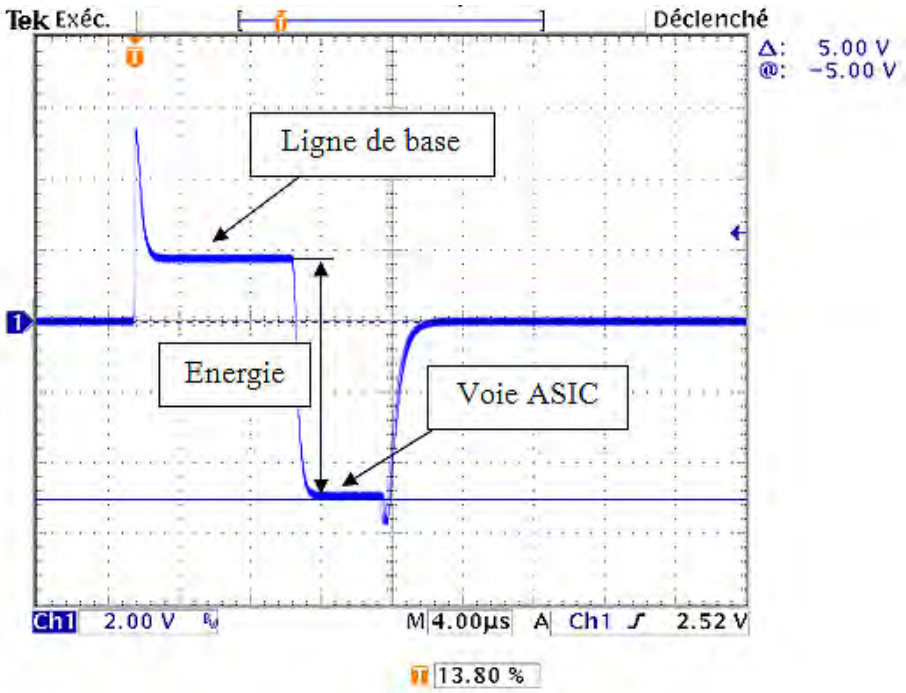


FIGURE 4.14 – Séquence de codage d'une énergie : l'ELS échantillonne deux niveaux d'énergie : la ligne de base et le niveau d'énergie de l'impulsion photon. L'énergie brute s'obtient en effectuant la différence entre l'énergie du photon et la ligne de base.

L'ELS (« Electronique Secteur ») permet le codage et la calibration des énergies délivrées par les ASICs pour chaque photon reçu. Pour le calcul d'une énergie, l'ELS échantillonne deux niveaux d'énergie : la ligne de base (qui correspond à l'offset de l'ASIC) et le niveau d'énergie déposé par le photon (Fig. 4.15 et Fig. 4.14). Le codage analogique/numérique des niveaux d'énergie est effectué à l'aide d'un codeur 12 bits signé (valeur de sortie comprise entre -2048 et 2047, soit $-5V/+5V$).

La figure 4.13 donne le chronogramme des signaux échangés entre un ASIC d'un module XRDPIX et le séquenceur FPGA d'un secteur ELS (décrit dans le paragraphe suivant 4.3.2), pour réaliser la lecture des événements qui surviennent sur le détecteur. Ainsi, après un front montant du signal « TRIGGER », le signal « RD » déclenche le mode lecture au bout d'un temps appelé le « Time2Freeze », car nous cristallisons un minimum le temps avant de débuter tous les échanges des signaux numériques. Sa valeur correspond à une durée plus longue que celle du peaking time choisie (environ 2 fois plus grande) ; en effet, si le Time2Freeze était plus court que le peaking time, nous débuterions la lecture trop tôt en figeant l'impulsion avant son pic, et obtiendrions une valeur d'énergie erronée.

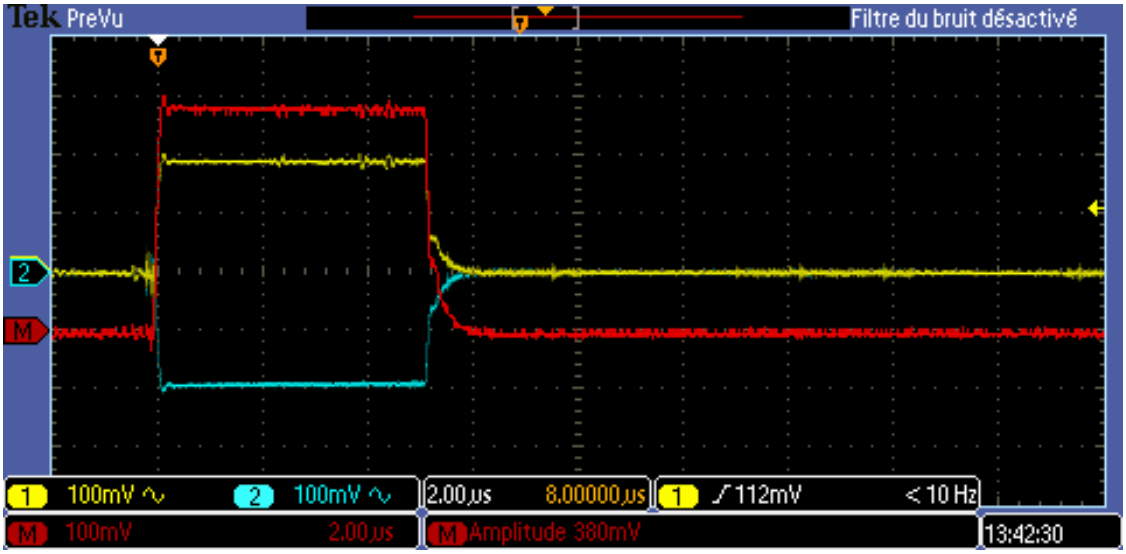


FIGURE 4.15 – Oscillogramme (AC) en sortie d'un module XRDPIX lors d'une acquisition spectrale de ^{57}Co : les signaux correspondent au niveau d'énergie déposés par le photon (pas de visualisation de ligne de base dans cet exemple). Nous mesurons le signal analogique A_{out+} en jaune (voie 1) et A_{out-} en bleu (voie 2). La voie en rouge, obtenue par calcul, effectue la différence des signaux (A_{out+} - A_{out-}).

4.3.2 La communication avec l'électronique de lecture secteur

Le dialogue entre l'ASIC du module XRDPIX et le composant FPGA de l'électronique de lecture ELS est séquencé par un signal appelé « STROBE ». Ce signal joue un rôle central lors des échanges entre l'ASIC et le contrôleur FPGA du secteur, car, même si ce n'est pas une véritable horloge du fait de sa fréquence potentiellement variable (dans notre cas, elle vaut 5 MHz, valeur choisie après des essais de fonctionnement), il permet de réaliser toutes les fonctions de lecture et d'écriture des registres des paramètres de l'ASIC et la lecture

analogique des signaux du détecteur. Par ailleurs, le dialogue est établi grâce à deux signaux tout aussi importants : le « SLOW CONTROL ENABLE » et le « READ ENABLE ».

Ces signaux, s'ils sont mis à 1 simultanément, permettent de réinitialiser l'ASIC de façon asynchrone, à n'importe quel moment. Tous les séquenceurs internes sont alors programmés à leur état initial et les registres à une valeur prédéfinie. De plus, à chaque mise sous tension, la puce ASIC est initialisée. Enfin, il est nécessaire de faire un reset de l'acquisition des canaux analogiques au minimum 1 µs après le front montant de la STROBE, en passant le signal READ de '1' à '0'.

L'ASIC est un composant complexe, proposant de nombreux scenarii de lecture, et jusqu'à huit valeurs de peaking time pour modeler les signaux détecteurs de façon optimale. C'est au moyen d'une liaison série que nous pouvons le configurer, en programmant ses registres de lecture/écriture et en paramétrant plusieurs configurations et des points de tests. Cette liaison est séquencée par le front descendant du signal STROBE pour réaliser différentes fonctions comme l'échantillonnage des données sur le signal d'entrée appelé D_{IN}, le décodage des trames, les opérations de lecture/écriture, et l'envoi des données XRDPIX sur le signal de sortie appelé D_{OUT}.

La figure 4.16 montre un exemple de lecture et d'écriture d'un registre 16 bits de l'ASIC : le protocole de lecture est semblable à celui d'écriture, à la différence de la valeur du premier bit de la trame, appelé « r/wb ».

Les chronogrammes nous permettent de voir que sur la ligne D_{IN}, la trame est composée par une suite de bits envoyés séquentiellement :

— [r/wb]$[Ad_6...Ad_0][D_{NBD-1}...D_0]$.

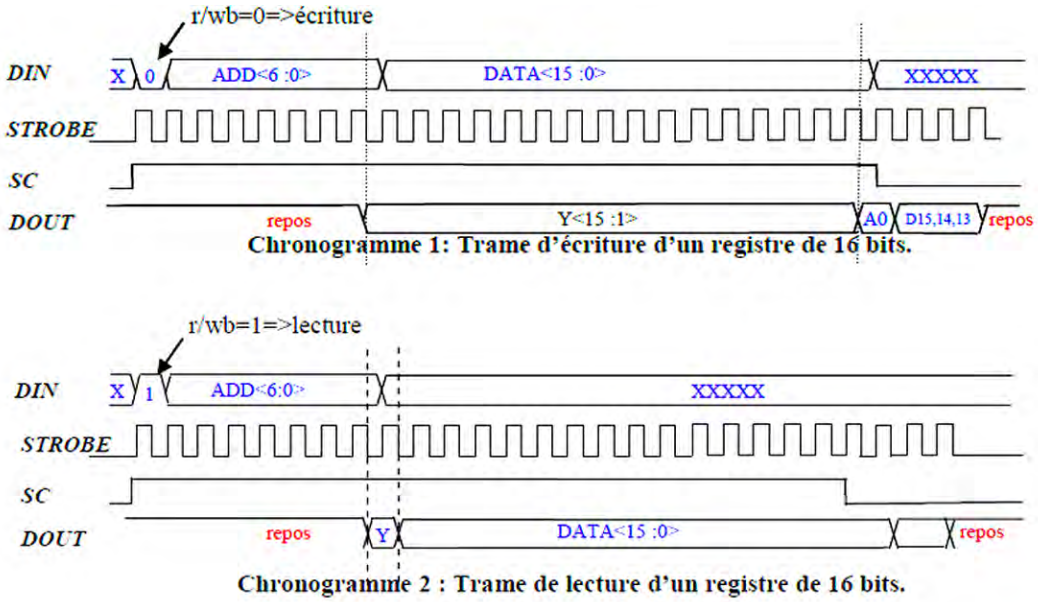
Le premier bit définit le type d'opération : r/wb est égal à '1' si c'est une lecture, et égal à '0' pour réaliser une écriture. Ensuite, il y a l'adresse du registre auquel on veut accéder codée sur 7 bits, et enfin les bits de données de la trame. Le signal SLOW CONTROL définit la trame série : il encadre la trame de bits envoyée sur le signal D_{IN}, monte simultanément avec le positionnement de [r/wb] et redescend un cycle de STROBE après le positionnement du dernier bit de données D_0 sur D_{IN}. Enfin, la STROBE doit être présente immédiatement après le début de trame (montée de SLOW CONTROL) et continuer au moins pendant les fronts descendants après la redescente du SLOW CONTROL.

La figure 4.17 montre un exemple de lecture des événements de deux voies de l'ASIC, séparés de 1,2 µs.

En conclusion de cette section, nous pouvons justifier la diversité des composants qui constituent l'hybride XRDPIX et ainsi comprendre la complexité de mise en œuvre que cela entraîne. Si cela exige de connaître plusieurs domaines techniques pour en maîtriser le fonctionnement et, par voie de conséquence la performance, il faut aussi vérifier à tous les niveaux la compatibilité technologique des nombreux matériaux, ce qui demande de faire des compromis.

De plus, j'ai voulu alléger le manuscrit pour une lecture plus aérée, mais d'autres contraintes plus « basiques » doivent être considérées pendant la mise en œuvre des modules XRDPIX, pour optimiser leur utilisation et ne pas perdre en performance :

— Il faut pouvoir les placer côte à côte, avec un espace minimum entre eux, de façon à obtenir un plan de détection très homogène (il n'est d'ailleurs plus possible de discerner un XRDPIX en particulier au milieu du plan final car la modularité n'est plus visible, le « pitch » (écartement) entre modules étant le même que celui entre détecteurs).
— Ils doivent supporter les vibrations du lanceur : les hybrides subissent de nombreux tests de qualification, dont des chocs mécaniques ainsi que des vibrations à des niveaux



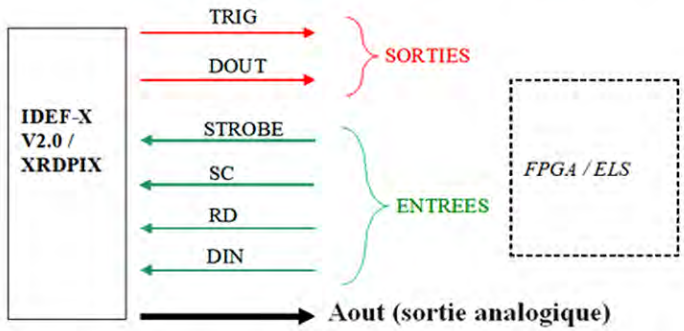


FIGURE 4.16 – Figure du haut : Chronogrammes de commande d'un ASIC / XRDPIX - Ecriture puis Lecture d'un registre. / Figure du bas : Schéma des entrées/sorties d'un ASIC / XRDPIX permettant le dialogue avec son contrôleur FPGA contenu dans l'électronique ELS : l'ASIC comprend deux signaux de sortie, cruciaux pour connaître l'état d'une voie détecteur (le signal TRIG informe sur le déclenchement des voies) et s'il y a lieu, le nombre et l'identification des voies touchées (rôle du signal D_{OUT}).

plus ou moins élevés selon les spécifications de la mission (nominalement, un module XRDPIX doit supporter des vibrations en sinus à 20 g, mais au fil des échanges avec les équipes chinoises, il a fallu étudier leur tenue à plus haut niveau, lors de vibrations aléatoires jusqu'à 40 g RMS).

— Pour atteindre le seuil de 4 keV, il faut éviter de placer des matériaux devant les détecteurs : à titre d'illustration, les épaisseurs et les types de MLI sont étudiées pour éviter une atténuation indésirable.

— Il faut refroidir les détecteurs XRDPIX à $-20°C$, ce qui pourrait, a priori, ne pas représenter une contrainte forte, en comparaison des exigences d'un capteur CCD ou d'un détecteur germanium ; cependant, il s'agit malgré tout de réussir à maîtriser les fluctuations de température, qui peuvent évoluer grandement durant une mission

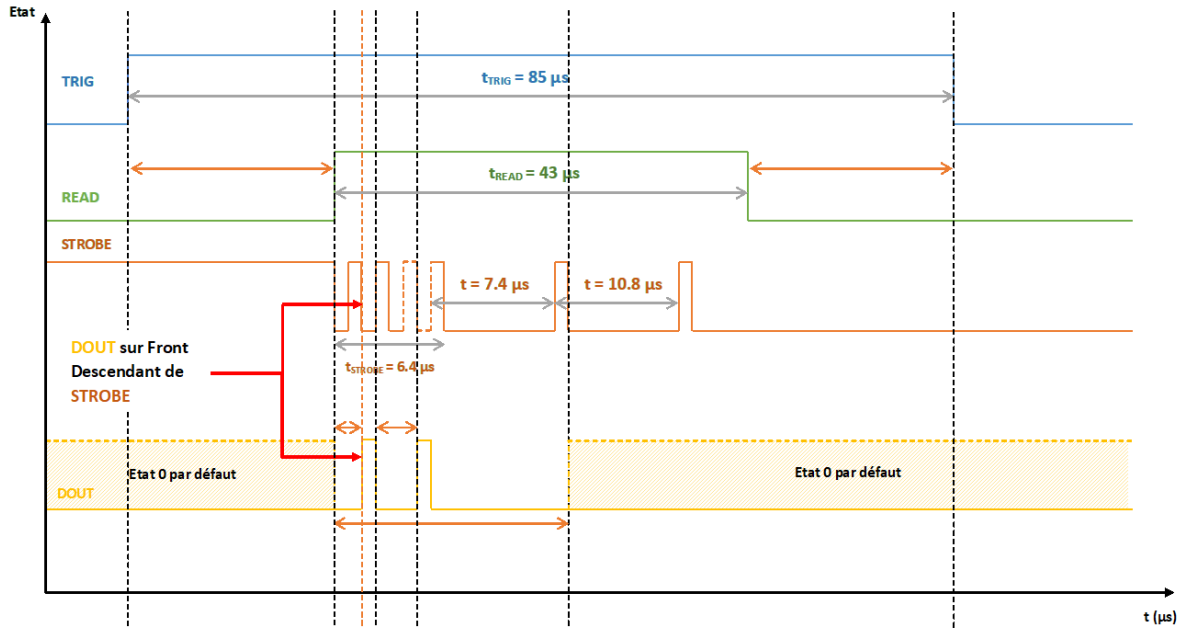


FIGURE 4.17 – Exemple d'un chronogramme quand deux voies d'un même XRDPIX sont actives (ici voies détecteurs P21 et P13, correspondant aux voies ASIC n°VE1 et VE6 soit le 1er front descendant et le 6ème front descendant du signal STROBE qui a une fréquence de 5 MHz).

spatiale, et connaissant les exigences de stabilité d'un détecteur (pixel) à un autre.

— Etant donné leur grande fragilité, il est nécessaire d'apprendre à manipuler les modules XRDPIX (un peu moins fragiles une fois les détecteurs CdTe assemblés), et trouver des solutions de protection sur les dix années du projet (le meilleur garde-fou étant de ne pas les toucher !).
— Il faut tenir compte de leur sensibilité à la lumière, qui conditionne le design des moyens d'essais, et de l'instrument général.
— Il faut éviter d'occasionner des vibrations mécaniques pendant les mesures. Par exemple, après avoir manipulé les détecteurs, il faut attendre une certain temps avant de les tester car les matériaux CdTe sont piézo-électriques : une déformation de ces cristaux peut induire une polarisation électrique, et cet effet n'étant pas forcément linéaire pour chacun des détecteurs CdTe, cela peut provoquer une augmentation du courant de fuite, dont l'abaissement au cours du temps n'est pas homogène ; il faudra aussi être attentif au système de refroidissement qui peut causer des vibrations mécaniques, aussi faibles soient-elles, et se propager au travers des interfaces métalliques de conduction thermique, causant l'augmentation du courant de fuite des détecteurs positionnés en regard du circuit transportant le liquide ou le gaz caloporteur.

Après avoir identifié tous les jalons du processus de développement du module XRDPIX, et en avoir apprécié les difficultés techniques, nous allons débuter le chapitre suivant (5) avec la description de sa performance. Nous montrerons au travers des nombreuses mesures réalisées, que les exigences spécifiées par le projet ont été atteintes, et même plusieurs fois dépassées.

Chapitre 5

Performance du module XRDPIX

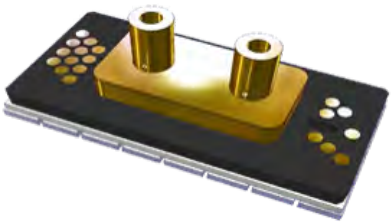


FIGURE 5.1 – Vue 3D d'un module XRDPIX.

5.1 Notre source étalon : l'Americium 241

Dans cette section nous décrivons les caractéristiques de la source d'américium 241, que nous avons majoritairement utilisée pour bon nombre de nos essais au sol, et qui nous a servi d'étalon pour toutes les phases de caractérisation et de calibration des sous-systèmes de détection. La figure 5.2 montre la constitution d'un atome de ^{241}Am.

5.1.1 Les caractéristiques de la source de ^{241}Am

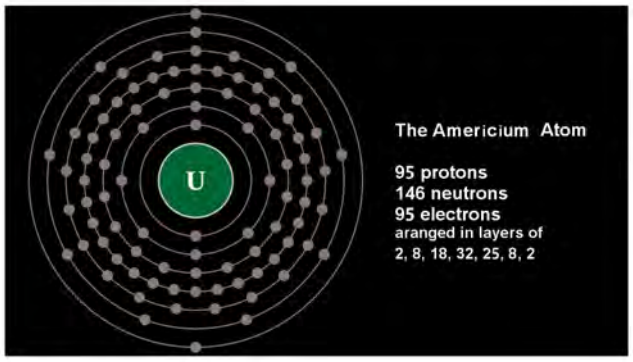


FIGURE 5.2 – Constitution d'un atome d'Americium 241.

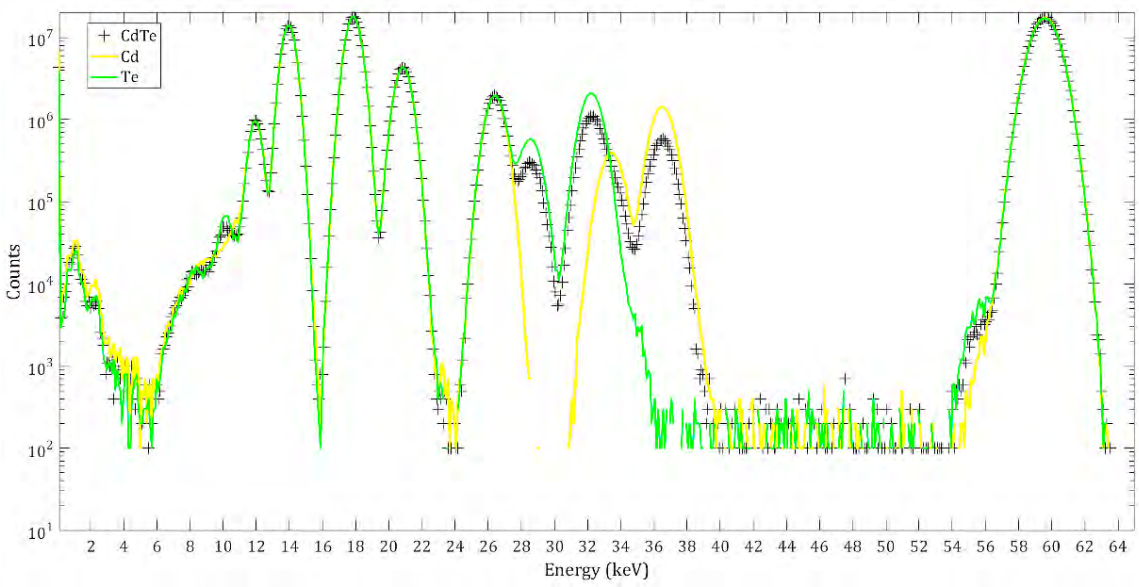


FIGURE 5.3 – Spectre de ^{241}Am obtenu par simulation MCNPX pour un détecteur CdTe sans couches d'indium, de platine et de titane, de façon à identifier les pics spécifiques du cadmium (33,4 keV et 36,55 keV - courbe jaune) et du tellure (28,56 keV et 32,2 keV - courbe verte).

Parmi la dizaine d'isotopes connus de l'Americium (atomes qui possèdent le même nombre de protons, mais un nombre différent de neutrons), l'un des plus usités est le 241 qui, n'existant pas à l'état naturel, est créé artificiellement dans les réacteurs nucléaires. Les isotopes d'un même élément ont des propriétés chimiques identiques, mais des propriétés physiques différentes (stables ou radioactifs notamment).

La période radioactive de l'Américium 241 (ou *demi-vie*, correspondant au temps nécessaire pour que la moitié de ses noyaux se désintègrent naturellement, et ce indépendamment de paramètres environnementaux tels que la température et la pression), est très longue, près de 432 ans, ce qui permet d'assurer une grande stabilité temporelle d'émission pour des projets spatiaux dépassant souvent la décennie. C'est un élément radioactif lourd (95 protons par noyau) et indiscutablement complexe, de par sa richesse en nombre et en type d'émissions. En effet, on compte plus de 200 émissions connues, avec un mélange d'alpha ($\approx$ 30), gamma ($\approx$ 170) et X ($\approx$ 20). Il descend du Plutonium 241 (parent) par désintégration $\beta-$, qui correspond à l'émission d'un électron et d'un antineutrino accompagnant la transformation d'un neutron en proton. Ainsi, la radioactivité β est rendue possible par la présence dans le noyau de forces capables de transformer un nucléon d'une espèce en une autre (un neutron en proton ou un proton en neutron) : ce sont les forces appelées faibles. Si le nombre de nucléons reste inchangé, il apparaît un changement de charge qui va induire l'expulsion d'un électron, couplé à un antineutrino (désintégration $\beta-$) ou d'un positon avec un neutrino (désintégration $\beta+$). Il subit une désintégration alpha conduisant au Neptunium 237. La majeure partie de la décroissance (84,6 %) occupe le niveau excité 59,54 keV du ^{237}Np.

Les principaux pics gamma ont des énergies de 59,5 keV, 33,1 keV et 26,3 keV, avec pour probabilités respectives 35,78 %, 0,121 % et 2,40 %. Les transitions gamma sont accompagnées de rayons X intenses L, allant de 11 à 23 keV, qui possèdent une intensité totale de 37,6 % [Lepy et al., 2008] (Fig. 5.3 et Fig. 5.4).

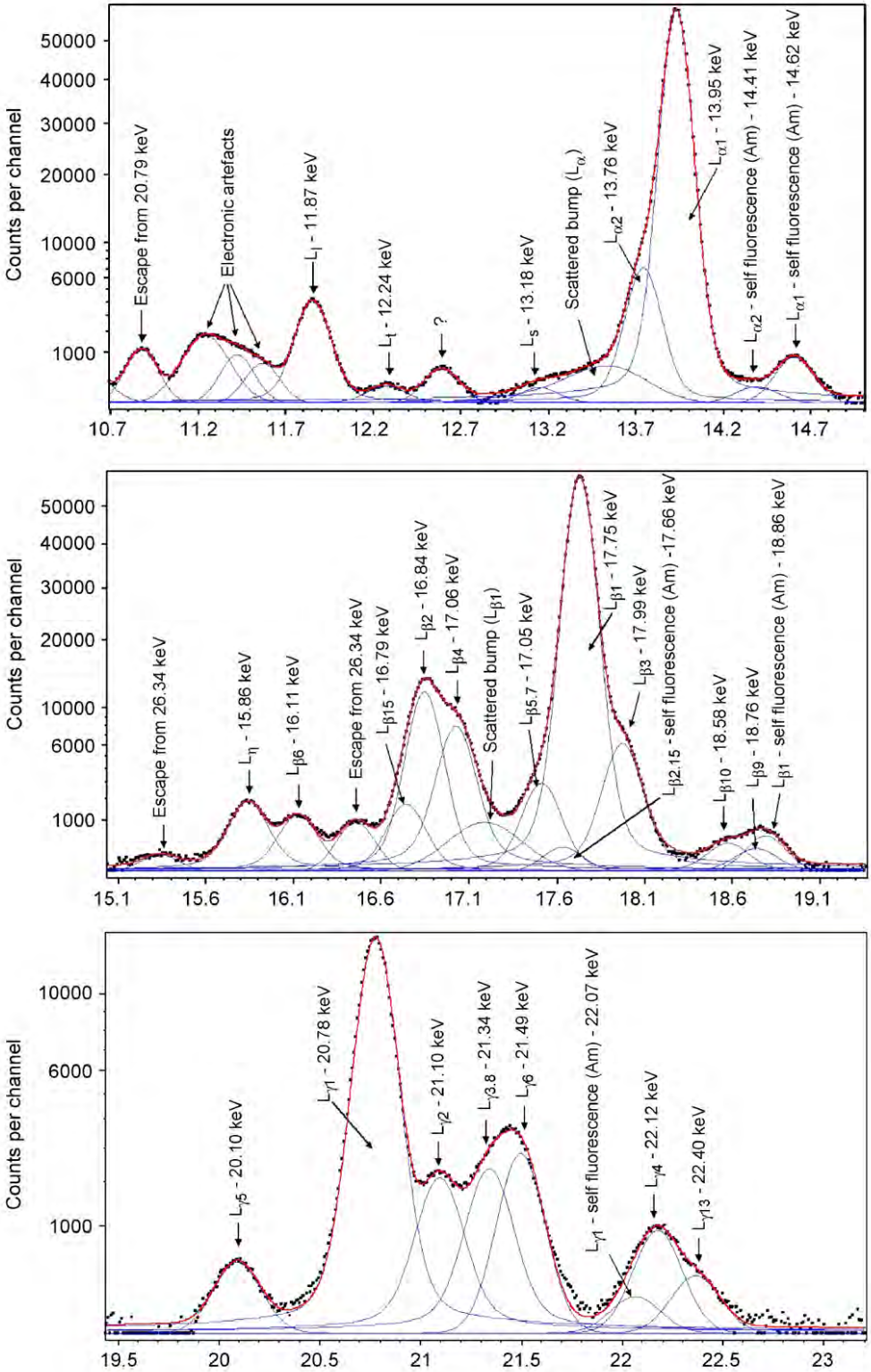


FIGURE 5.4 – Spectres de ^{241}Am dans la gamme d'énergie [10 - 23] keV, obtenus à partir d'un détecteur HPGe.

5.1.2 Un exemple de comptage avec la source radioactive ^{241}Am

Pour clore cette section, nous terminons par un exemple de calcul qualitatif que nous menons lorsque nous souhaitons estimer le taux de comptage de photons qui irradient un de nos détecteurs (pages du BIPM en annexe A.4.1).

En 1ère étape, il faut connaître l'activité A de la source émettrice des photons qui seront estimés à la date de la détection. Dans notre cas, l'activité initiale A_0 étant de 2,14 MBq à la date de fabrication (04/08/2009), avec une incertitude de ±5%, nous pouvons évaluer alors l'activité A à la date du 05/02/2018, au moyen de la formule A = A_0 / 2^n avec n = rapport du nombre de jours d'activité de la source (N_a) sur le nombre de jours de la demi-vie ($N_{t0.5}$). Nous trouvons ainsi une activité à la date du 05/02/2018 de A = 2,11 MBq (avec N_a = 3107 jours et $N_{t0.5}$ = 157680 jours soit n = 0.019704 demi-vie).

En 2ème étape, nous identifions les émissions photoniques principales de l'^{241}Am (pondérées par la transmission dans le matériau plexiglas de l'encapsulation ou scellage de la source) pour une désintégration :

- entre 11,9 et 22,2 keV, l'intensité des X est de ≈ 37%, ce qui donne une émission au travers du plexiglas de : 0,37 *0,7 = 0.26, le facteur 0,7 étant l'atténuation moyenne pour des énergies comprises entre 11 et 22 keV (ceci est une approximation car, en réalité, cette absorption dépend assez fortement de l'énergie et il serait nécessaire de la calculer pour chaque raie individuellement).

- les pics gamma à 26,3 keV et 59,54 keV ont des intensités respectives de 2,4 % et 35,8 %, ce qui donne une émission totale de : (0,024*0,85) + (0,358*0,93) = 0,35

A chaque désintégration, il y a donc au total 61 % de photons X et gamma qui sont émis dans tout l'espace (4π sr) par la source ^{241}Am après avoir traversé la couche de plexiglas.

En dernière étape, nous estimons le taux de comptage selon la taille du détecteur qui reçoit les photons, et la position dans laquelle il se trouve.

Par souci de simplicité, nous étudions seulement deux cas : lorsque le détecteur (ou pixel) est situé directement à la verticale de la source (cas 1) et lorsque le détecteur est situé au bord du module de détection, c'est à dire le plus éloigné de la source (cas 2).

La source se trouve à une distance H de la surface du détecteur ; θ étant l'angle entre la direction du pixel et la direction de la source, et l'angle solide étant le rapport de l'aire du détecteur avec le carré de la distance au point d'observation, soit (0,004 m)^2 / H^2, nous trouvons alors :

<u>Cas 1</u> : Nombre moyen de photons reçus par 1 pixel de 4 mm de côté

Comptage estimé [cas 1] = 2,11.10^6 * 0,61 * cos($\theta = 0$) * $(0,004/H)^2$ * 1/(4π) = 8,1 c/s (si H = 45 cm, soit la hauteur typique de la source radioactive utilisée au-dessus d'un secteur du ProtoDPIX)

<u>Cas 2</u> : Nombre moyen de photons reçus par 1 pixel de 4 mm de côté, le plus éloigné de la source, situé à une distance Z = H/cos(θ)

Nous supposons que le pixel le plus lointain est situé à ≈ 128 mm perpendiculairement à la verticale de la source, et nous négligeons l'effet des photons qui arrivent sur le côté des détecteurs.

Comptage estimé [cas 2] = 2,11.10^6 * 0,61 * cos(θ) * $(0,004/Z)^2$ * 1/(4π)
=> Comptage estimé [cas 2] = 2,11.10^6 * 0,61 * cos(θ) * (0,004*cos(θ)/H)^2 * 1/(4π)
=> Comptage estimé [cas 2] = Comptage estimé [cas 1] * cos(θ)^3
=> Comptage estimé [cas 2] = 7,2 c/s (si H = 45 cm)

Ceci montre une baisse d'environ 10 % sur les pixels situés sur les bords d'un même module XRDPIX (que nous décrirons en détail dans la section 5).

Enfin, il s'avère utile de définir un seuil (une valeur maximale de taux de comptage) pour détecter les voies bruyantes, c'est à dire les voies qui montrent un taux anormalement élevé de comptage, ce qui peut induire des problèmes diverses (difficulté d'interprétation de l'image, cross-talk inter-voies, lecture électronique par l'ASIC voire le FPGA altérée). Le nombre de coups attendus à la verticale de la source permet ainsi de proposer un seuil pour la détection des voies bruyantes, avec par exemple une valeur déterminée par la moyenne attendue additionnée à dix fois l'écart-type sur une durée de 5 secondes.

Ajoutons que les calculs précédents sont approximatifs, dans le sens où ils ne prennent en compte que les photons de la source qui impactent directement les détecteurs, ils négligent donc l'effet de l'environnement et les photons qui arrivent sur le côté des pixels. Dans la réalité les comptages mesurés sont comparés avec les prédictions d'un modèle physique (Géant 4, basé sur des simulations Monte Carlo), qui tient compte de l'ensemble des interactions des photons de la source avec tous les matériaux situés à l'intérieur de l'enceinte, étant donné la complexité des interactions décrites dans la partie 2.2.

5.2 Caractérisation des sous-ensembles Céramique Détecteurs et Céramique ASIC

Comme expliqué dans les sections 4.1 et 4.3, les sous-ensembles Céramique ASIC et Céramique Détecteurs du module XRDPIX ont été développés, testés et finalement étudiés indépendamment, de manière à gérer et optimiser au maximum les performances du détecteur d'ECLAIRs, en matière de sensibilité aux basses énergies.

Dans cette section, nous présentons les résultats des mesures de courant, de gain et de bruit des sous-ensembles, après avoir exposé les différentes sources de bruit qu'il nous faut maîtriser dans la recherche constante d'un seuil bas de détection.

5.2.1 Les sources de bruit

L'instrument ECLAIRs exige des performances de seuil bas en énergie telles que tout bruit physique ou électronique, aussi faible soit-il, nécessite une étude approfondie qui permette de le réduire au maximum et d'atteindre les 4 keV confortablement.

Dans le cas de SVOM, ce seuil bas sera réglé pour être au-dessus du bruit total équivalent, composé du bruit de la haute tension, du bruit des détecteurs, du bruit capacitif transmis sur les substrats, du bruit de l'électronique ASIC, et du bruit de l'électronique de conversion du signal analogique-numérique.

Si nous programmons un seuil numérique trop bas (par exemple un seuil numérique à '8', correspondant à 1,8 keV environ), nous observons alors la présence du bruit électronique à bas niveau en plus des raies de ^{241}Am (Fig. 5.5). Ce bruit est susceptible d'affecter gravement les comptages mesurés, ainsi que le traitement spectral, s'il n'est pas coupé. L'estimation du seuil bas en énergie se base sur un calcul ambitieux, mêlant les nombreux bruits qui existent aux différents étages de la chaîne de détection.

Dans ce chapitre, nous allons décrire l'ensemble des sources de bruit auxquelles nous pouvons nous attendre dans un module XRDPIX, que ce soit au niveau des détecteurs CdTe,

des substrats ou de l'ASIC. En effet, ce dernier contient des étages analogiques et une partie numérique, pouvant induire un bruit électronique.

Parmi les différents postes de bruit de la chaîne de détection, nous pouvons citer le bruit thermique (principalement dû à des éléments dissipatifs tels que des résistances), le bruit de grenaille (ou 'shot noise', lié au passage d'un courant continu), le bruit en 1/f (propre à chaque technologie) ; à ces bruits sont souvent couplés un bruit dû aux pertes diélectriques, mais aussi un bruit induit par la Haute Tension.

La détermination de ces bruits s'avère donc complexe, variant selon de nombreux paramètres, tel que le peaking time, dont la valeur va apparaître comme majeure dans l'obtention de la performance finale.

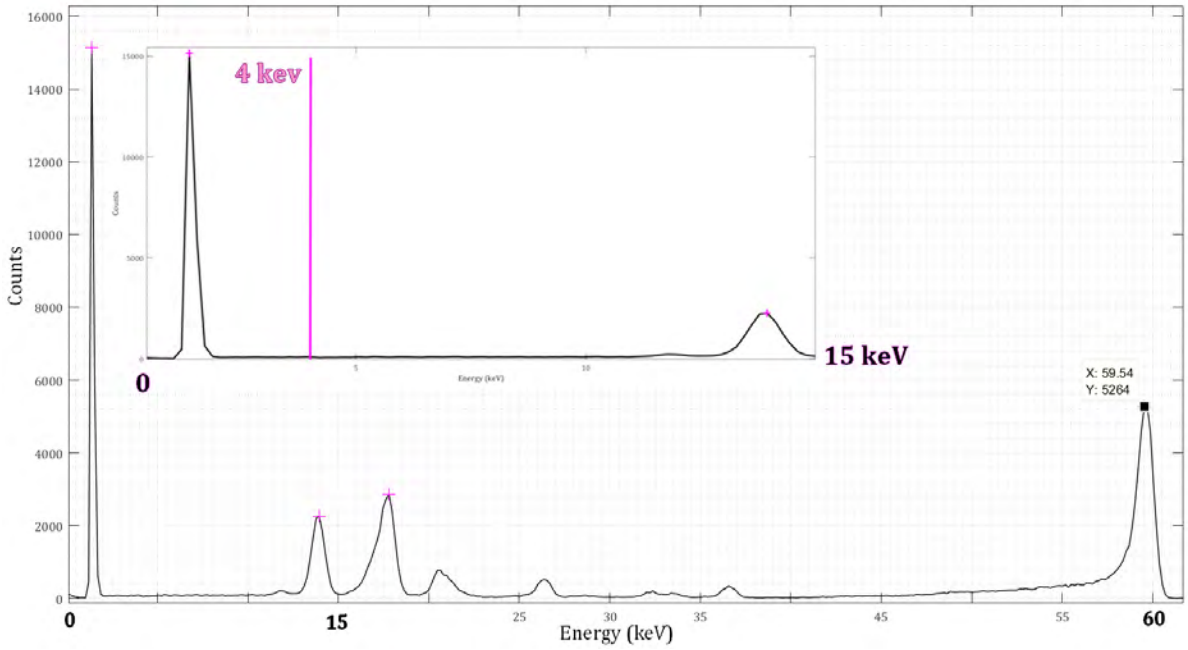


FIGURE 5.5 – Exemple de spectre avec un pic de bruit - Polarisation à −300 V - peaking time à 2,6 µs - Seuil numérique à 8 - Source ^{241}Am. Le pic de plus basse énergie est le pic de bruit, les autres pics sont les raies X et gamma de la source de ^{241}Am.

Estimation du bruit électronique

Nous pouvons distinguer deux types de bruit ENC (Equivalent Noise Charge) au niveau de l'ASIC :

— le bruit intervenant avant la détection de seuil (que nous appellerons bruit de seuil ENC_{TH})

— le bruit situé après la détection de seuil (bruit au niveau de la détection de pic et bruit du buffer de sortie de l'ASIC)

Le bruit total ENC_{TH} en sortie de l'ASIC est la somme quadratique de ces deux bruits. Cependant, comme le bruit de la chaîne électronique de l'ASIC provient essentiellement du préamplificateur de charge (d'amplification importante), les bruits du reste de la chaîne analogique sont négligeables, et seul le bruit intervenant avant la détection de seuil ENC_{TH} aura

Table 5.1 – Tableau des termes et indices utilisés dans la formule (F4.1)

Indice	Désignation	Définition
HT	Haute Tension	Tension variable de 0 à −450 V alimentant les détecteurs CdTe
DIEL	Diélectrique	Milieu des matériaux céramiques
TH	Threshold	Fait intervenir le bruit qui est créé avant le buffer de sortie de l'ASIC
CAN	Convertisseur Analogique-Numérique	Fait intervenir le bruit du CAN de la chaîne de traitement située après l'ASIC/XRDPIX

un impact sur notre performance. C'est la raison pour laquelle nous considérons par la suite que $\mathrm{ENC}_{TOTAL} = \mathrm{ENC}_{TH}$.

L'expression générale du bruit de seuil (ramené en électrons en entrée de l'ASIC) est la suivante :

$$\mathrm{ENC}^2_{\mathrm{TH}} = \mathrm{ENC}^2_{\mathrm{HT}} + \mathrm{ENC}^2_{\mathrm{DIEL}} + \mathrm{ENC}^2_{\mathrm{CAN}} + \mathrm{A}^2 \times \mathrm{C}^2_{\mathrm{TOTAL}}/\mathrm{t_p} + \mathrm{B}^2 \times \mathrm{C}^2_{\mathrm{TOTAL}} + \mathrm{I_{FUITE}} \times \mathrm{D} \times \mathrm{t_p} \quad \text{(F4.1)}$$

avec :

- A, B et D : constantes de bruit, respectivement série, en 1/f et parallèle (caractéristiques ASIC)
- C : capacité (CAN, diélectrique, design substrat)
- I_{FUITE} : le courant de fuite du détecteur
- t_p : le peaking time (explicité dans la section 4.2.4 du chapitre 4)

Dans la suite, nous négligerons certains termes de bruit, qui interviennent dans la formule générale (F4.1), à savoir :

- le bruit de la Haute Tension appliquée au niveau du détecteur : $\mathrm{ENC}^2_{\mathrm{HT}}$, qui est négligeable lorsque la HT est filtrée en dessous de 100 Hz et que son bruit dans la bande du filtre ne dépasse pas 1 mV rms,
- le bruit du convertisseur analogique-numérique : $\mathrm{ENC}^2_{\mathrm{CAN}}$,
- le bruit diélectrique : $\mathrm{ENC}^2_{\mathrm{DIEL}}$ des Céramiques ASIC.

Une fois ces composantes soustraites de la formule, nous obtenons conséquemment une égalité simplifiée de l'ENC_{TH} :

$$\mathrm{ENC}^2_{\mathrm{TOTAL}} = \mathrm{A}^2 \times \mathrm{C}^2_{\mathrm{TOTAL}}/\mathrm{t_p} + \mathrm{B}^2 \times \mathrm{C}^2_{\mathrm{TOTAL}} + \mathrm{I_{FUITE}} \times \mathrm{D} \times \mathrm{t_p}$$

(F4.2)

Impact sur la résolution et le seuil bas en énergie

Le bruit ENC_{TOTAL} permet de valider les XRDPIX en évaluant plusieurs paramètres de performance, les plus pertinents étant le seuil bas en énergie et la résolution spectrale. En effet, ce bruit a deux conséquences : un pic de bruit à bas niveau, et un élargissement des raies, mesurées grâce à leur FWHM. Cette dernière est directement liée au bruit total ENC_{TOTAL} par la formule suivante [Lacombe et al., 2018] :

$$\mathrm{FWHM(E)[keV]} = 2,355 \times \mathrm{E_C} \times \sqrt{(\mathrm{ENC^2_{TOTAL}} + \mathrm{F} \times \mathrm{E/E_C})}/1000$$

(F4.3)

avec :

— $\mathrm{E_C}$: l'énergie nécessaire à la création d'une paire dans le CdTe ($\mathrm{E_C} = 4,42$ eV),

— F : le facteur de Fano [Knoll, 1989], de valeur $\mathrm{F} \approx 0,2$ pour le CdTe,

— E : l'énergie incidente,

— $\mathrm{ENC^2_{TOTAL}}$: la valeur ENC d'une voie.

S'agissant du seuil bas en énergie, corrélé à la FWHM, nous pouvons l'exprimer ainsi :

$$\mathrm{SB_E[keV]} = 6 \times \mathrm{E_C} \times \sqrt{(\mathrm{ENC^2_{TOTAL}})}/1000$$

Pour effectuer la modélisation de l'ENC total, et ainsi de la résolution spectrale et du seuil bas en énergie (à 6σ), je me suis basée sur des études menées par l'équipe du CEA (Irfu à Saclay) [Gevin et al., 2009] pour connaître certains paramètres de l'ASIC (constantes A, B, et D) simulés avec précision. Par ailleurs, en plus des milliers de courants et de bruits ASIC que nous avons mesurés à l'IRAP, il nous faut connaître la capacité des détecteurs CdTe et la capacité totale des céramiques.

Pour se faire, j'ai sélectionné des détecteurs unitaires et quelques substrats, sur lesquels j'ai réalisé les mesures nécessaires à la modélisation (capacités pa exemple), en émettant l'hypothèse d'une forte reproductibilité. C'est alors que le seuil bas en énergie et la FWHM peuvent être estimés, et ce en fonction du peaking time et du courant de fuite.

La figure 5.6 donne par exemple la corrélation modélisée entre la FWHM du pic à 60 keV en fonction de celle du pic à 14 keV, dans deux configurations (HT ; tp), et ce à partir de milliers de mesures de courant de fuite des détecteurs (une fois montés sur les Céramiques Détecteurs) ; nous obtenons alors :

— dans la configuration (−400 V ; 4,4 µs) :

$$\mathrm{FWHM(60)[keV]}_{mod\grave{e}le} = 0{,}90 * \mathrm{FWHM(14)[keV]}_{mod\grave{e}le} + 0{,}21$$

— dans la configuration (−300 V ; 2,6 µs) :

$$\mathrm{FWHM(60)[keV]}_{mod\grave{e}le} = 0{,}91 * \mathrm{FWHM(14)[keV]}_{mod\grave{e}le} + 0{,}20$$

Les relations sont donc toutes deux très proches des valeurs mesurées (Fig. 5.25).

Nous pouvons ainsi comparer nos mesures spectrales, effectuées sur les modules XRDPIX FM, avec une estimation théorique de la FWHM, grâce à une simulation dédiée, basée à la fois sur des paramètres modélisés et sur des variables mesurées, incluant les mesures du courant de fuite et de la capacité céramique dans la formule ci-dessus F4.3 [Lacombe et al., 2018]. Aussi, pour des valeurs typiques des paramètres de l'ASIC, et en se basant sur une forte statistique de mesures des courants de fuite, cette évaluation fournit de bonnes estimations de la FWHM observée.

Par exemple, en supposant des valeurs de $\mathrm{ENC^2_{TOTAL}}$ égales à 75 e- et 90 e- rms, je peux calculer respectivement des valeurs de FWHM de 0,82 keV et 0,97 keV à 14 keV et, de la même manière, des valeurs de FWHM de 0,95 keV et 1,08 keV à 59,5 keV, ce qui donne, dans ce cas, une relation entre FWHM égale à FWHM[60] = 0,89 * FWHM[14] + 0,22. En conclusion, la concordance des relations entre les FWHM mesurées et modélisées, de raies à deux énergies, valide l'$\mathrm{ENC^2_{TOTAL}}$ de la formule F4.2.

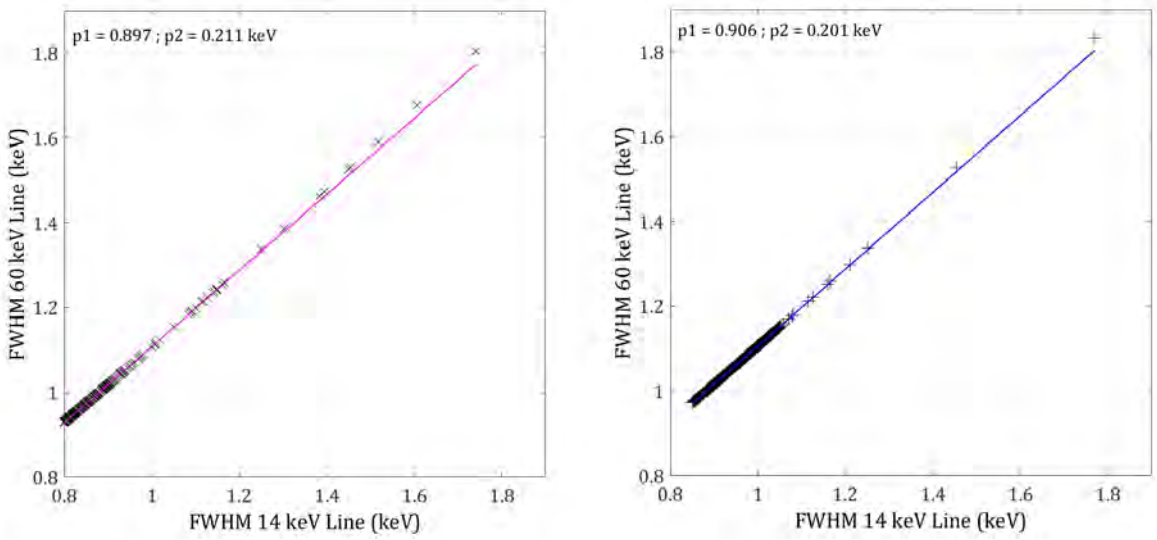


FIGURE 5.6 – Graphe de gauche : la FWHM estimée pour la raie à 59,5 keV en fonction de la FWHM estimée pour la raie de 13,9 keV à la configuration (−400 V ; 4,4 µs) / Graphe de droite : la FWHM estimée pour la raie à 59,5 keV en fonction de la FWHM estimée pour la raie de 13,9 keV à la configuration (−300 V ; 2,6 µs). Ces figures peuvent être directement comparées aux courbes mesurées, présentées ci-après dans ce chapitre (Fig. 5.25).

Le seuil bas peut être défini si on lui associe un taux d'occurrence maximal de déclenchements dus au bruit. La détection d'événements se fait pour une énergie supérieure à ce seuil préalablement réglé (seuil de déclenchement de l'électronique, indiqué par le passage au niveau haut du signal TRIG décrit dans la section 4.3.1). C'est pourquoi, plus ce seuil est bas, plus la détection d'événements de basse énergie sera possible, mais plus le taux d'événements dus au bruit sera important.

La modélisation du bruit va permettre d'évaluer les performances de seuils bas et de résolution spectrale de l'instrument ECLAIRs. Nous pourrons alors confronter ces estimations avec nos mesures expérimentales et conclure sur la pertinence et la validité de ces calculs. Dans les sections suivantes, nous montrerons l'impact du bruit du détecteur, avec l'exemple des résolutions de pics d'un spectre (exprimées en FWHM), affecté par un courant de fuite élevé. Par ailleurs, nous verrons la forte dépendance des performances spectrales aux valeurs de capacités totales des modules d'une part, et aux positions des détecteurs d'autre part.

Pour effectuer la modélisation, j'ai abordé les différents bruits du module XRDPIX, en m'appuyant sur les très nombreuses mesures de courants de fuite des Céramiques Détecteurs, sur le bruit électronique que j'ai étudié sur chacune des 300 Céramiques ASICs, soit près de 10000 voies, et sur les capacités des substrats nus, HTCC et couche épaisse, que j'ai mesurées sur certains échantillons représentatifs, de manière à les insérer dans la formule F4.2.

Les simulations du signal attendu en vol montrent que l'instrument ECLAIRs aura un bruit de fond de 0,55 cps/s/det, et pour que le bruit de l'électronique soit considéré comme négligeable, nous acceptons d'avoir un taux d'événements de bruit 10 fois plus faible que le taux d'événements de bruit de fond, soit environ 0,05 c/s/det. De plus, lorsque sera programmé le seuil numérique de l'ASIC, nous devrions choisir une valeur proche du seuil scientifique de 4 keV.

Par conséquent, le seuil numérique ASIC/XRDPIX doit être programmé à une valeur suffisamment élevée pour ne pas subir des déclenchements de bruit et, dans le même temps, suffisamment faible pour ne pas réduire la sensibilité à 4 keV. Cette valeur pourra être comprise entre 3,2 keV et 3,6 keV par exemple.

Ce bruit électronique amené par l'ASIC n'est pas la seule source de bruit : en effet, comme mentionné précédemment, d'autres sources de bruit, plus ou moins conséquentes, apparaissent, provenant notamment des détecteurs CdTe, sous forme de courant de fuite, des substrats en céramique, sous forme de capacités parasites, des contacts électriques, etc., le défi étant de les évaluer, de trouver ceux qui prédominent et de les réduire au maximum.

5.2.2 Les performances des Céramiques Détecteurs

Impact de la polarisation sur le courant de fuite

La Céramique Détecteurs est formée de plusieurs composants, comme nous l'avons décrit dans la section 4.2.3, mais seuls les détecteurs CdTe sont actifs. En étudiant leur courant de fuite I_{FUITE} à la température de $-20°C$ dans la formule F4.2, c'est à dire le courant continu mesuré dans l'obscurité et sans aucune autre excitation extérieure que la polarisation appliquée, nous pouvons évaluer leur qualité intrinsèque et anticiper la performance finale d'un XRDPIX.

En effet, nous verrons par la suite que les voies qui montrent des résolutions élevées et des seuils bas supérieurs au seuil de 4 keV recherché, sont celles qui ont été mesurées avec des courants de fuite élevés.

Dans ce paragraphe, nous montrerons des résultats des tests réalisés sur des Céramiques Détecteurs (modèles de vol), et mettrons en évidence le paramètre le plus impactant sur les performances finales. Nous verrons ainsi que la tension de polarisation des détecteurs et la température de mesure jouent un rôle majeur dans leur obtention, étant des paramètres clés en lien direct avec la densité de courant (formule 2.11).

FIGURE 5.7 – Images du banc de test permettant les mesures de courant de fuite - Photo du haut : Enceintes thermiques pour la régulation des basses températures dans lesquelles sont montés les circuits de test des « Céramiques Détecteurs » 32 voies, mesurées au moyen d'un ampèremètre à faible signal, pour des courants de l'ordre du pico-ampère, placé en sortie d'un multiplexeur 32 voies / Photo du bas : Circuit de test des « Céramiques Détecteurs » comprenant un substrat céramique à pointes.

La figure 5.7 montre des images du banc de test utilisé pour les campagnes de mesure de courant de fuite des cristaux CdTe des « Céramiques Détecteurs » : plus de 8000 détecteurs ont été caractérisés à plusieurs tensions (−200V, −300V, −400V, −500V) et plusieurs températures, dont la température nominale mission (−20°C).

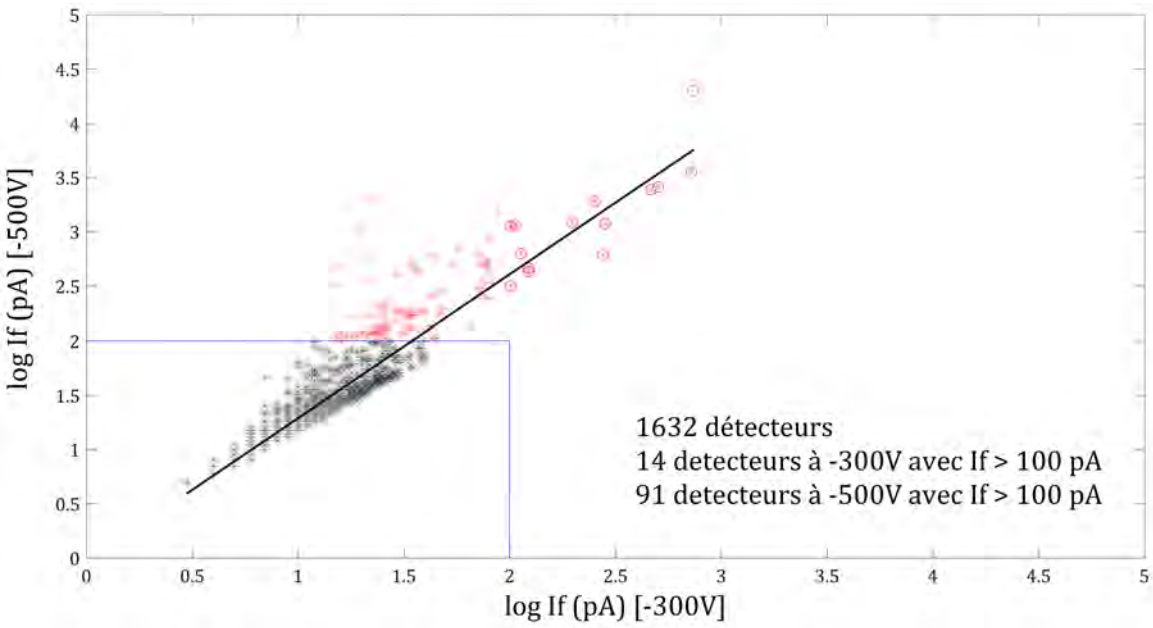


FIGURE 5.8 – Courants de fuite de 51 Céramiques Détecteurs FM polarisées à −300 V (abscisse) et à −500 V (ordonnée) - Mesures effectuées avant la phase de dégazage sur 1632 voies - Les points en rouge sont hors cadre défini pour un courant de 100 pA

La figure 5.8 montre 1632 mesures du courant de fuite de 51 Céramiques Détecteurs polarisées à −300V (axe des abscisses X) et −500V (axe des ordonnées Y), de manière à étudier l'impact de la tension de polarisation sur le bruit intrinsèque des détecteurs. Au moyen d'une boîte d'acceptance de 100 pA, nous pouvons voir que les courants supérieurs à 100 pA sont au nombre de 14 à la HT de −300 V (0,9 %) tandis qu'on en dénombre 91 à la polarisation de −500 V (5,6 %)[Lacombe et al., 2016a].

De plus, la distribution des mesures apparaît homogène, avec des points très proches de la droite de régression linéaire d'équation Y = 1,32 X – 0,03. Cette dernière a été calculée sur les 1632 courants avec $Y = I_{[-500V]}$ et $X = I_{[-300V]}$, à partir d'un ajustement linéaire des données (par la méthode des moindres carrés, à l'aide d'une fonction polynomiale d'ordre 1, et minimiser ainsi la somme quadratique des résidus entre les données et le modèle).

En ajustant une droite de tendance aux seuls points rouges (valeurs de courant hors du cadre), nous obtenons l'équation suivante : Y = 0,87 X + 1, qui montre un facteur de proportionnalité éloigné de celui de l'équation précédente représentant la corrélation entre le courant d'un détecteur polarisé à −300V et celui d'un détecteur polarisé à −500V, et permet d'identifier nettement les voies mauvaises parmi une population homogène de courants très bas. Enfin, la dispersion est plus forte à plus haute tension avec un écart-type de 97 pA (moyenne de 39 pA) au lieu de 10 pA à −300V (et une moyenne trois fois plus faible). Je conclus donc à une meilleure homogénéité des courants à plus basse tension.

La figure 5.9 montre les courants de fuite obtenus pour trois polarisations différentes (−300

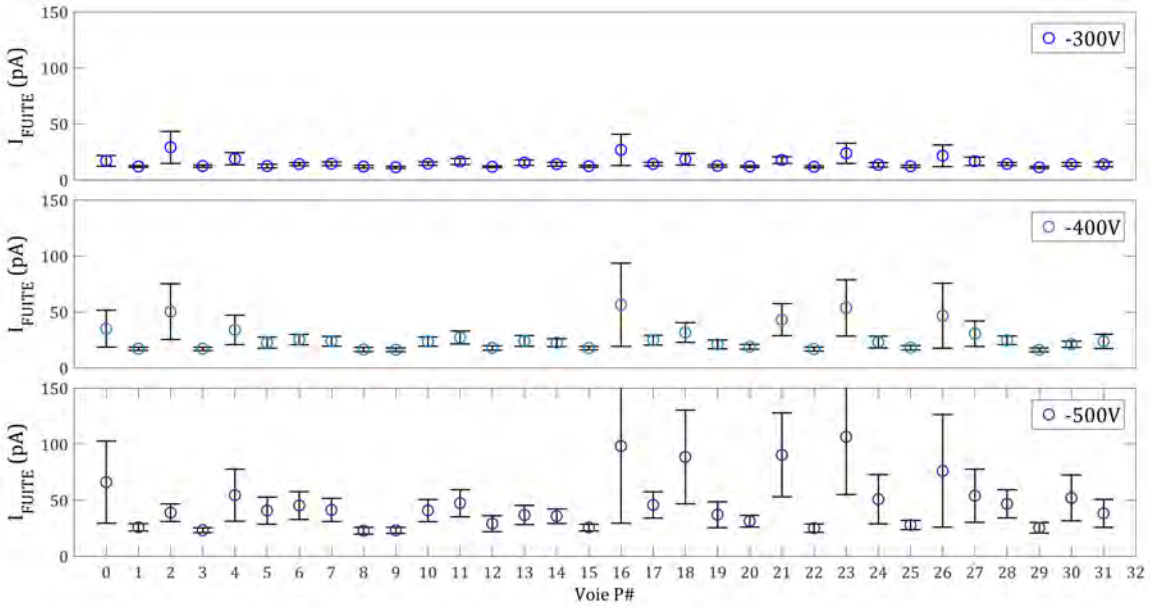


FIGURE 5.9 – Courant de fuite moyen selon la position des 32 voies de 51 Céramiques Détecteurs modèles de vol (soit 1632 détecteurs) polarisées à $-300V$ (graphe du haut), $-400V$ (graphe du milieu) et $-500V$ (graphe du bas).

V, −400 V et −500 V) en fonction des positions des 32 détecteurs CdTe, appelées P0 à P31.

Nous constatons que certaines positions (correspondant aux voies XRDPIX dans la suite du chapitre) ont des moyennes plus élevées, associées à des écart-types plus grands : P0, P16, P18, P21, P23, P26.

Ceci peut s'expliquer par une dégradation des arêtes des détecteurs selon l'outillage de leur placement (pour le process de collage) qui pourrait abîmer préférentiellement certaines positions. D'autre part, les positions avec les courants les plus forts sont aussi celles dont les détecteurs reposent sur les positions les plus capacitives, soit P0, P7, P8, P15, P16, P23, P24, P31.

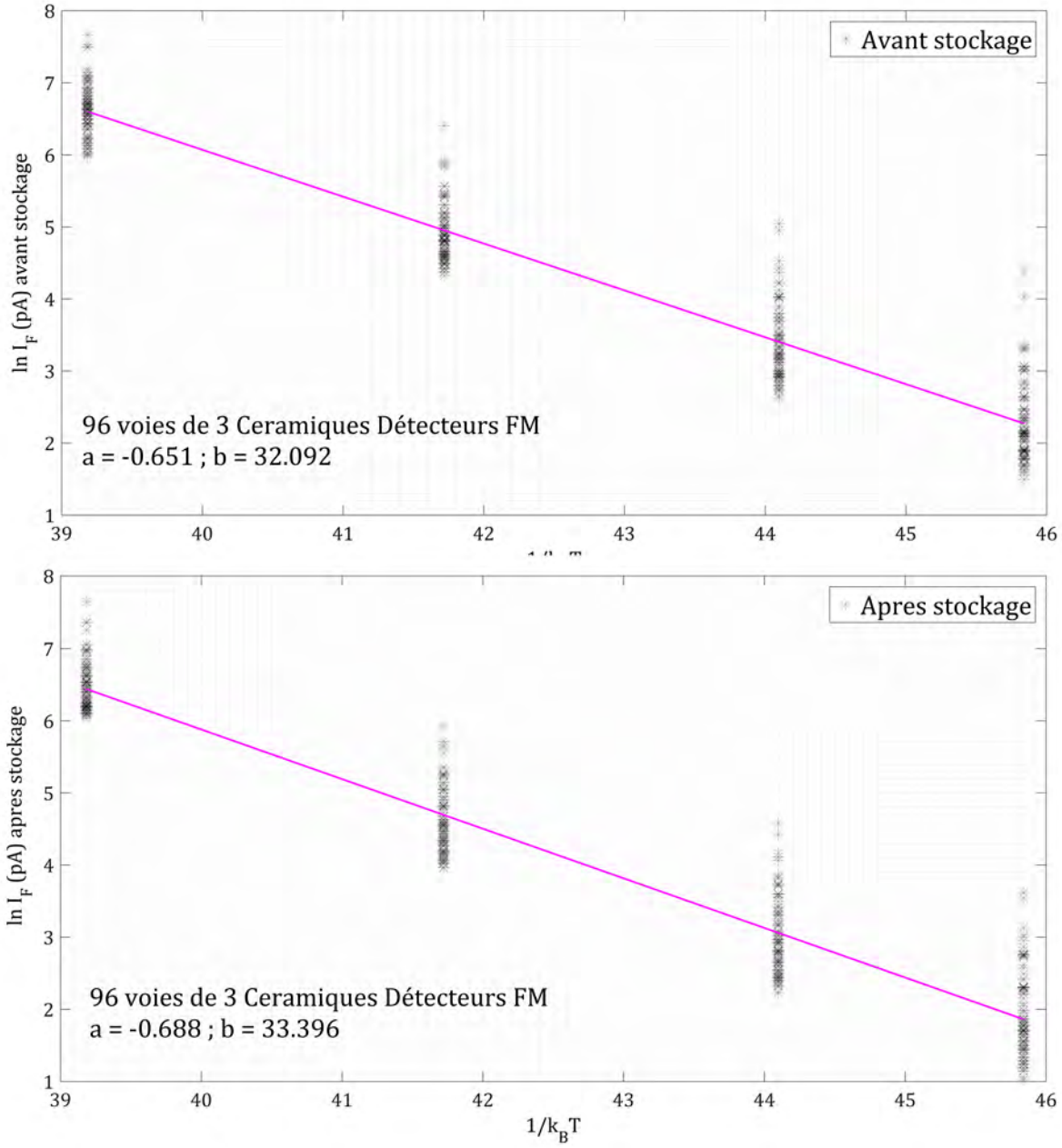


FIGURE 5.10 – Courant de fuite en fonction de la température (+23°C, +5°C, −10°C, −20°C) mesuré sur des détecteurs (96) de 3 Céramiques Détecteurs (modèle de qualification)polarisées à −300 V - Graphe du haut : Mesures avant la phase de dégazage / Graphe du bas : Mesures après la phase de dégazage.

Impact du stockage sur le courant de fuite

La figure 5.10 montre l'évolution des courants mesurés à quatre températures (+23°C, +5°C, −10°C et −20°C), avant et après une phase de stockage à +40°C des Céramiques Détecteurs pendant 1000 h. Cet essai fait partie de la file de qualification spatiale de ces sous-systèmes, et nous exposons ici l'impact du chauffage sur la valeur de l'énergie d'activation sur une population arbitraire de 96 détecteurs. En effet, nous pouvons observer une évolution de la valeur d'énergie d'activation, une fois que les trois Céramiques Détecteurs ont été stockées.

A partir de la formule F2.12 (section 2.2.2.3), nous pouvons évaluer l'énergie d'activation selon la relation :

$$I_F = I_0 \exp^{(-\delta E_A/k_B T)} \quad => \quad ln(I_F) = ln(I_0) \text{ - } (\delta E_A/k_B T)$$

avec :
— k_B : constante de Boltzmann ($8,617.10^{-5}$ $eV.K^{-1}$)
— T : température (K)

En traçant la courbe ln(I_F) en fonction de la variable $1/k_B T$, j'obtiens l'énergie d'activation qui est alors le coefficient directeur de la droite ('a' sur la figure 5.10) obtenue par régression linéaire des quatre moyennes des 96 courants de fuite pour chaque température de test. L'énergie d'activation a augmenté, passant de 0,651 $\pm 0,030$ eV à 0,688 $\pm 0,038$ eV. Cette augmentation traduirait ainsi une baisse de l'agitation thermique, à l'origine du bruit intrinsèque des détecteurs, correspondant à la mesure d'un courant continu dans le noir. Cependant, nous pourrions calculer δE_A à partir d'un plus grand nombre de courants, pour réduire l'erreur statistique.

Finalement, les essais que j'ai menés ont montré des résultats positifs après le stockage à +40°C des Céramiques Détecteurs, avec des valeurs de courant de fuite diminuées (en moyenne, nous obtenons une baisse de 25 %). De plus, avec moins de 1 % de voies supérieures à 100 pA, et une médiane de 10 pA à la température de −20°C (avant une phase de dégazage qui va améliorer les courants), c'est la polarisation de −300 V qui apparaît être la meilleure configuration de mesure, pour éviter un niveau de bruit détecteur trop élevé.

Néanmoins, en calculant les coefficients de variation (σ/μ) des populations de courants inférieurs à 100 pA, nous voyons qu'il est plus bas à la polarisation la plus élevée de −500V, à savoir un coefficient de 0,68 contre 0,71 à −300V , démontrant une homogénéité légèrement meilleure à plus haute tension. La différence reste très faible et ces valeurs montrent une forte dispersion dans les deux cas. C'est pourquoi je pense que la tension −300V sera la plus adaptée dans le cas de notre projet.

Impact de la lumière sur le courant de fuite

Pour évaluer l'impact de la lumière sur les détecteurs CdTe, j'ai étudié les courants de fuite sur un échantillon de Céramiques Détecteurs positionnées sous un éclairement lumineux variable. De plus, j'ai mesuré le temps de pause nécessaire pour que le courant de fuite revienne à son niveau initial, dans le noir. Les essais ont été réalisés à température ambiante (24°C) et à pression atmosphérique, dans un cas 'limite' de polarisation des détecteurs (−600 V), correspondant, en début de projet, à la valeur maximale que la haute tension fournissait.

La figure 5.11 (graphe du haut) met en évidence une augmentation élevée du courant

de fuite (facteur ≈ 200), en plaçant les détecteurs CdTe dans des conditions d'éclairement important (jusqu'à 660 lux). D'ailleurs, même avec un éclairement très faible (6 lux), nous constatons déjà un courant de fuite d'environ dix fois plus élevé, ce qui aura pour conséquence de saturer l'ASIC et rendra toute observation impossible.

En outre, nous voyons qu'il faudrait 15 h de repos afin que les détecteurs retrouvent totalement leurs caractéristiques d'avant éclairement (Fig. 5.11). Pour autant, 4 heures suffiraient à l'obtention d'une mesure de courant de fuite correcte, malgré une augmentation de 10 % à température ambiante. Dans la pratique, pour réaliser tous nos essais au sol et caractériser de façon optimale plus de 14000 détecteurs CdTe, j'ai spécifié 15 h de pause, avec, par exemple, la mise en place des Céramiques Détecteurs dans l'enceinte sous obscurité la veille des mesures.

Ainsi, les XRDPIX de l'instrument ECLAIRs doivent être totalement dans le noir afin de ne pas détériorer la performance de seuil bas à 4 keV spécifiée par la mission, et assurer un maximum d'homogénéité des courants de fuite des détecteurs, fortement dégradée en présence de lumière.

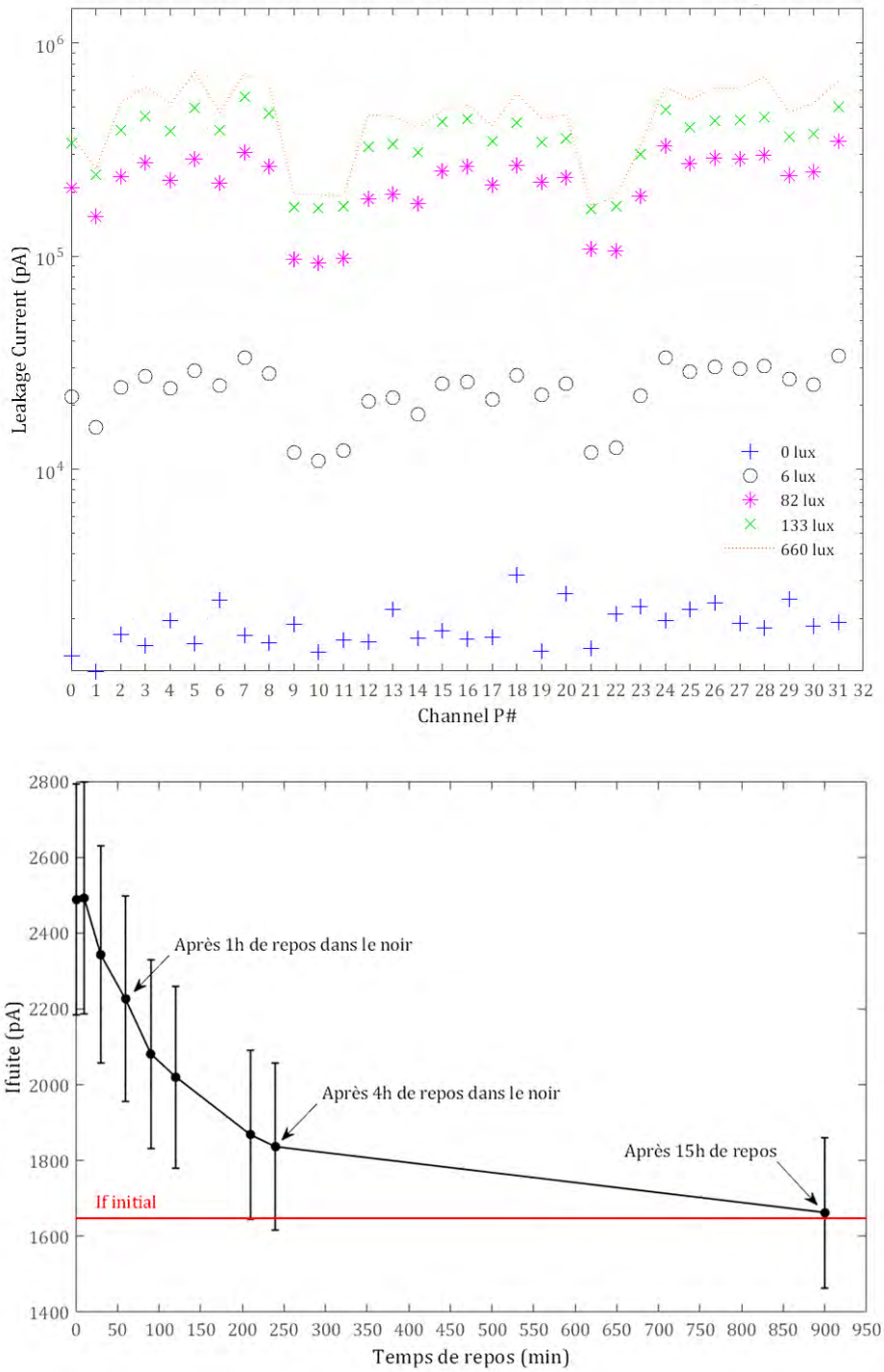


FIGURE 5.11 – Graphe du haut : Courant de fuite des 32 détecteurs d'une Céramique Détecteurs en fonction du flux lumineux / Graphe du bas : Courant de fuite moyen d'une Céramique Détecteurs en fonction du temps de repos après une exposition lumineuse. Les 32 détecteurs ont été polarisés à −600 V et testés à température ambiante.

5.2.3 Les performances des Céramiques ASIC

FIGURE 5.12 – Images du banc de test permettant les mesures de gain et de bruit ENC des Céramiques ASIC - Gauche : Enceinte thermique pour la régulation à $-20°C$ dans laquelle est montée le circuit de test d'une « Céramique ASIC » 32 voies / En haut à droite : banc de test électronique connecté à un générateur de signal arbitraire / En bas à droite : Céramique ASIC montée sur son circuit de test comprenant un support mécanique avec maintien par visserie sur tige filetée et câble spécifique pour effectuer l'alimentation, le contrôle et la commande des puces ASIC.

Dans ce paragraphe sont présentées les performances, à savoir les gains et les bruits, observées sur plusieurs milliers de voies des Céramiques ASICs(4.2.4). Mon analyse s'appuie sur des mesures qui ont été effectuées sur des pièces de niveau FM (modèles de vol) grâce à un banc de test électronique très faible bruit, développé spécifiquement pour le projet ECLAIRs et majoritairement automatisé (Fig. 5.12).

Au moyen d'un générateur de signal arbitraire connecté à l'entrée V_{TEST} du préamplificateur de l'ASIC, nous injectons un signal en tension, via une capacité d'injection C_{TEST} interne à l'ASIC (de 200 fF), une charge connue en entrée (Q_{IN}), représentative d'une impulsion en énergie. Nous obtenons en sortie de chaîne d'acquisition, des spectres en tension, qui nous permettent d'en déduire le bruit total, auquel nous soustrayons le bruit connu de la chaîne d'amplification et de conversion analogique-numérique. Enfin, nous déterminons le gain et le bruit ASIC après avoir extrait les coefficients du rapport tension de sortie sur charge en entrée, et les largeurs à mi-hauteurs des spectres dont la position dépend de la charge injectée.

Lors d'une première série de Céramiques ASIC, nous avons mesuré les gains et les bruits

des 32 voies pour quatre valeurs de peaking time (0,95 µs / 2,6 µs / 4,4 µs / 6,8 µs) à deux températures : +23°C et −20°C. Pour les modèles suivants, les cas de configurations de test ont été réduits à une seule température (température mission : −20°C régulée) et à deux valeurs de peaking time (2,6 µs / 4,4 µs), qui apparaissent comme les valeurs optimales pour obtenir les performances en résolution spectrale (Fig. 5.14).

Au total, près de 8000 voies ont été mesurées et analysées, suivant la même méthode : nous avons injecté deux impulsions en entrée de la chaîne de test (comme décrit précédemment) à une fréquence de 200 Hz et avec des amplitudes de 5 et 10 mV. Pour obtenir le bruit ENC, nous avons calculé les valeurs de FWHM des deux pics ($\text{FWHM}_{[Pic1]}$ et $\text{FWHM}_{[Pic2]}$) acquis après la conversion analogique/numérique des niveaux d'injection, puis nous en avons fait la moyenne FWHM_{mean} (Fig. 5.13).

Le bruit de chaque voie ASIC ENC_{ASIC} s'exprime alors comme le rapport de FWHM_{mean} sur le gain, et s'écrit ainsi :

$$\text{ENC}_{ASIC} = \frac{FWHM_{mean}}{2,35 * Gain * e}$$

avec :

— ENC_{ASIC} (e- RMS)
— FWHM_{mean} (mV)
— Gain (mV/C)
— e : charge élémentaire d'un électron (1,602.10^{-19} C)
— 2,35 : correspond au facteur reliant la largeur à mi-hauteur avec l'écart-type

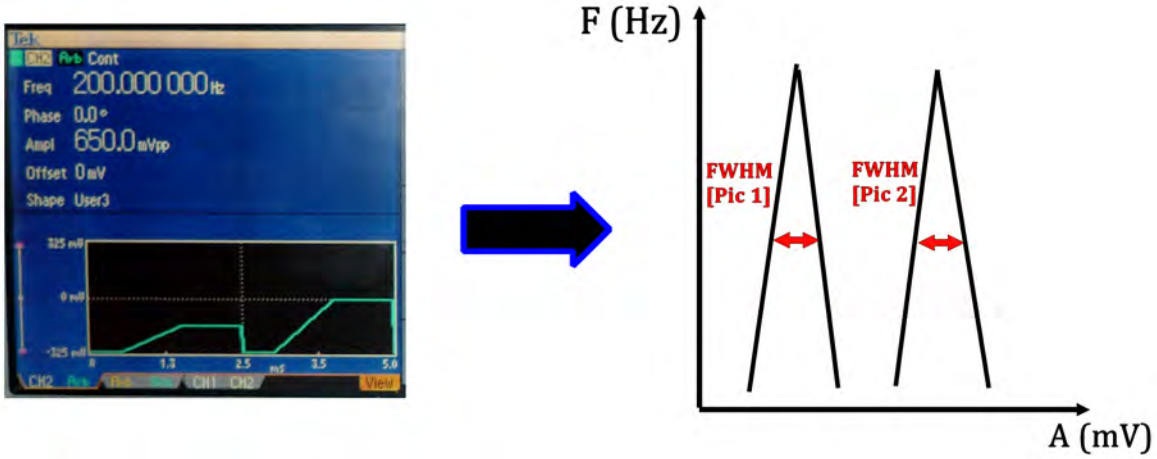


FIGURE 5.13 – Signaux en entrée d'un ASIC, envoyés sur chacune de ses 32 voies, par le biais du signal V_{TEST} : ils sont créés « sur mesure » au moyen d'un générateur arbitraire bas bruit, pour représenter des impulsions en sortie d'un détecteur CdTe. Les pics en sortie de chaîne électronique (après les différents étages électroniques ASIC + amplification externe + conversion analogique-numérique) sont illustrés ici par deux pics idéaux de même fréquence, et de niveaux d'amplitude doublés l'un par rapport à l'autre.

Le gain (tension de sortie / charge d'entrée) s'obtient en faisant le rapport de la différence des canaux des 2 pics, multipliée par le pas du CAN, avec la différence des amplitudes des 2 signaux d'entrée, multipliée par la capacité de test :

$$\text{Gain (mV/fC)} = \frac{V_{OUT}}{Q_{IN}} = \frac{(\Delta CANAUX * 1\ pas\ ADU)}{\Delta U * C_{TEST}}$$

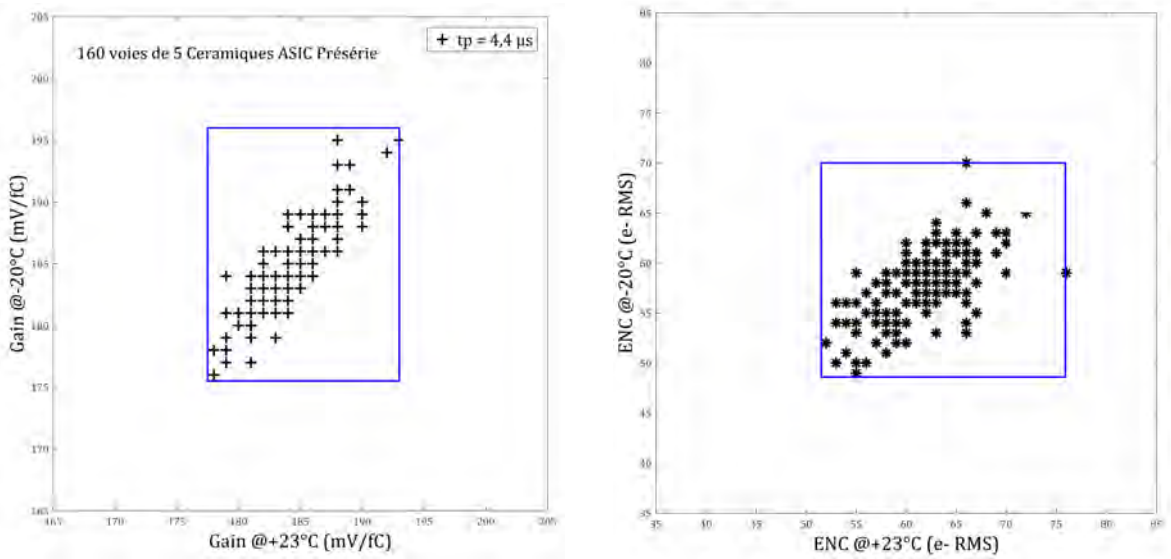


FIGURE 5.14 – Figure de gauche : Comparaison des mesures de gain obtenues pour deux valeurs de température +23°C et −20°C / Figure de droite : Comparaison des mesures du bruit ENC obtenues à ces deux valeurs de température - 160 voies de 5 Céramiques ASIC Présérie (modèles de qualification).

Nous observons sur les graphes de la figure 5.14 une moyenne des gains à +23°C similaire à celle des gains mesurés à −20°C, de 185±4 mV/fC. Pour ce qui est du bruit ENC, la moyenne (sur 160 voies ASIC) diminue de près de 6 % quand les mesures sont effectuées à froid, tout en maintenant un écart-type de 4 e- RMS.

La distribution de 2144 valeurs ENC mesurées sur l'ensemble des Céramiques ASICs FM de la série 1, aux deux peaking time de 2,6 µs et 4,4 µs, est montrée au travers des histogrammes de la figure 5.15. Ainsi, nous voyons que la majorité des valeurs ENC se situe autour de 62 ±6 e- rms à 4,4 µs et autour de 70 ±5 e- à 2,6 µs, avec une distribution, de largeur un peu inférieure.

Dans le cas de ces valeurs de peaking time paramétrées, nous remarquons des valeurs de bruit ASIC plus élevées au peaking time le plus bas, ce qui est conforme avec ce que j'avais pu observer en phase de prototypage, lors de mesures préalables de bruit de trois Céramiques ASIC, en fonction de huit valeurs de peaking time (Fig. 5.17).

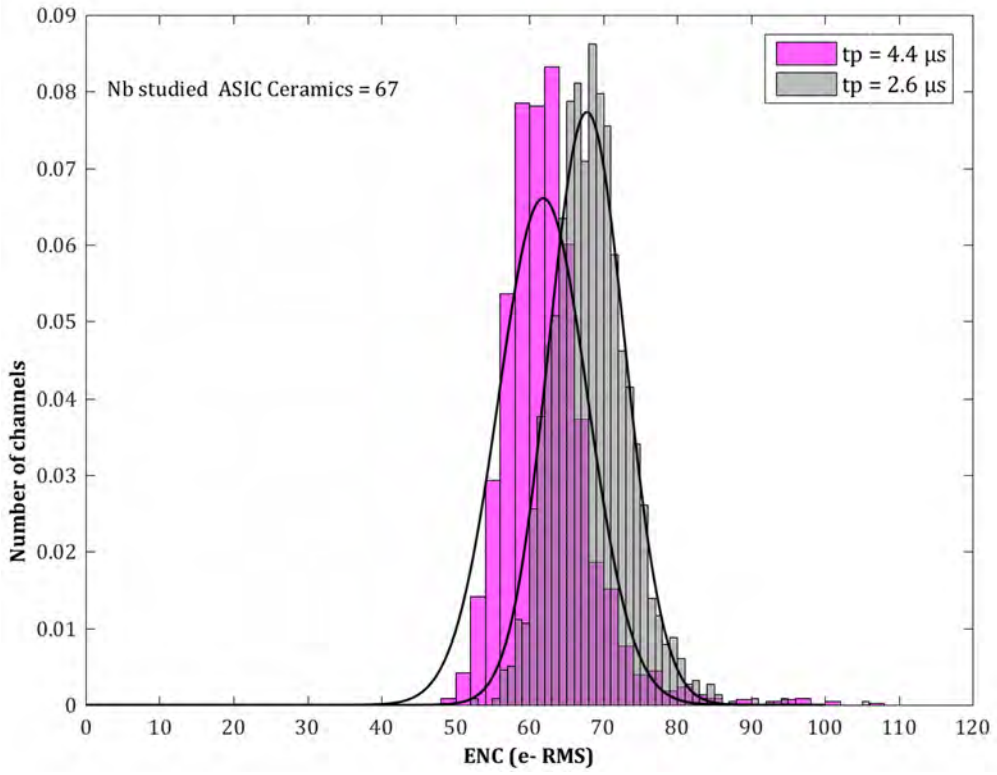


FIGURE 5.15 – Histogramme des bruits ENC de 67 Céramiques ASIC modèles de vol (soit 2144 voies) aux valeurs de peaking time de l'ASIC 2,6 µs (gris) et 4,4 µs (magenta).

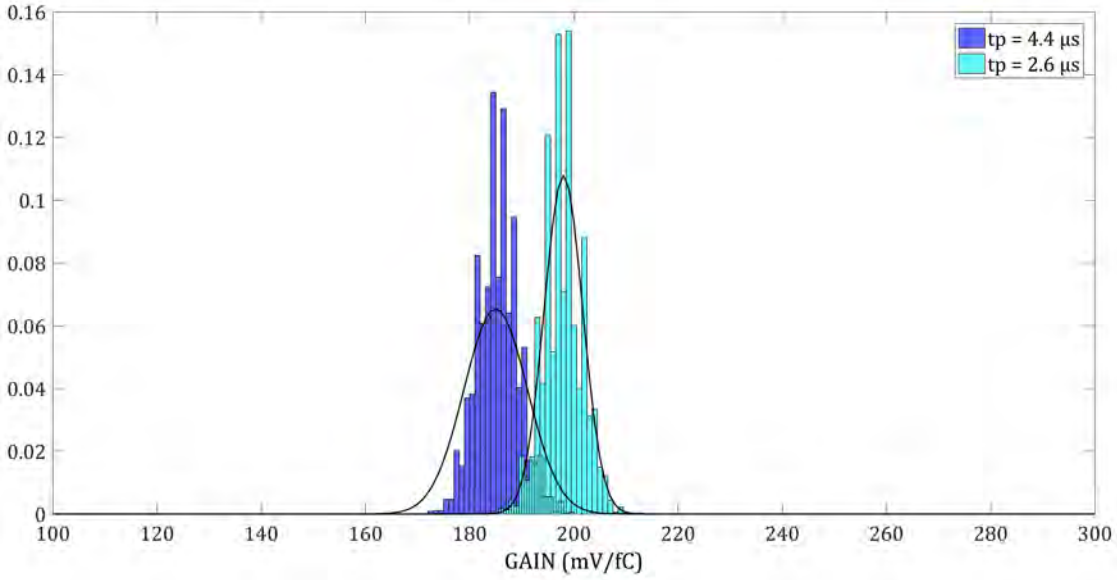


FIGURE 5.16 – Histogrammes des gains aux valeurs de peaking time de l'ASIC 2,6 µs (cyan) et 4,4 µs (bleu) pour une partie des Céramiques ASIC FM de la série 2 (3616 voies mesurées). Les histogrammes ont été normalisés selon une fonction de densité de probabilité ; la hauteur de chaque barre est donnée par le produit de la largeur de l'intervalle (barre) par le rapport du nombre de gains dans l'intervalle sur le nombre total des gains. L'addition des aires des barres de l'histogramme est égale à 1.

La figure 5.16 montre les histogrammes des gains de 3616 voies de 113 Céramiques ASICs de la série 2 aux valeurs de peaking time 4,4 µs (bleu) et 2,6 µs (cyan), avec leurs fonctions gaussiennes correspondantes.

Pour pouvoir comparer deux distributions avec le même nombre de données, j'ai dû, dans cet exemple, utiliser seulement la moitié des mesures de gain de la série 2, qui compte 226 Céramiques ASIC. En effet, les statistiques sont différentes selon le peaking time, à savoir 7232 gains à 4,4 µs contre 3616 gains à 2,6 µs pour une même phase de développement (série 2 ici), ce qui s'explique de la manière suivante : durant la série 1, nous avons rencontré un problème d'augmentation anormale du bruit ENC au cours des mesures à SAFRAN ; dans un souci de compréhension, j'ai décidé, au début de la série 2, de réaliser des mesures redondantes de gain et bruit à un même peaking time (en l'occurrence 4,4 µs), tout en maintenant la cadence de test, ce qui impliquait de ne pas faire de mesures à 2,6 µs pendant une certaine durée de la phase de série 2. C'est la raison pour laquelle les deux histogrammes présentés dans la figure 5.16 s'appuient sur 113 Céramiques ASIC plutôt que 226.

Nous pouvons observer que le coefficient de variation est très bas, respectivement de $\approx 0{,}021$ à 4,4 µs et de $\approx 0{,}017$ à 2,6 µs. La distribution du gain électronique des Céramiques ASIC à ces deux valeurs de peaking time et à la température de $-20°C$, est donc très homogène, assurant une faible dispersion des gains des 200 modules XRDPIX de la caméra, et permet de garantir une forte stabilité de calibration en vol.

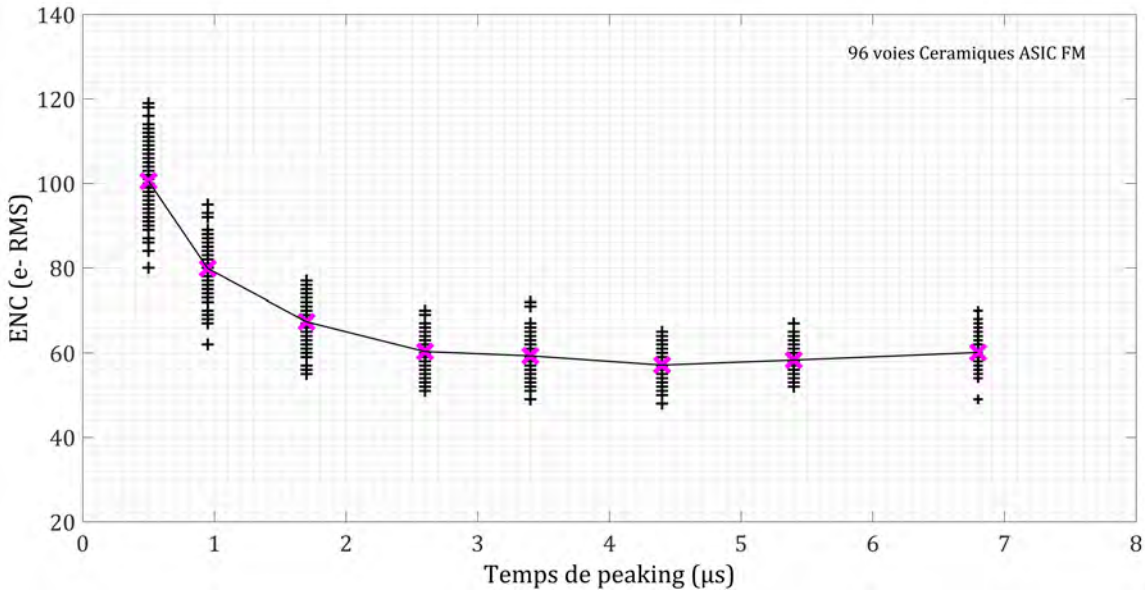


FIGURE 5.17 – Bruit ENC de 3 Céramiques ASICs, avec la moyenne arithmétique de 96 valeurs (marqueurs magenta) en fonction du peaking time (8 valeurs).

En tout début de projet, j'ai réalisé une étude approfondie de la puce ASIC, d'abord seule, puis intégrée à sa céramique HTCC. Sachant le nombre très important de tests qu'il faudrait faire, et ce pendant plusieurs années, sollicitant plusieurs équipes techniques et notamment, des industriels, j'ai dû étudier la faisabilité des essais dans un temps réduit et optimal ; c'est la raison pour laquelle, après plusieurs itérations avec la société SAFRAN, et en m'appuyant sur la connaissance de ces tests de Céramiques ASIC (durée des essais avec le banc, développement spécifique d'un logiciel pour minimiser le temps, procédure encadrée et quasi-automatique,

premières performances obtenues dans toutes les configurations de peaking time), j'ai sélectionné, assez tôt dans la phase de présérie des modules XRDPIX, seulement quatre puis deux valeurs de peaking time sur huit programmations possibles.

J'ai alors caractérisé l'ASIC en fonction de ce paramètre majeur, puis comparé avec les simulations faites par l'équipe du CEA, pour connaître les peaking time les plus adaptés au projet ECLAIRs, en combinant un faible ENC, avec un gain suffisant et stable, et tout cela en tenant compte de la spécification forte d'homogénéité inter-voies.

Nous pouvons voir grâce à la figure 5.17 que le bruit est plus élevé à très faible peaking time. De plus, nous voyons que les deux peaking time sélectionnés pour valider les Céramiques ASICs à grande échelle, sont les meilleurs candidats pour un ENC minimal ; en effet nous retrouvons des valeurs comprises entre 50 et 68 e- RMS à 4,4 µs, ce qui est comparable aux mesures des Céramiques ASIC de vol, et entre 52 et 70 e- RMS à 2,6 µs, ce qui, dans ce cas, montre une différence, avec une gamme de valeurs légèrement plus basse. Ce bruit plus faible (Fig. 5.17) peut s'expliquer pour deux raisons : la différence de statistiques, de 96 voies ASIC mesurées durant la phase de prototypage, contre 2144 voies ASIC pendant la série 1 (Fig. 5.15), et des problèmes de bruit amené par le générateur de signal en cours de série 1, ce qui a été réglé pour la phase série suivante (série 2).

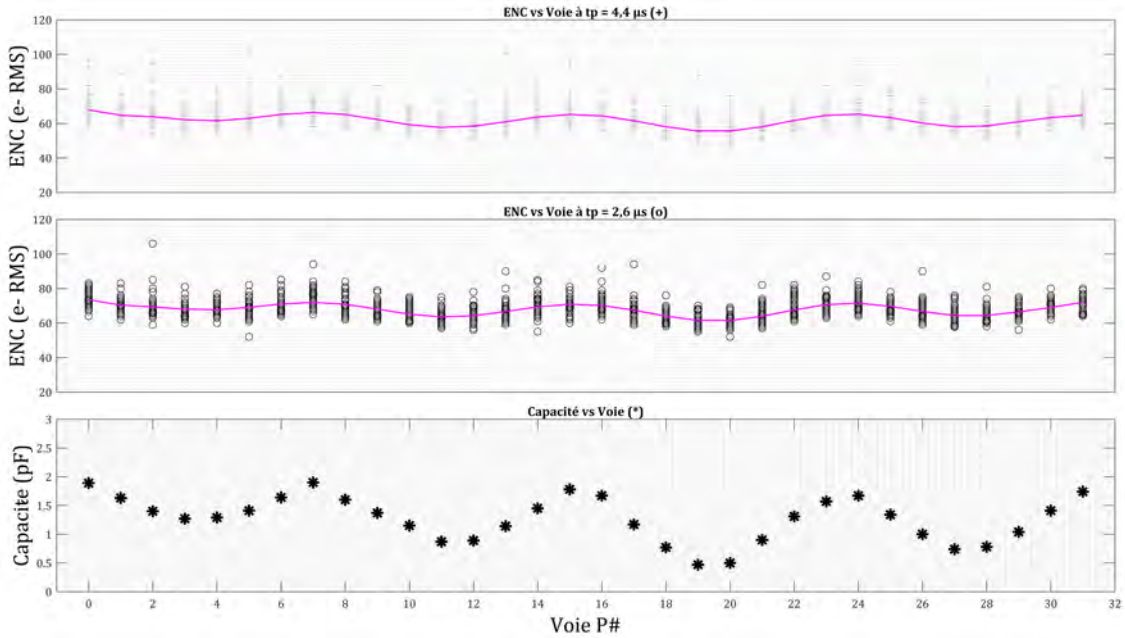


FIGURE 5.18 – Bruit ENC pour les 32 voies de 67 pièces Céramiques ASICs à 2 valeurs de peaking time - Figure du haut : tp = 4,4 µs / Figure du milieu : tp = 2,6 µs / Figure du bas : capacité par voie d'un substrat céramique nu.

La figure 5.18 permet d'observer une forte corrélation entre les capacités mesurées sur un substrat nu (avant le collage de la puce ASIC) et les mesures de bruit effectuées sur les Céramiques ASICs (une fois que la puce 32 voies est collée. D'ailleurs, si on soustrait les variables dépendant des détecteurs dans la formule F4.2 précédemment citée, nous voyons que l'ENC_{TOTAL} dépend directement de la capacité équivalente de chaque voie. L'équation devient ainsi :

$$\mathrm{ENC}^2_{\mathrm{TOTAL}} = (\mathrm{A}^2/\mathrm{t_p} + \mathrm{B}^2) \times \mathrm{C}^2_{\mathrm{TOTAL}}$$

Le design est donc essentiel pour la maîtrise de la performance finale.

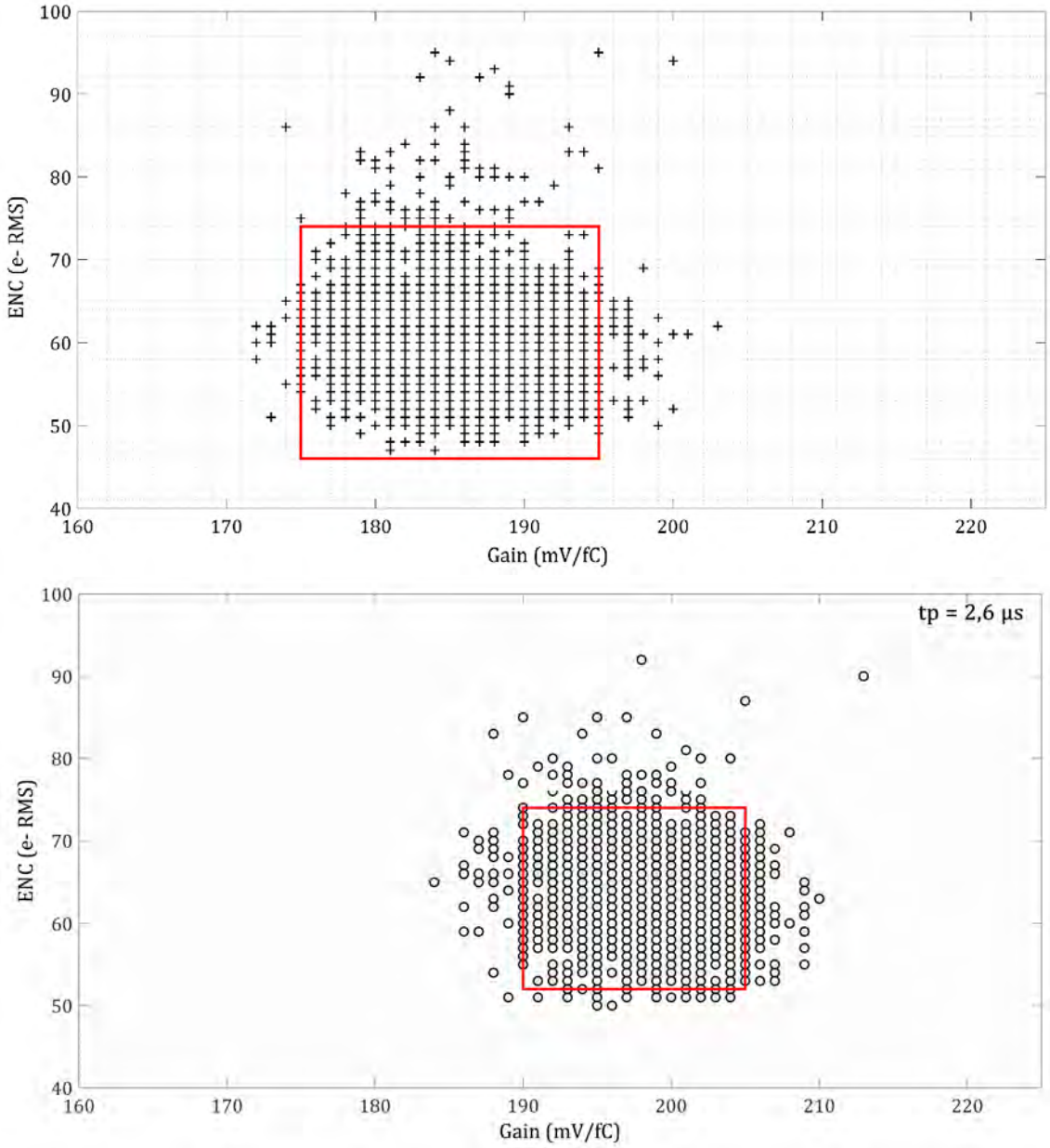


FIGURE 5.19 – Bruit ENC en fonction du gain - Graphe du haut : 7232 voies mesurées au peaking time 4,4 µs à $-20°C$ (226 Céramiques ASIC série 2) / Graphe du bas : 3616 voies mesurées au peaking time 2,6 µs à $-20°C$ (113 Céramiques ASIC série 2).

Pour sélectionner les Céramiques ASIC, nous déterminons les voies les plus mauvaises pour éviter de les contre-coller à des Céramiques Détecteurs dont les voies les plus mauvaises en courant seraient aux mêmes positions.

Ici, la figure 5.19 montre les mesures de bruit en fonction de celles du gain ; une boîte d'acceptance (en rouge) permet d'écarter les voies dont les ENC sont supérieurs à 74 e-, ce qui reste assez tolérant, pour ne pas dégrader la valeur finale de seuil bas en énergie. Nous voyons alors que plus de 96 % des voies (parmi 7232 voies ASIC) répondent à ce critère, à tp = 4,4 µs. La même figure, mais cette fois-ci pour des Céramiques ASIC programmées au peaking time de 2,6 µs (graphe du bas), donne 90,4 % de 3616 voies à l'intérieur de la boîte.

Là où nous observons des mesures de gain resserrées, avec des valeurs comprises entre 175 et 200 mV/fC à 4,4 µs, nous voyons davantage de dispersion dans les mesures de bruit, avec une groupe majoritaire s'échelonnant de 58 à 69 e- et un groupe minoritaire qui se disperse vers des plus hautes valeurs (jusqu'à 95 e- RMS). C'est donc ce paramètre clé que nous avons retenu pour sélectionner les Céramiques ASIC et écarter celles qui avaient les valeurs d'ENC les plus élevées, ou a minima pour ne pas les appairer avec des voies de Céramiques Détecteurs donc les courants seraient eux-aussi élevés.

5.2.4 L'étude du couplage des sous-ensembles

En se basant sur la formule de modélisation du bruit (section 5.2.1), en prenant l'hypothèse d'un courant de fuite de 100 pA, d'un peaking time de 4,4 µs, et d'une capacité totale de $\approx 9,3$ pF (avec une capacité de détecteur CdTe de 1,8 pF, une capacité en entrée ASIC de 3,84 pF et une capacité équivalente des deux substrats de 3,63 pF correspondant à la moyenne additionnée d'un écart-type), nous pouvons estimer une valeur de FWHM de 1,29 keV pour le pic à 60 keV et un seuil bas à 6 sigma aux environs de 3 keV.

Pour optimiser les performances de chaque module XRDPIX, et surtout homogénéiser au maximum les valeurs de seuil bas inter-voies et de résolution spectrale, j'ai imaginé une méthode de couplage des Céramiques Détecteurs avec des Céramiques ASIC. Lors de la présérie, je devais associer chacune d'elle, une à une, après les avoir étudiées indépendamment. Au vu de la lourdeur et de la complexité de cette activité, il s'est avéré indispensable de l'automatiser. C'est pourquoi, après plusieurs études algorithmiques, comprenant des phases de validation, un outil logiciel spécifique a été développé, dans le but de réduire au maximum la dispersion des 32 voies d'un même module XRDPIX.

C'est ainsi qu'au fil du projet, nous avons légèrement modifié l'algorithme de couplage pour l'optimiser à chaque nouvelle phase : le prototypage au moyen d'un couplage manuel, puis la présérie avec une première version d'algorithme automatique et enfin la série, avec un algorithme abouti.

Le principe de cet algorithme est le suivant : nous sélectionnons les voies identifiées comme les plus mauvaises en courant de fuite de chaque Céramique Détecteurs puis nous sélectionnons les meilleures voies en termes d'ENC des Céramiques ASIC, pour éviter d'associer une voie détecteur bruyante avec une voie ASIC également bruyante.

Nous commençons par écarter les Céramiques ASIC dont on a pu observer des problèmes technologiques (lors des essais de LAT -Test de Lot- par exemple, ou bien des fuites lors du test d'herméticité) ou des problèmes fonctionnels (lors des essais électriques).

De ce premier groupe, nous supprimons de l'algorithme de sélection les Céramiques ASICs ayant les moyennes et les écart-types d'ENC les plus élevés aux deux valeurs de peaking time de 2,6 µs et 4,4 µs parmi un nombre de Céramiques ASICs déterminé au départ (nombre défini par le nombre de modules XRDPIX que nous souhaitons obtenir). Nous étudions ensuite un groupe plus restreint des meilleures Céramiques ASIC puis relevons leurs meilleures voies montrant une valeur de bruit ENC inférieur à 60 e- rms à la température de $-20°$C, et au

peaking time 4,4 µs. En parallèle, nous analysons les Céramiques Détecteurs : nous supprimons d'abord celles qui montrent au moins 4 voies mauvaises, dans le sens où elles présentent un courant de fuite supérieur à 100 pA, à la température de −20°C, et à la tension de −400 V. Enfin, nous confrontons chaque céramique pour les coupler, puis les faire contre-coller, en attribuant à la Céramique Détecteurs, la première Céramique ASIC disponible, tout en débutant par la Céramique Détecteurs ayant le plus de voies mauvaises (la plus difficile à appairer).

Les figures 5.20 et 5.21 illustrent le résultat de cette méthode de couplage pour deux modules XRDPIX différents.

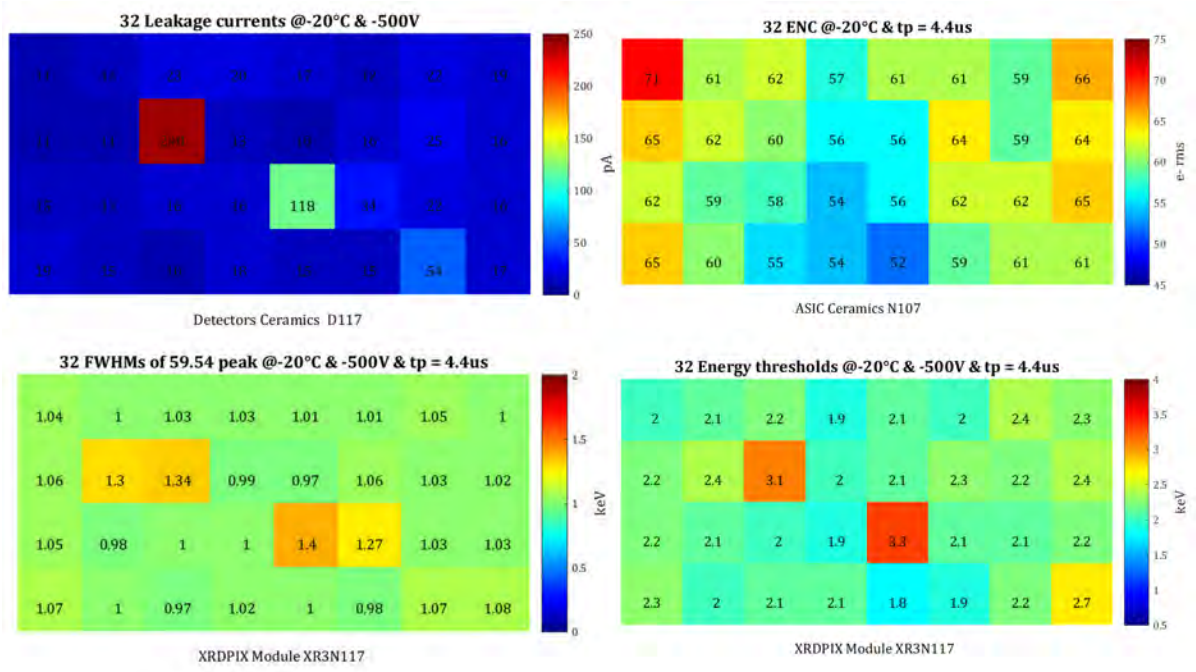


FIGURE 5.20 – Images du haut : matrice des courants de fuite d'une Céramique Détecteurs polarisée à −500 V (à gauche) et matrice des valeurs ENC d'une Céramique ASIC programmée à 4,4 µs (mesures effectuées avant le couplage, c'est à dire avant le collage d'une Céramique Détecteurs avec une Céramique ASIC) / Images du bas : matrices de 32 valeurs de FWHM du pic à 59,5 keV (à gauche) et 32 valeurs de seuils bas en énergie (à droite) du module XRDPIX obtenu après couplage, dans la configuration (−500 V ; 4,4 µs).

En premier point, je confirme que le courant de fuite a un impact plus important sur la dégradation des performances que le bruit électronique ENC. Ainsi, les deux détecteurs montrant des courants élevés de 240 pA (voie en position P10) et 118 pA (voie P20), si nous les comparons à une moyenne de 28 pA et un écart-type de 8 (sans les voies singulières), élèvent les résolutions et les seuils en énergie donnant respectivement des valeurs de FWHM de 1,34 keV et 1,4 keV (pour une moyenne de 1,06 keV et un écart-type de 0,11) et des seuils de 3,1 keV et 3,3 keV (pour 2,21 keV de moyenne et un écart-type de 0,31 keV). Cependant, en les associant à une voie avec un ENC plus élevé, nous aurions obtenu des performances spectrales encore plus dégradées.

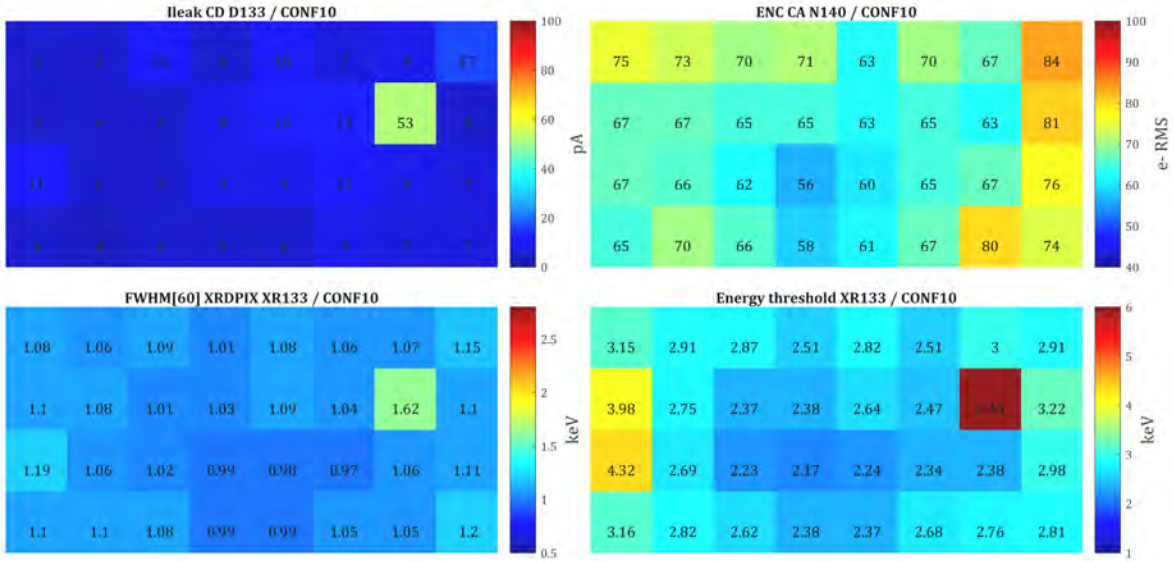


FIGURE 5.21 – Vue matricielle d'un module XRDPIX FM (XR133), montrant 4 mesures de performance - Image en haut à gauche : matrice des courants de fuite à HT = −300 V de la Céramique Détecteurs avant contre-collage / Image en haut à droite : matrice des valeurs ENC mesurées au tp = 2,6 µs de la Céramique ASIC avant contre-collage / Images en bas à gauche : matrice de 32 valeurs de FWHM du pic à 59,5 keV / Images en bas à droite : matrice de 32 valeurs de seuils bas en énergie en configuration (−300 V ; 2,6 µs) du module XRDPIX final correspondant aux CD/CA contre-collées.

Si j'avais choisi une autre Céramique ASIC que la N107 avec une voie P10 dont le bruit aurait été plus élevé, l'estimation (formule F4.3, avec tp = 4,4 µs) aurait donné une FWHM de 1,5 keV (soit 0,2 keV de plus) pour un courant de 240 pA si l'ENC était alors de 71 e- (au lieu de 60 e- mesuré dans ce cas de la voie P10 de la Céramique ASIC N107), valeur correspondant à la voie la plus bruyante (P0) de cette Céramique ASIC (Fig. 5.20).

En résumé, cela signifie que nous avons réussi à améliorer l'homogénéité des modules de détection grâce à nos travaux sur le couplage.

Plus localement, en étudiant un module XRDPIX de façon unitaire, ainsi que les performances de la Céramique Détecteurs et de la Céramique ASIC seules, avant qu'elles ne soient contre-collées, nous voyons distinctement que, lorsqu'un détecteur montre un courant très élevé par rapport aux autres détecteurs de la même matrice, il aura un impact négatif sur la performance finale, à savoir la FWHM et le seuil bas en énergie.

En prenant la voie P14 pour exemple (cas de deux modules XRDPIX différents XR133/FM et XR3N005/QM des figures 5.21 et 5.22), nous constatons qu'elle montre un courant élevé par rapport au 31 autres détecteurs de la même Céramique Détecteurs (respectivement D133/Série et D022/Présérie) dans les configurations (−300 V ; 2,6 µs) et (−400 V ; 4, 4 µs). Dans le cas du module XR133, cette voie détecteur témoigne d'une FWHM bien supérieure à la moyenne (1,62 keV) et d'un seuil bas en énergie très haut (6,48 keV).

De plus, nous voyons que, toujours dans le cas de la figure 5.21 montrant les performances du module FM XR133, le problème provient d'une valeur relative plus que d'une valeur absolue, car le courant est en dessous de notre valeur seuil de 100 pA, mais bien au dessus de

la moyenne de la Céramique Détecteurs. Plusieurs explications peuvent être envisagées, et je pense d'abord à un biais de mesure du courant de fuite sur les Céramiques Détecteurs ; ainsi, la haute tension, commune aux 32 détecteurs d'une même Céramique Détecteurs, peut être inférieure à la valeur de consigne théorique (tension appliquée manuellement) conduisant à des valeurs de courant plus basses qu'attendues. Je pense aussi à une réduction de la pression de l'interface de test « pointe » sur les faces des détecteurs (côté anode) affaiblissant la connexion (fixation manuelle), qui pourrait diminuer les 32 signaux de sortie d'une même Céramique Détecteurs. Pour autant, cette hypothèse me paraît peu probable.

Somme toute, je me suis attachée à réaliser une sélection de couplage « sur-mesure », ajoutant à une étude globale de chaque Céramique Détecteurs (moyenne et médiane des 32 courants de fuite) une étude individuelle de chacun de ses détecteurs (avec une voie singulière montrant un courant anormalement élevé par rapport aux 31 autres par exemple, même si la moyenne est acceptable), pour identifier les voies apparaissant mauvaises dès cette étape de développement, en amont de la phase finale du module XRDPIX. En effet, le moyen de test permet de mesurer les 32 détecteurs dans des conditions identiques, et d'en assurer une grande fiabilité, mais peut induire des différences entre Céramiques Détecteurs, ce qui m'a confortée dans le choix d'une étude plus relative qu'absolue, et d'approfondir l'analyse au delà d'une simple valeur seuil à ne pas excéder (de 100 pA dans notre cas).

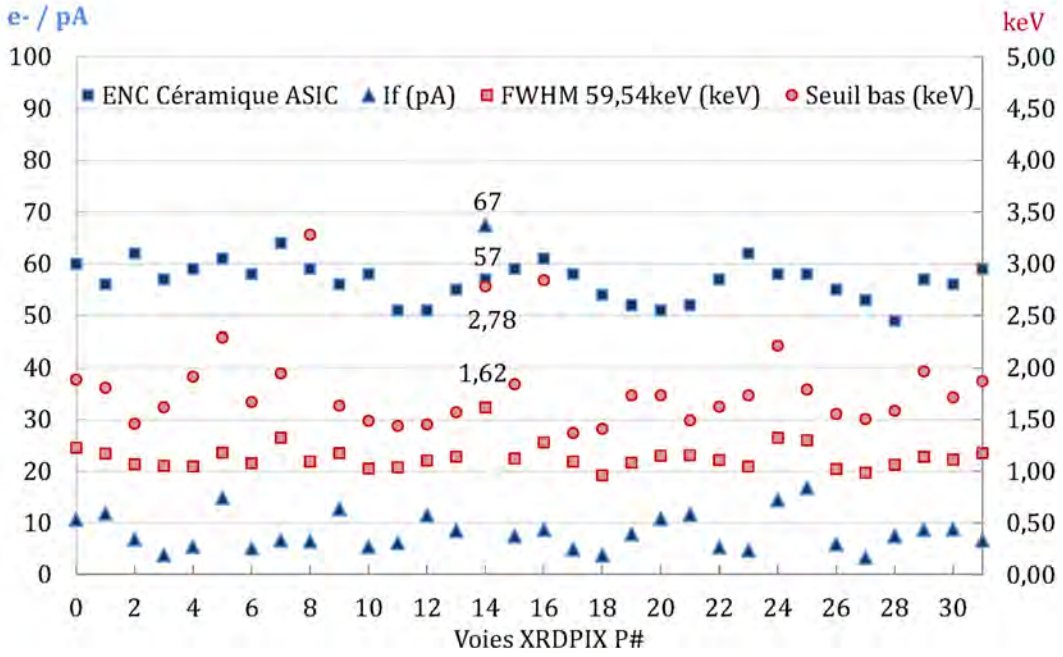


FIGURE 5.22 – Exemple des performances des 32 voies d'un module XRDPIX en version prototype (XR3N005) - Courants de fuite à HT = −400 V de la Céramique Détecteurs avant contre-collage (marqueurs carrés bleus) / Valeurs ENC mesurées au tp = 4,4 µs de la Céramique ASIC avant contre-collage (marqueurs triangles bleus) / Valeurs de FWHM du pic à 60 keV (marqueurs carrés roses) / Valeurs de seuils bas en énergie (marqueurs ronds roses) en configuration (−400 V ; 4,4 µs) du module XRDPIX final correspondant aux CD/CA contre-collées.

La figure 5.22 montre l'exemple d'un XRDPIX performant et homogène. En effet, en

Table 5.2 – Table des sources radioactives utilisées par le projet ECLAIRs pour étalonner les modules XRDPIX

Source	Demi-vie	Rayonnement	Raies principales (X et γ)	Émissions (rapport de branchement)
^{55}Fe	2,7 ans	X	5,9* / 6,5 keV	25,4 / 3,3 %
^{57}Co	272 jours	β / X / γ	6,4 / 14* / 122* / 136,5 keV	48 / 9 / 86 / 11 %
^{241}Am	432 ans	α / X / γ	11,9 / 13,9* / 17,8* / 20,8 / 26,3 / 33,2 / 59,5* keV	0,8 / 12,5 / 18 / 4,7 / 2,3 / 0,13 / 35,9 %

*raies étudiées

prenant l'exemple de trois voies avec un courant de fuite au dessus de la médiane, et malgré tout très bas (P5, P24 et P25), nous obtenons aisément des valeurs basses de FWHM et des seuils bas en énergie très en-dessous de 4 keV. Toutefois, en ce qui concerne la voie P14, le courant de fuite du détecteur est plutôt élevé (67 pA) relativement aux 31 autres voies de la même Céramique Détecteurs, quoique en dessous de la valeur seuil de 100 pA ; si nous la couplions avec une voie à fort bruit ENC, cela augmenterait fortement sa FWHM et dégraderait ainsi sa résolution.

C'est pourquoi la voie de la Céramique ASIC choisie pour le couplage est de 57 e-, ce qui est faible et acceptable pour une performance finale correcte. Ceci nous permet d'obtenir une résolution en énergie inférieure à 1,6 keV sur l'ensemble des 32 voies, ce qui est tout à fait conforme aux spécifications.

5.3 Les performances des XRDPIX

Dans cette section, nous montrerons un large panel des mesures de caractérisation des modules XRDPIX, dont les performances peuvent se traduire sous plusieurs formes : les résolutions spectrales des raies de sources radioactives connues, les seuil bas en énergie (calculés à 6 sigma que j'expliquerai ci-après), les gains de chaque voie et les comptages intégraux sur une gamme d'énergie donnée. Certaines études sont globales à un même lot de modules (modules de présérie par exemple), d'autres portent sur des points particuliers, en se focalisant sur un ou deux modules, de niveau QM (modèle de qualification). Enfin, une étude préliminaire du prototype de la caméra, appelé « ProtoDPIX », sera présenté et préparera la conclusion du chapitre.

Pour étudier la performance des modules XRDPIX, j'ai utilisé les sources radioactives scellées suivantes : ^{55}Fe, ^{57}Co et ^{241}Am (table 5.2). Cette dernière a servi de base à l'étalonnage en énergie de l'ensemble des voies de chaque XRDPIX. En effet, l'américium 241 est un radionucléide important lorsque nous souhaitons faire des calibrations d'instruments tels que des spectromètres gamma, dans une gamme d'énergie assez basse. Non seulement son émission gamma est significative à 59,54 keV, mais ce radioélément fournit de multiples raies en X, entre 11 et 23 keV, dans la région des raies X de la couche L (section 5.1).

Chaque module XRDPIX a été caractérisé individuellement, au moyen de deux bancs d'essais quasiment jumeaux en termes d'environnement de tests (température de +23°C régulée pour des essais fonctionnels puis des essais d'acceptation, et température de −20°C

régulée pour les essais de performance, si les essais à +23°C sont validés) et d'électronique de commande et de traitement spécifique à la recherche de la performance ultime (Fig. 5.23).

En effet, pour réaliser les tests de l'ensemble des modules FM (près de 250 pièces), nous avons conçu et utilisé deux moyens de tests à l'IRAP (appelés « BC1 » et « BC2 »), dont la principale différence se situe dans la hauteur Source-XRDPIX et dans l'activité de chacune des deux sources radioactives, ce qui conduit à des différences attendues des comptages [Lacombe, 2016].

Tous les XRDPIX ont été mesurés dans les mêmes configurations paramétriques ; en complément, certains modules ont été testés selon des paramètres différents. Par la suite, nous parlerons de « configurations » pour les paramètres de haute tension, pour polariser les détecteurs, et de peaking time, programmé dans l'ASIC. Dans une même configuration (HT ; tp) seuls les seuils numériques seront modifiés (tables 5.3 et 5.4). En ce qui concerne les paramètres fixes et communs à tous les modules, nous pouvons citer par exemple les registres de l'ASIC qui définissent un certain mode de reset ou même le paramétrage de l'amplificateur de charge interne.

Table 5.3 – Table de configurations des essais unitaires de validation menés sur les XRDPIX

PARAMETRES VARIABLES		
(HT ; tp)[a]	SBN[b]	Commentaires
−400V ; 4,4 µs	30[c]/ 16[d] / Variable[e]	Configuration appliquée à tous les modules
−300V ; 2,6 µs	30 / 16 / Variable	Configuration nominale
−200V ; 4,4 µs	30 / 16 / Variable	Configuration complémentaire
−300V ; 1,8 µs	30 / 16 / Variable	Configuration complémentaire

PARAMETRES FIXES		
Registres ASIC	Valeurs	Commentaires
RSM[g]	1	« Reset Signe Mode » de 40 µs
I_0[h]	2	La valeur par défaut est de 200 µA.
I_{COMP}[i]	0	
V_{TEST}	0	La mise à 1 autorise l'injection de l'impulsion de test en entrée.

CARACTERISTIQUES SOURCE			
BANC N°	Distance Source-XRDPIX	Activité Source	Estimation Comptages
1	8,1 cm	429 kBq[f]	[68 - 78] c/s
2	6,5 cm	327 kBq[f]	[38 - 40] c/s

[a] : Haute Tension appliquée aux détecteurs du module XRDPIX ; peaking time programmé dans l'ASIC/XRDPIX

[b] : SBN : Seuil Bas Numérique programmé dans l'ASIC du module XRDPIX

[c] : SBN30 : Seuil Bas Numérique programmé à la valeur '30' (≈ 8 keV)

[d] : SBN16 : Seuil Bas Numérique programmé à la valeur '16'(≈ 3,8 keV)

[e] : SBNA : Seuil Bas Numérique Automatique, programmé à une valeur déterminée préalablement par un test sans source (« test 1 »)qui se base sur un taux de comptage similaire pour chaque voie (présence du pic de bruit) ; la valeur du SBNA peut donc être différente selon les 32 voies : valeur typique SBNA < 10

[f] : A la date de fabrication

[g] : Ce registre réunit 4 registres : (1) Reset : programmation du delai entre la retombée du READ et la montée du reset./ (2) Polarité du signal d'entrée / (3) Programmation du mode de sortie, utile en mode test. Le mode par défaut est le mode standard (valeur à 0, lecture multiplexée) et la mise à 1 permet de lire le signal analogique en sortie de filtre ou de PAC du canal 32 (voie détecteur P17). / (4) Sélection du point de test de la voie P17 (accès direct à son pré-amplificateur ou à son filtre).

[h] : Le registre I0 fixe le courant de polarisation des préamplificateurs de charges des 32 canaux. Ce courant a une influence sur la charge équivalente de bruit du circuit connecté à un détecteur.

[i] : ICOMP détermine un courant de compensation, qu'il faut programmer à une certaine valeur non nulle si aucun détecteur n'est connecté en entrée de l'ASIC. Dans le cas de nos tests unitaires, il est coupé car les détecteurs sont présents et le courant de fuite est donc non nul. Dans notre cas, il est désactivé car nous étudions le signal en sortie des détecteurs.

Plan de test nominal de chaque XRDPIX [a][b]		
Etape N°	**Description de l'essai**	**Commentaires [d]**
1	Relevé manuel de la consommation du 3V ASIC[f]	Avec des valeurs de registres ASIC spécifiques (SBN différent)
2	Vérification du dialogue numérique entre l'ASIC/XRDPIX et le contrôleur FPGA	Taux d'erreur évalué sur 1000 écritures/lectures de registres
3	Vérification du bon fonctionnement analogique des voies	Identification des voies mortes / SBN = 6
4	**Test 1 : Mesure des seuils numériques XRDPIX au pas près (285 eV) dès 0,5 c/s**	CONF01 : (-400V; 4,4 µs) / t_{acq} : variable / HT ON / **Sans source**
5[e]	**Test 2 : Acquisition spectrale des 32 voies détecteurs XRDPIX**	**CONF01 : (-400V; 4,4 µs) / t_{acq}[c] = 1800 s / SBN30 / Avec ^{241}Am**
6	Test 2	CONF01 : (-400V; 4,4 µs) / t_{acq} = 1800 s / **SBN16** / Avec ^{241}Am
7	Test 2	CONF01 : (-400V; 4,4 µs) / t_{acq} = 1800 s / **SBNA** / Avec ^{241}Am
8	**Test 3 : Acquisition des pics de bruit voie par voie**	CONF01 : (-400V; 4,4 µs) / t_{acq} : variable / HT ON / **Sans source**
9	Test 1 : Mesure des seuils numériques XRDPIX au pas près (285 eV) dès 0,5 c/s	CONF10 : (-300V; 2,6 µs) / tacq : variable / HT ON
10[e]	**Test 2 : Acquisition spectrale des 32 voies détecteurs XRDPIX**	**CONF10 : (-300V; 2,6 µs) / t_{acq} = 1800 s / SBN30 / Avec $_{241}$Am**
11	Test 2	CONF10 : (-300V; 2,6 µs) / t_{acq} = 1800 s / SBN16 / Avec ^{241}Am
12	Test 2	CONF10 : (-300V; 2,6 µs) / t_{acq} = 1800 s / SBNA / Avec ^{241}Am
13	Test 3 : Acquisition des pics de bruit voie par voie	CONF10 : (-300V; 2,6 µs) / t_{acq} : variable / HT ON / Sans source
14	Démontage du XRDPIX et Stockage sous hygrométrie contrôlée	Démontage de l'outillage de test placé dans l'enceinte thermique puis démontage du XRDPIX de son outillage de test

a **256 modules XRDPIX** (45 modules de Présérie et 211 modules de Série)
b XRDPIX refroidi pendant 3h et sous vide secondaire
c Durée de l'acquisition
d 100 % des modules ont suivi cette file d'essais.
e Test de référence sur lequel je me base pour la calibraton Canal-Energie
f Résultat de la puissance moyenne de 200 modules (consommation du courant sur 3 V) en annexe A.8.1

TABLE 5.4 – Plan de tests que chaque module XRDPIX des phases de présérie et de série (près de 250 XRDPIX soit 8000 voies détecteurs testées) a suivi pour la caractérisation et la validation de ses performances.

Table 5.5 – Table des caractéristiques mesurées sur les modules XRDPIX - Essais unitaires en configuration (-400 V ; $4,4$ μs)

Caractéristique	Exigence	Unité
FWHM 14 keV	< 1,6	keV
FWHM 60 keV	< 1,6	keV
Seuil bas en énergie (6 σ)	< 4	keV

Caractéristique	Valeur typique[c]	Unité
Gain[a]	0,0033 < a < 0,0041	keV/canal
Offset[b]	-25 < b < -12	keV
Comptage intégral[d] [8 - 65] keV	26 ± 1,7	c/s
Comptage intégral[d] [4 - 10] keV	0,03 ± 0,04	c/s

[a] : Coefficient directeur de la relation de calibration Canal-Energie (mesuré sur 16 bits)
[b] : Ordonnée à l'origine de la relation de calibration Canal-Energie (mesuré sur 16 bits)
[c] : Mesure sur une statistique de 5216 voies détecteurs
[d] : Mesure sur le banc n°2 (BC2)

Au total, quand nous additionnons les modules des phases de présérie, première et seconde série, plus de 250 XRDPIX ont été fabriqués, testés en fonctionnalité et caractérisés en performance, soit l'analyse de plus de 8000 voies détecteurs !

Chaque XRDPIX suit trois étapes de tests (décrits dans la table 5.4) : la première se déroule sans source radioactive et évalue grossièrement la valeur des seuils numériques à partir desquels le pic de bruit apparaît (« test 1 ») ; la deuxième est une étape clé, comprenant une source radioactive pour réaliser des acquisitions spectrales de 30 min, et ce dans plusieurs cas de valeurs de seuils numériques (SBN16 puis SBNA puis SBN30 du « Test2 »), dont nous pouvons voir des exemples de spectres sur la figure 5.24. Enfin, une troisième étape, sans source, fait une acquisition du bruit électronique du module (« Test3 » : Mesure du spectre de bruit dans le noir pour chaque voie d'un XRDPIX avec le comptage des 32 voies simultanément).

Tous ces tests se déroulent dans une configuration (HT ; tp) commune : (-400 V ; $4,4$ µs) puis (-300 V ; $2,6$ µs). L'ensemble de ces essais est réalisé à partir de scripts que j'ai définis par type de tests ('1', '2', '3') et par valeur de seuil bas numérique programmée en amont, permettant le déroulement des opérations de façon quasi-automatique, avec un minimum d'intervention humaine pour des objectifs élevés de reproductibilité.

L'ensemble des paramètres (ASIC, détecteurs, environnement) est spécifié pour chaque phase de développement, avec notamment la définition d'un point de fonctionnement à chaque campagne de tests (annexe A.7.3).

5.3.1 Les performances des XRDPIX modèles de vol

Ce chapitre va montrer les premières performances spectrales sur plusieurs milliers de voies de détection des modules XRDPIX de niveau FM, grâce, notamment, à la mesure de la largeur à mi-hauteur des raies du radionucléide ^{241}Am, et au calcul du seuil bas en énergie à 6 sigma, après une calibration d'ordre 1 que l'on détaillera par la suite. Nous verrons d'ailleurs

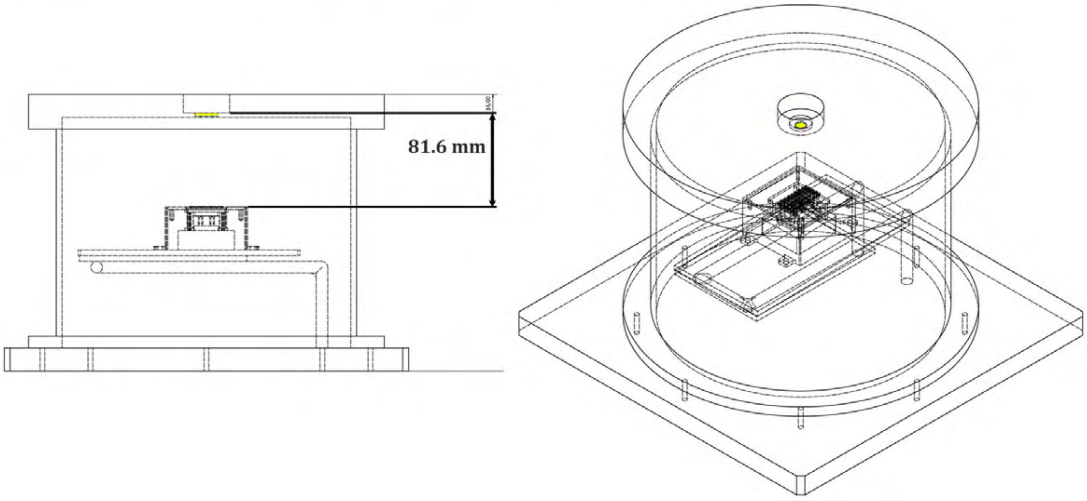


FIGURE 5.23 – Figure du haut : Bancs d'essais pour les mesures spectrales unitaires permettant de travailler à −20°C sous vide secondaire. / Figure du bas : Schéma de conception mécanique et géométrie du support de la source et de la cuve à vide. La source radioactive est située dans une petite chambre placée à 81,6 mm au-dessus du module XRDPIX dans le cas du banc n°2.

quelques données de gain, correspondant au coefficient de calibration Canal-Energie de chaque spectre (table 5.5).

5.3.1.1 La résolution spectrale des modules XRDPIX FM

Dans ce chapitre, nous effectuons une analyse globale d'une centaine de modules XRDPIX de niveau modèle de vol, en commençant par étudier leurs performances spectrales selon différentes configurations de tests, notamment les paramètres (HT ; tp) correspondant à la valeur de haute tension appliquée aux détecteurs CdTe et au peaking time programmé de l'ASIC. La majeure partie des essais a été réalisée avec deux sources radioactives d'Américium 241, d'activité 400 kBq (±15%) et dans des conditions de vide secondaire (autour de 10^{-6} mbar) et à la température régulée de −20°C (±1°C).

Dans un premier temps, nous configurons les registres des seuils numériques à la même valeur de 30, qui équivaut à une énergie d'environ 8 keV, pour faire une calibration de chaque spectre des 32 voies d'un XRDPIX et ainsi obtenir les coefficients a et b de la conversion Canal-Energie d'un polynôme d'ordre 1 (graphe en haut à gauche de la figure 5.24). Ensuite la valeur du seuil numérique est diminuée pour faire apparaître le pic de bruit sur le spectre en énergie, autour de 8 ADU selon les caractéristiques de chacune des voies (graphe en haut à droite de la figure 5.24).

La méthode utilisée pour évaluer les résolutions des pics est la suivante : à partir de nos spectres initiaux en résolution 16 bits, nous simplifions les canaux, par moyenne arithmétique, jusqu'à obtenir des spectres en 13 bits. Nous leur appliquons ensuite un filtre Savitzky-Golay (qui permet de lisser une fenêtre de données, par l'utilisation d'un polynôme local de faible degré), pour terminer par une calibration sur deux pics (13,9 keV et 59,5 keV). Enfin, après le calcul des coefficients de cette calibration (gain et offset), nous pouvons convertir les canaux en énergie puis nous identifions le maximum des pics de ^{241}Am et ajustons des gaussiennes correspondantes pour obtenir les FWHM associées.

Les mesures décrites ci-dessous, comme le seuil en énergie ou la résolution spectrale (capacité de séparation des raies d'un spectre en énergie), sont effectuées en énergie, sur la base du gain mesuré à partir du spectre situé en haut à gauche de la figure 5.24.

Les graphes de la figure 5.25 ont été dessinés à partir de spectres de XRDPIX configurés selon quatre couples (HT ; tp), à savoir les configurations de test nominales (−400 V ; 4, 4 µs) pour le graphe en magenta, et (−300 V ; 2,6 µs) en bleu roi, puis les configurations particulières (−200 V ; 4,4 µs) et (−300 V ; 2,6 µs) pour les graphes en cyan, de façon à voir l'impact du paramètre peaking time sans modifier la polarisation, et l'impact du paramètre de polarisation sans modifier le peaking time. Ces comparaisons de performances spectrales contribuent à la validation du couple (HT ; tp) en tant que configuration nominale ECLAIRs de la mission SVOM.

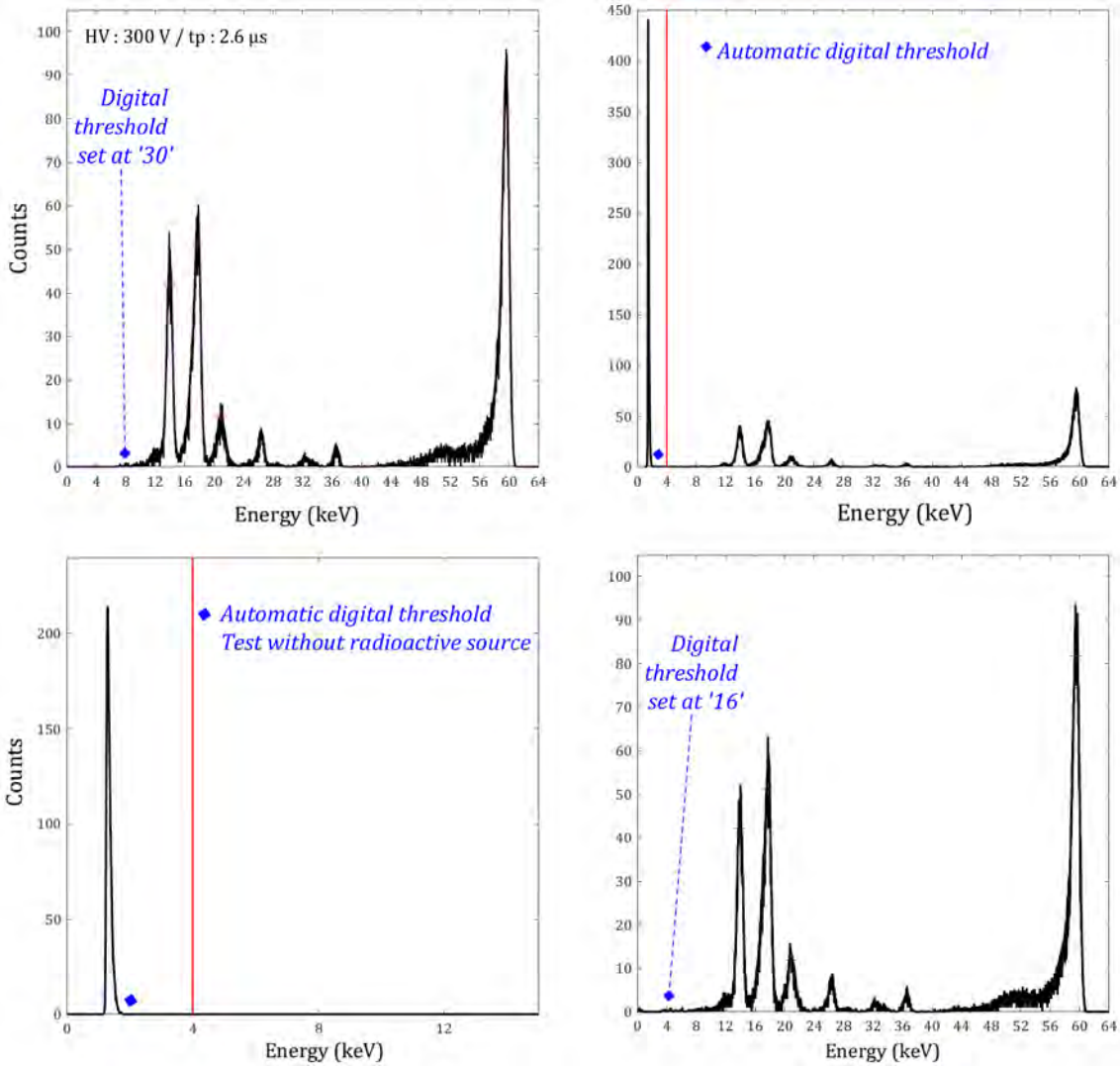


FIGURE 5.24 – Spectres calibrés de la voie « P10 » du module XR105 - Haute tension (HT) à −300 V - Peaking time (tp) à 2,6 µs - Calibration 16 bits avec un filtrage Savitzky-Golay (courbe magenta). En haut à gauche : source ^{241}Am - Seuil numérique programmé à 30 / En haut à droite : source ^{241}Am - Seuil numérique automatique permettant de voir le pic de bruit à basse énergie (soit une valeur entre [1,5 - 2,3] keV pour les voies fonctionnant normalement) / En bas à gauche : Test sans source - Seuil numérique automatique / En bas à droite : source ^{241}Am - Seuil numérique fixé à 16 ($\approx$ 4 keV).

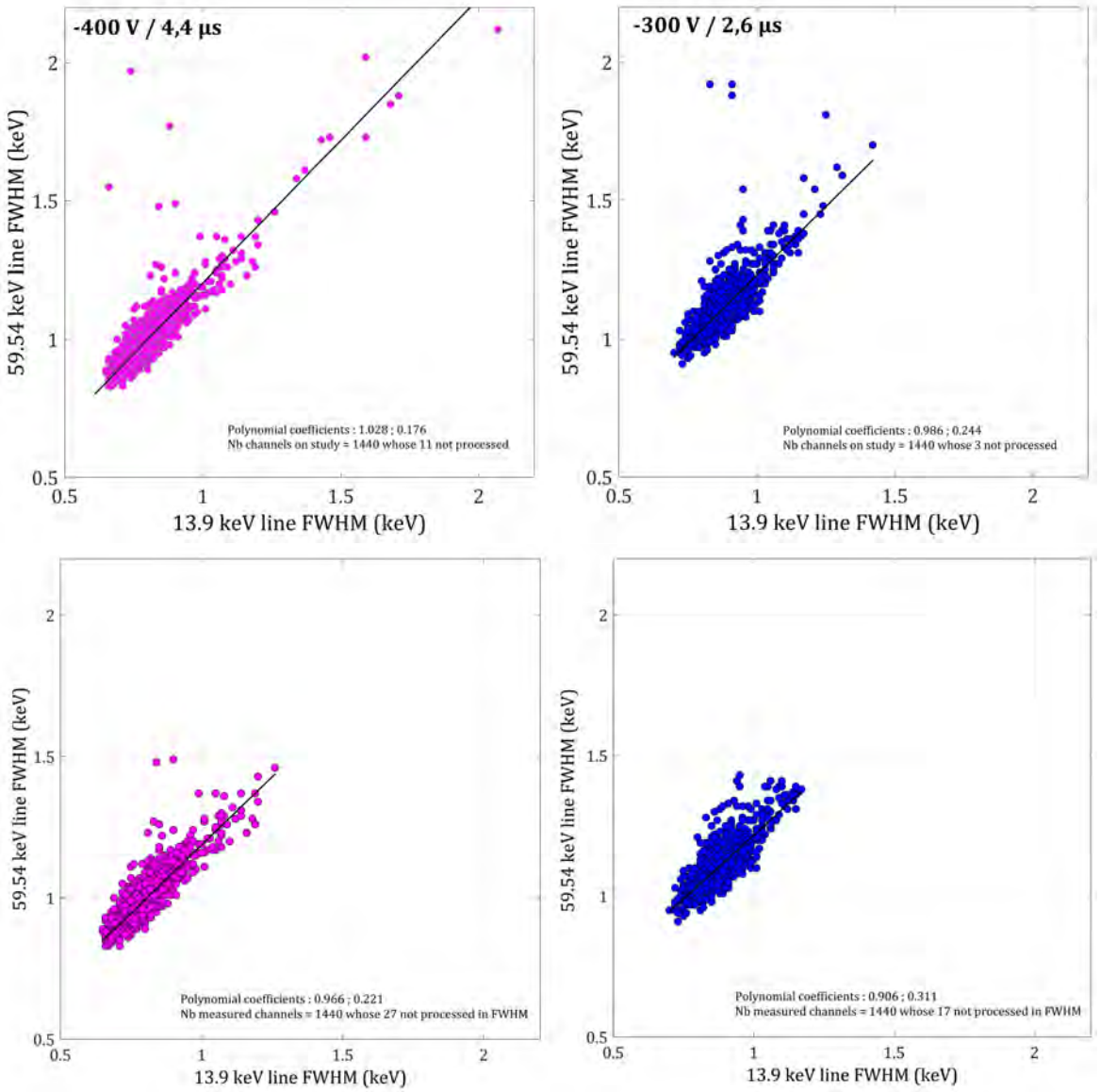


FIGURE 5.25 – Graphes de gauche : Mesure de la FWHM du pic à 60 keV en fonction de la FWHM du pic à 14 keV, dans la configuration (−400 V ; 4,4 µs), avec suppression de 11 valeurs FWHM au graphe du haut et 27 à celui du bas parmi 1440 voies détecteurs. / Graphes de droite : Mesure de la FWHM du pic à 60 keV en fonction de la FWHM du pic à 14 keV, dans la configuration nominale (−300 V ; 2,6 µs), avec suppression de 3 valeurs FWHM au graphe du haut et 17 à celui du bas parmi 1440 voies détecteurs. Nous noterons la similitude des coefficients entre la droite d'ajustement des mesures et la simulation, dans le cas où le nombre de données supprimées est plus élevé (graphes du bas).

Tout d'abord, nous observons la cohérence des mesures des pics à 13,9 keV et 59,5 keV, ce qui valide l'utilisation de la FWHM en tant que mesure de la performance des modules XRDPIX. Par ailleurs, la répartition des FWHM à 59,5 keV à un faible peaking time (ici à 2,6 µs) apparaît plus homogène qu'à un peaking time plus élevé ; cependant, il semble que la

corrélation entre la résolution des deux pics soit légèrement plus prononcée à 2,6 µs. En effet, dans la configuration (−400 V ; 4,4 µs) montrée dans le graphe de gauche (points en magenta) de la figure 5.25, je trouve un coefficient directeur de 1,03 sur 99,2 % des voies mesurées, avec : FWHM(60)[keV]$_{mesure}$ = 1,03*FWHM(14)[keV]$_{mesure}$ + 0,18 pour une valeur modélisée de 0,90 grâce à la formule F4.3.

Concernant les graphes de droite (points bleus) montrant les valeurs de FWHM dans la configuration (−300 V ; 2,6 µs), le coefficient directeur de la courbe de tendance linéaire donne 0,99 dans le cas où la quasi totalité des voies mesurées a été analysée (1437 sur 1440 détecteurs de la série 1), et 0,91 dans le cas où 17 valeurs ont été supprimées, ce qui concorde avec une estimation évaluée à 0,91 (Fig. 5.6). A ces coefficients directeurs s'ajoutent des valeurs d'offset de mesures, très proches des offsets modélisés (≈0,20). De plus, les coefficients de corrélation calculés pour les graphes dont les valeurs singulières ont été soustraites, montrent une relation linéaire forte entre les variables FWHM(60)[keV] et FWHM(14)[keV] ; en effet, j'obtiens un coefficient égal à 0,88 à (−400 V ; 4,4 µs), et égal à 0,81 à (−300 V ; 2,6 µs). Ainsi, les mesures de FWHM sont valides, et corroborent la modélisation.

Je peux donc conclure à une très bonne corrélation entre la résolution des pics de la source d'^{241}Am dans les deux configurations, avec une préférence pour (−300 V ; 2,6 µs). Dans ce cas, nous n'avons exclu que très peu de voies des calculs (au nombre de 3), tandis que, pour étudier une population cohérente dans le cas de la configuration (−400 V ; 4,4 µs), nous devrions soustraire bien plus de voies, ce qui est observé dans le graphe de gauche de la figure 5.25, car il apparaît plus de points dispersés (une quarantaine), qui s'ajoutent aux voies non traitées (au nombre de 11).

Enfin, en observant les valeurs des largeurs des pics à plus haute énergie (60 keV), nous voyons qu'elles sont en moyenne plus élevées à la tension de −300 V, probablement du fait d'une collection de charges moins efficace.

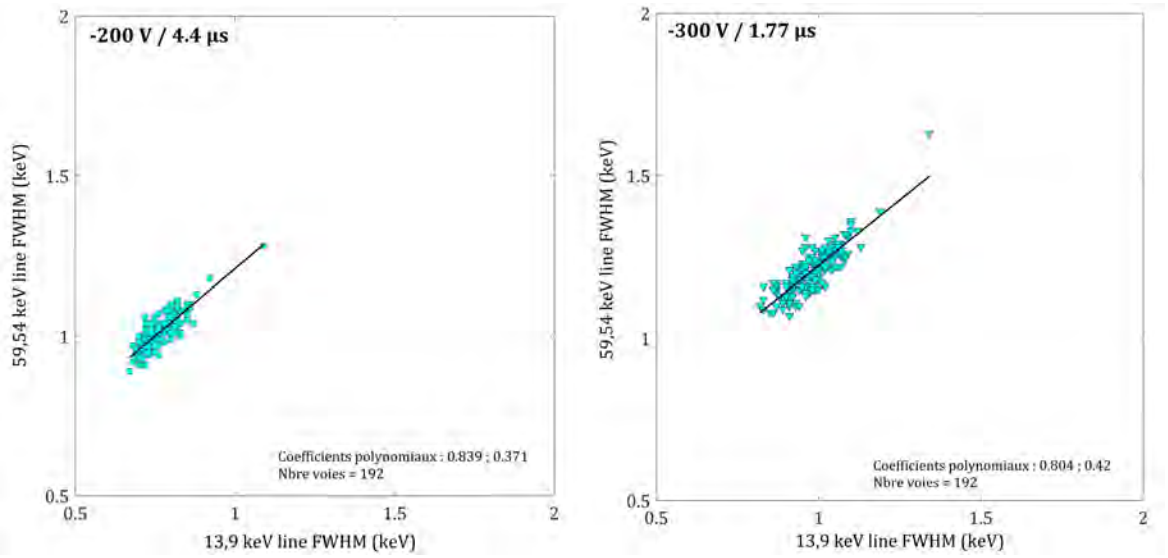


FIGURE 5.26 – Graphe de gauche : FWHM du pic à 60 keV en fonction de la FWHM du pic à 14 keV, dans la configuration (−200 V ; 4,4 µs) / Graphe de droite : FWHM du pic à 60 keV en fonction de la FWHM du pic à 14 keV, dans la configuration (−300 V ; 1,8 µs) - Six modules XRDPIX mesurés à −20°C.

Pour trouver les meilleurs paramètres de configuration (les valeurs de peaking time et de haute tension étant les plus pertinents), et ainsi obtenir les meilleures performances, j'ai également étudié la résolution de quelques modules XRDPIX dans d'autres configurations (HT ; tp), en complément des premières études sur les Céramiques Détecteurs avant leur contre-collage (pour évaluer la HT « idéale ») et sur les Céramiques ASIC (pour déterminer le peaking time optimal).

La figure 5.26 montre les valeurs de FWHM du pic à 60 keV en fonction du pic à 14 keV, pour 192 voies mesurées (soit six modules XRDPIX) dans les configurations (−200 V ; 4, 4 µs) et (−300 V ; 1,8 µs). Après les avoir ajustés par une régression linéaire, j'obtiens les coefficients directeurs et les offsets, tels que :

FWHM(60)[keV] = 0,84*FWHM(14)[keV] + 0,37 (graphe de gauche)
et
FWHM(60)[keV] = 0,80*FWHM(14)[keV] + 0,42 (graphe de droite).

En les comparant avec les valeurs de la modélisation, nous constatons que les valeurs des pentes sont plus faibles que celles des valeurs modélisées (les valeurs d'offset étant deux fois plus grands), avec par exemple, dans le cas de la configuration (−300 V ; 1,8 µs) une relation entre les FWHM comme suit : $\text{FWHM(60)[keV]}_{modèle} = 0{,}93*\text{FWHM(14)[keV]}_{modèle} + 0{,}18$. Malgré la faible statistique, il semble que ces configurations (avec le peaking time de 1,77 µs) ne soient pas optimales pour obtenir les performances recherchées.

Dans l'exemple qui suit (Fig. 5.27), nous pouvons voir la distribution des FWHM des pics à 13,9 keV et 59,5 keV dans des configurations particulières, comme présenté précédemment ; le graphe de gauche montre les histogrammes dans trois cas de peaking time avec une même tension de −400 V pour le pic à 13,9 keV, et le graphe de droite montre les histogrammes des FWHM à une valeur commune de tension de −200 V, pour le pic à plus haute énergie et toujours dans le cas des trois mêmes valeurs de peaking time.

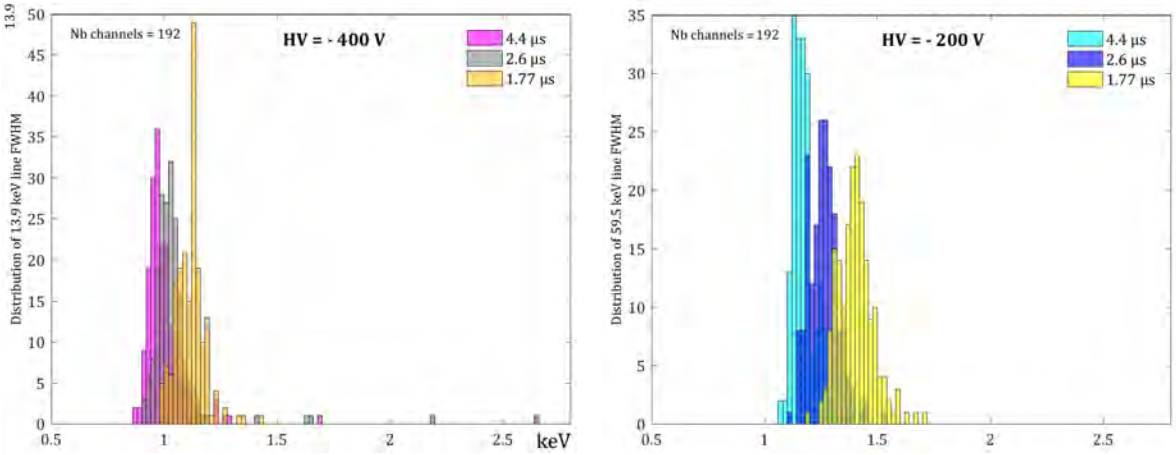


FIGURE 5.27 – A gauche : Histogramme des résolutions du pic à basse énergie, à une même polarisation (−400 V) et à 3 valeurs de peaking time 1, 77 µs (jaune), 2, 6 µs (gris) et 4, 4 µs (magenta) - A droite : Histogramme des résolutions du pic à haute énergie, à une même polarisation (−200 V) et à 3 peaking time 1, 77 µs (jaune), 2, 6 µs (bleu) et 4,4 µs (cyan).

Pour une même polarisation basse (ici −200 V), nous pouvons observer sur le graphe de droite (Fig. 5.27) différentes distributions de FWHM du pic à 59,5 keV selon le paramètre de peaking time appliqué. Le courant de fuite n'étant pas prédominant à cette tension, c'est

donc le bruit de l'ASIC, dépendant du peaking time, qui apparaît comme le bruit dominant, et qui oriente ainsi la valeur de la résolution en énergie.

En confrontant les histogrammes, nous remarquons que la résolution est meilleure à plus grand peaking time (ici 4,4 µs en magenta sur le graphe de gauche, et en cyan sur celui de droite) aux deux valeurs de haute tension ; à plus faible peaking time (t_p = 1,77 µs), la distribution des FWHM est plus dispersée, avec une moyenne plus élevée (histogramme jaune).

D'autre part, la faible polarisation induit une plus mauvaise collecte des charges à plus haute énergie, et nous observons des distributions plus larges que pour le pic à 13,9 keV. Finalement, à partir des 1440 voies mesurées des XRDPIX FM, si nous choisissons des valeurs de tension et de peaking time tels que HT = −300 V et t_p = 2,6 µs, nous nous attendons à avoir une moyenne des FWHM du pic à 14 keV de 0,876 keV ±0,015 (≈ 6,3 %). De la même manière, les 1440 valeurs de FWHM du pic à 60 keV donnent une moyenne de 1,11 keV ±0,03 (soit ≈ 1,86 %).

En résumé, la FWHM du pic à 60 keV est inférieure à 1,6 keV pour 98,2 % des voies dans la configuration (−400 V ; 4,4 µs) et pour 99,3 % des voies dans la configuration (−300 V ; 2,6 µs). En étant plus restrictif, la FWHM est inférieure à 1,2 keV pour 95 % des voies à (−400 V ; 4,4 µs), et pour 91 % des voies à (−300 V ; 2,6 µs), configuration qui sera définie comme nominale par la suite.

Etude des gains d'étalonnage selon la configuration (HT ; tp)

De façon à valider nos mesures, j'ai étudié la population des gains des voies de chaque XRDPIX (soit le coefficient directeur de la relation Canal-Energie). La figure 5.28 montre leur distribution selon la configuration (HT ; tp) programmée (graphe du haut) et les valeurs moyennes pour chaque XRDPIX (graphe du bas).

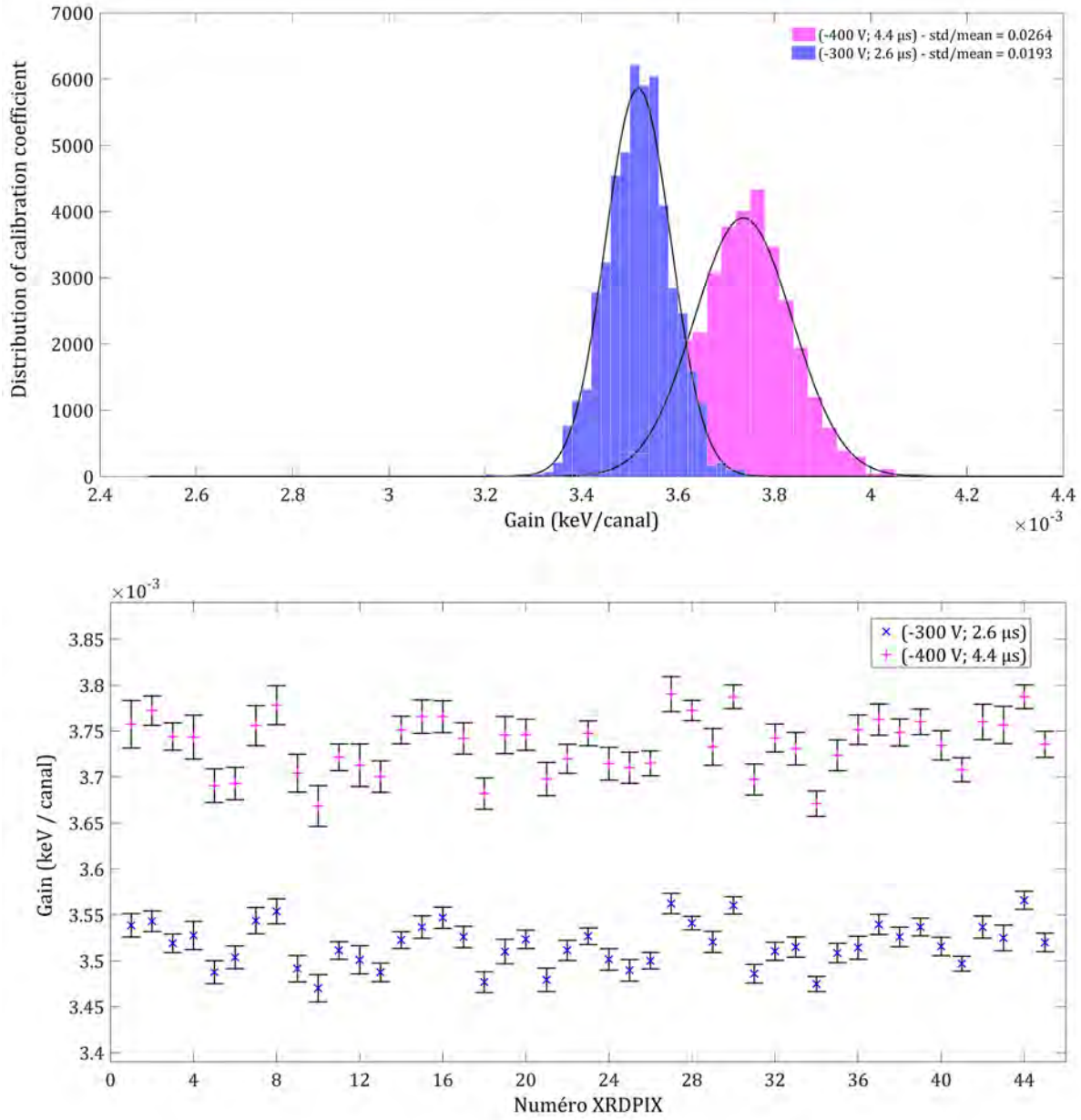


FIGURE 5.28 – Graphe du haut : Histogramme des gains de calibration en énergie des spectres de ^{241}Am de 45 modules (série 1) / Graphe du bas : Moyenne des 32 gains (mesurés sur 16 bit) pour chaque module XRDPIX - Les seuils numériques sont programmés à 30 - En magenta, la configuration (−400 V ; 4,4 µs) et en bleu, la configuration (−300 V ; 2,6 µs).

Nous observons une forte cohérence avec les mesures de gain des Céramiques ASIC aux deux valeurs de peaking time : 4,4 µs et 2,6 µs.

En effet, d'une part, nous avions remarqué que les gains des Céramiques ASICs étaient plus bas à peaking time plus élevé (section 5.2.3), ce qui correspond à des gains des modules XRDPIX plus bas en configuration (−300 V ; 2,6 µs) qu'en configuration (−400 V ; 4,4 µs).

D'autre part, le rapport moyen des gains des Céramiques ASICs entre 4,4 µs et 2,6 µs étant de 1,067, nous pouvons le confronter au rapport des gains moyens des XRDPIX (de la première série) qui est de 0,0037/0,0035 = 1,057.

De plus, nous voyons que la dispersion de ces gains est plus faible à 2,6 µs, avec un coefficient de variation de 1,9 % contre 2,6 % à 4,4 µs.

Enfin, en configuration (−300 V ; 2,6 µs), l'écart par rapport à la moyenne globale (45 modules) entre la moyenne d'un XRDPIX (32 coefficients) la plus basse, et la moyenne la plus élevée, est de 2,7 %.

En conclusion, ce qui domine dans l'évolution du gain est le paramètre « peaking time » plus que la haute tension (qui varie faiblement, le courant de fuite variant peu entre −300 V et −400 V à −20°C). Sur la base d'une statistique de plus de 1400 voies, je peux conclure à une très grande homogénéité des gains entre modules, ce qui est très important pour faciliter le réglage du plan de détection.

5.3.1.2 Le seuil bas en énergie des modules XRDPIX FM

Dans ce paragraphe, nous étudions le seuil bas en énergie selon la configuration de travail (HT ; tp) dans laquelle se trouvent les modules XRDPIX, puis nous analysons la corrélation qui existe entre la résolution spectrale et le seuil bas. En effet, nous avons vu précédemment (paragraphe 5.2.1) comment estimer par simulation les valeurs de FWHM et de seuil bas, et avons constaté qu'ils étaient étroitement liés.

Grâce à deux mesures différentes effectuées sur l'ensemble des modules XRDPIX (Table 5.4), j'ai pu calculer le seuil bas en énergie selon une acquisition qui permet de visualiser le pic de bruit sur le spectre de la source de ^{241}Am (Test2 / SBNA) puis selon une acquisition sans source radioactive, qui permet de visualiser le pic de bruit électronique seul (Test3). Dans le deux cas, j'ai réalisé le même algorithme de traitement de données, à savoir une première étape de filtrage du spectre, puis une étape d'extrapolation du pic de bruit à une gaussienne, après avoir cherché son maximum, et une étape d'extraction des paramètres de cette fonction gaussienne (μ et σ).

Etude du seuil bas selon la configuration (HT ; tp)

L'une des spécifications techniques de l'instrument ECLAIRs est d'avoir une homogénéité forte entre les voies de détection, et ce en matière de seuil bas de détection. Cette section est consacrée à l'analyse de plusieurs milliers de voies XRDPIX, pour évaluer la proportion des modules qui obtiennent un seuil bas en énergie meilleur que 4 keV, et étudier leur dispersion selon la configuration dans laquelle ils ont été testés.

D'après la figure 5.29, nous trouvons un nombre de voies supérieures à 4 keV (ou ne pouvant pas être calibrées car ce sont des voies détecteurs très mauvaises) de 128, pour 1440 voies analysées (45 modules XRDPIX) à la configuration (−400 V ; 4,4 µs) soit 91 % dans le cadre rouge, et 71 dans la configuration (−300 V ; 2, 6 µs), soit 95 % dans le cadre rouge.

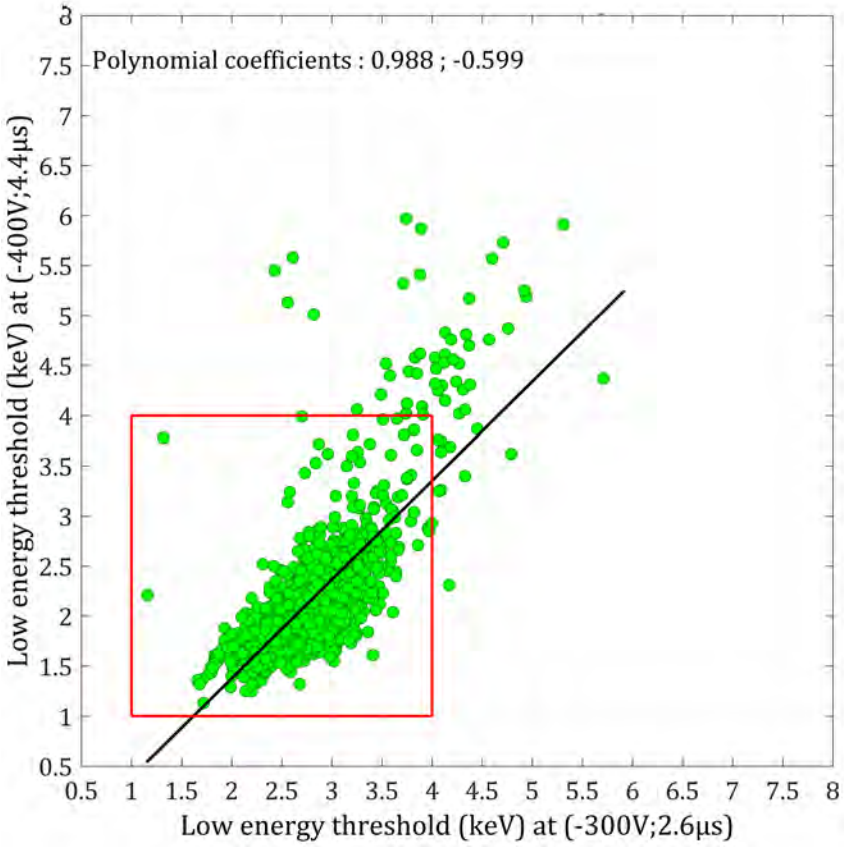


FIGURE 5.29 – Seuil bas en énergie de modules XRDPIX FM de la série 1 (1440 voies détecteurs) : Configuration (−400 V ; 4,4 µs) versus configuration (−300 V ; 2,6 µs) - Plus de 95 % des seuils bas en énergie, calculés à partir de spectres de ^{241}Am acquis dans la configuration (−300 V ; 2,6 µs), sont inférieurs à 4 keV.

La figure 5.31 montre la distribution du seuil bas en énergie obtenu à partir de spectres de la source de ^{241}Am, lorsque nous programmons les modules XRDPIX à des faibles valeurs de seuils numériques (typiquement entre 6 et 10, soit respectivement des valeurs entre ≈1,1 keV et 2,2 keV). Le seuil bas en énergie est obtenu alors, après avoir assimilé le pic de bruit à une gaussienne, dont nous extrayons l'écart-type, qui est finalement multiplié par un facteur 6.

En observant les deux graphes de la figure 5.31, nous voyons une distribution plus fine dans le cas (−400 V ; 4,4 µs), mais qui présente une queue de gaussienne plus étendue. Cette population de seuils, ne répondant pas aux exigences de la mission, aurait pu, en première approche, être exclue de la caméra de vol ; seulement, la distribution étant dispersée sur un nombre trop élevé de modules XRDPIX (très peu de modules regroupant plus de trois voies hors spécifications), j'ai décidé, lors de la phase de sélection, d'administrer une note basse (et pondérée selon le nombre de voies mauvaises) à ceux qui présentaient le plus grand nombre de voies au dessus de 4 keV.

Par ailleurs, l'histogramme des seuils en configuration (−400 V ; 4,4 µs) corrobore ce que j'avais pu observer sur les mesures de bruit ENC des Céramiques ASIC montrant un plus grand nombre de voies écartées de leur moyenne au temps de peaking de 4,4 µs (Fig. 5.15).

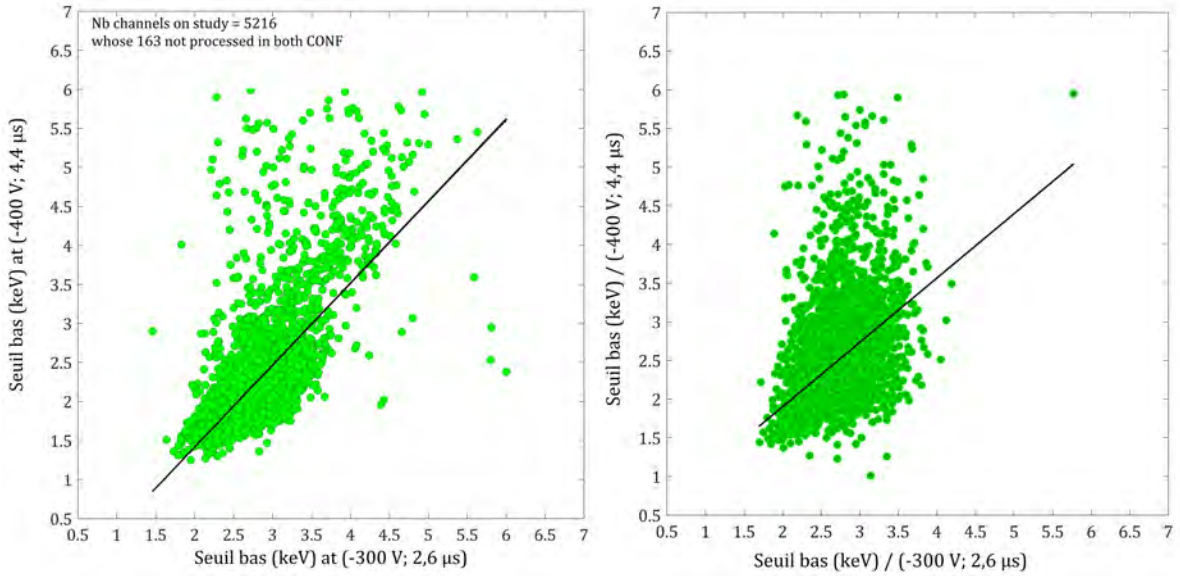


FIGURE 5.30 – Seuil bas en énergie de modules XRDPIX FM de la série 2 (5216 voies détecteurs) : Configuration (−400 V ; 4,4 µs) versus configuration (−300 V ; 2,6 µs) - Graphe de gauche : seuils bas calculés à partir de spectres de ^{241}Am / Graphe de droite : seuils bas calculés à partir de spectres de bruit (sans source radioactive).

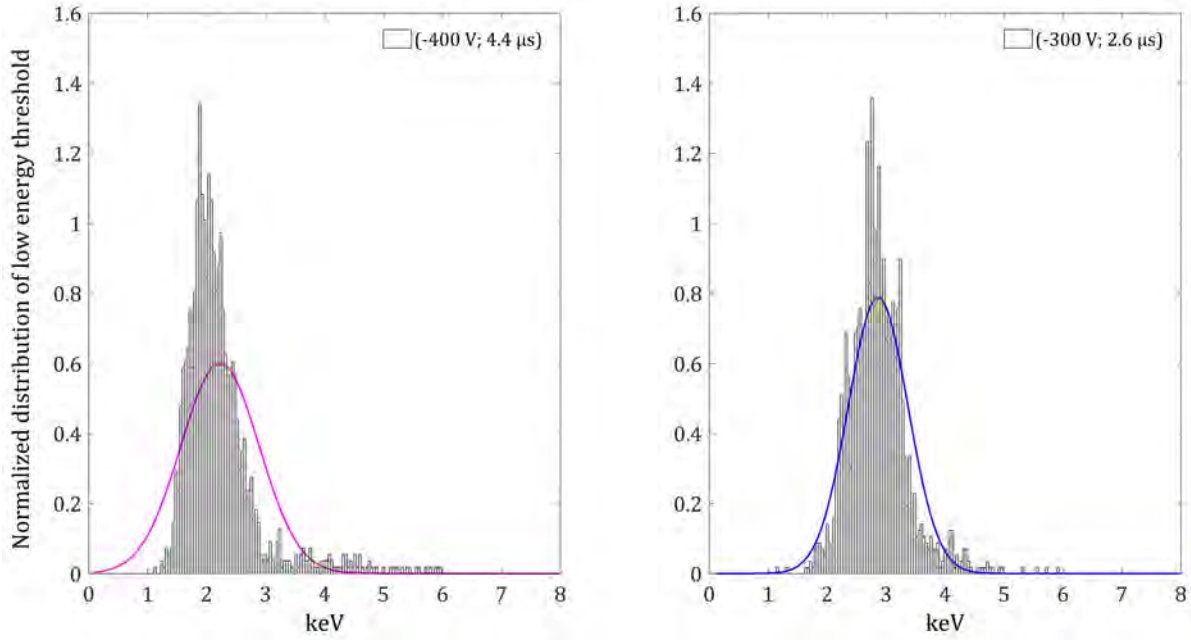


FIGURE 5.31 – Histogrammes des seuils bas en énergie de modules XRDPIXs selon 2 configurations (HT ; tp) avec une loi gaussienne appliquée à chaque histogramme normalisé - Courbe magenta pour (−400 V ; 4,4 µs) et courbe bleue pour (−300 V ; 2,6 µs).

Parmi la population des seuils inférieurs à 4 keV, j'ai calculé une moyenne de 2,81 ± 0,4 keV à la configuration (−400 V ; 4, 4 µs), contre 2,13 ±0,44 keV à la configuration (−300 V ; 2, 6 µs), avec près du double de voies écartées (57) lors du traitement en configuration (HT ; tp) la plus élevée, ce qui peut aussi expliquer une plus grande dispersion et de moins bonnes performances à tension et peaking time plus élevés. D'ailleurs, dans ce cas, le coefficient de variation (rapport écart-type sur la moyenne) est de 21 % tandis qu'il est de 14 % pour la configuration nominale (−300 V ; 2,6 µs).

En résumé, les figures 5.29 et 5.31 nous permettent de conclure que la performance en seuil bas est meilleure à la polarisation de −300 V, plutôt qu'à plus haute tension. Ainsi, en étudiant par exemple les spectres à −400 V, nous amplifions la dégradation des performances des voies mauvaises, et cela permet d'identifier l'origine du bruit prédominant d'un XRDPIX, qui, dans cette configuration, se trouve être le courant de fuite des détecteurs CdTe.

Etude du seuil bas selon la voie mesurée

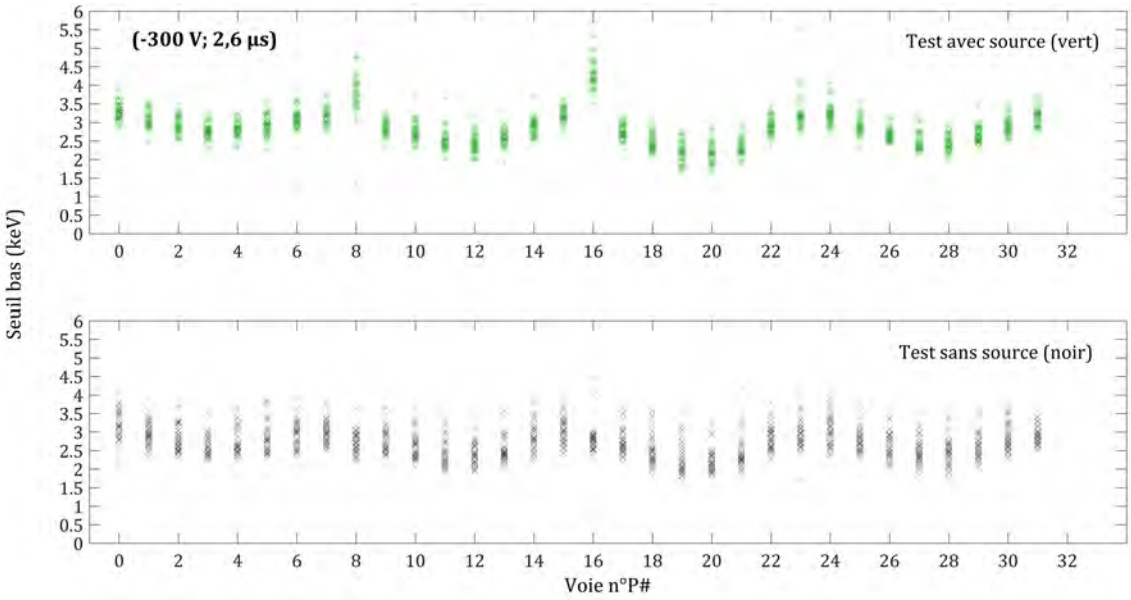


FIGURE 5.32 – Seuil bas en énergie calculé à 6 sigma pour chacune des 32 voies de 45 modules testés dans la configuration (−300 V ; 2,6 µs) - Graphe du haut : test avec photons / Graphe du bas : test sans source radioactive.

Les graphes de la figure 5.32 montrent le seuil bas en énergie selon la voie de chaque XRDPIX (45 modules dans ce cas), configuré à (−300 V ; 2,6 µs). Il y a ainsi 45 valeurs par position (de P0 à P31).

En première approche, nous constatons que la performance du seuil bas en énergie est étroitement liée au design du module XRDPIX, c'est à dire que les valeurs les plus élevées sont les voies les plus capacitives, ce qui confirme la modélisation, et qui concorde avec les résultats de la résolution en énergie.

Par ailleurs, le comportement des voies P8 et P16 est légèrement différent des autres voies dans le cas de la mesure avec source de ^{241}Am (« Test2 »). Auparavant, lors d'essais avec des Céramiques ASICs, j'avais pu observer que ces voies déclenchaient de façon intempestive si

elles étaient programmées à des seuils numériques inférieurs à 16 (soit moins de 4 keV), puis lors de tests de modules XRDPIX en version présérie, au cours desquels elles montraient un comportement singulier, accentué par un fort taux de comptage en entrée (dû à des événements photons ou à du bruit électronique).

Il n'est donc pas contradictoire de voir des seuils bas en énergie plus élevés pour ces voies, dans le cas des détecteurs XRDPIX en version série. Cependant, ce comportement apparaît essentiellement lors d'acquisitions spectrales avec photons (dont le flux est conséquent durant nos mesures). Il semble qu'à contrario, si nous mesurons le seuil bas à 6 sigma quand sont acquis des spectres de bruit en mode 'multiple' (mesure faite avec des spectres acquis sans source radioactive « Test3 » / graphe du bas), ces mêmes voies P8 et P16 ont des valeurs plus basses que les 30 autres voies d'un même XRDPIX, ce qui peut s'expliquer par le fait qu'en comptant davantage, les voies P8 et P16 ont plus d'événements multiples et comme nous n'acquérons dans ce cas que des spectres 'single' (le Test3 acquiert les événements dans un mode multiple mais n'enregistre que les événements simples), alors les pics de bruit de ces voies sont réduits et le seuil bas également. C'est pourquoi, même si en vol, les photons arrivant sur la caméra seront moins nombreux en phase d'observation nominale que lors de nos essais de caractérisation, je pense qu'il sera nécessaire de paramétrer les voies P8 et P16 différemment (avec un seuil numérique un peu plus haut que les autres voies détecteurs), voire même d'élaborer un programme de lecture spécifique (avec un allongement du temps de réinitialisation, avant une nouvelle phase de lecture), ou tout au moins d'accorder une attention particulière à ces pixels, et à leurs comportements assurément singuliers.

Corrélation FWHM-Seuil bas - Mesures versus Modélisation

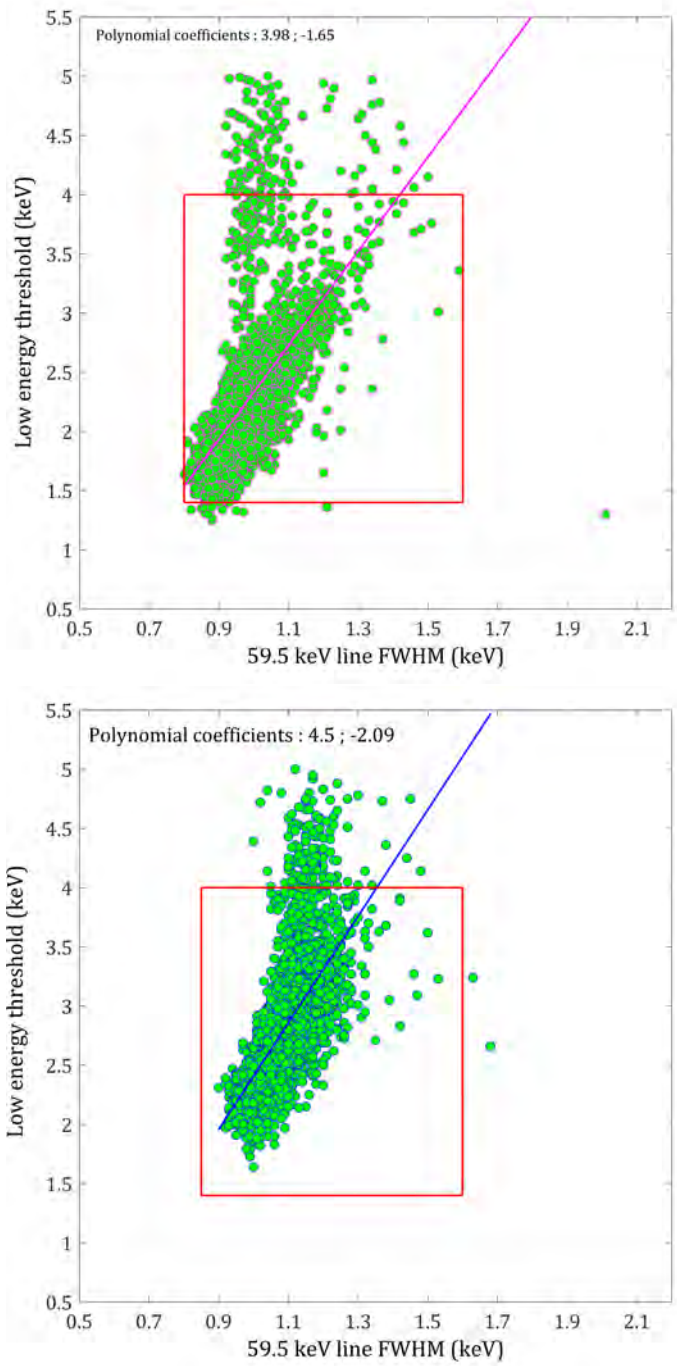


FIGURE 5.33 – Seuil bas en énergie (à 6 sigma) en fonction de la FWHM du pic à 60 keV. Ces performances ont été obtenues à partir de 5216 spectres de ^{241}Am (soit 163 modules XRDPIX FM de la série 2) - Graphe du haut : Configuration (−400 V ; 4,4 µs), avec près de 10% des voies écartées de l'analyse / Graphe du bas : Configuration (−300 V ; 2,6 µs), avec près de 2% des voies écartées de l'analyse.

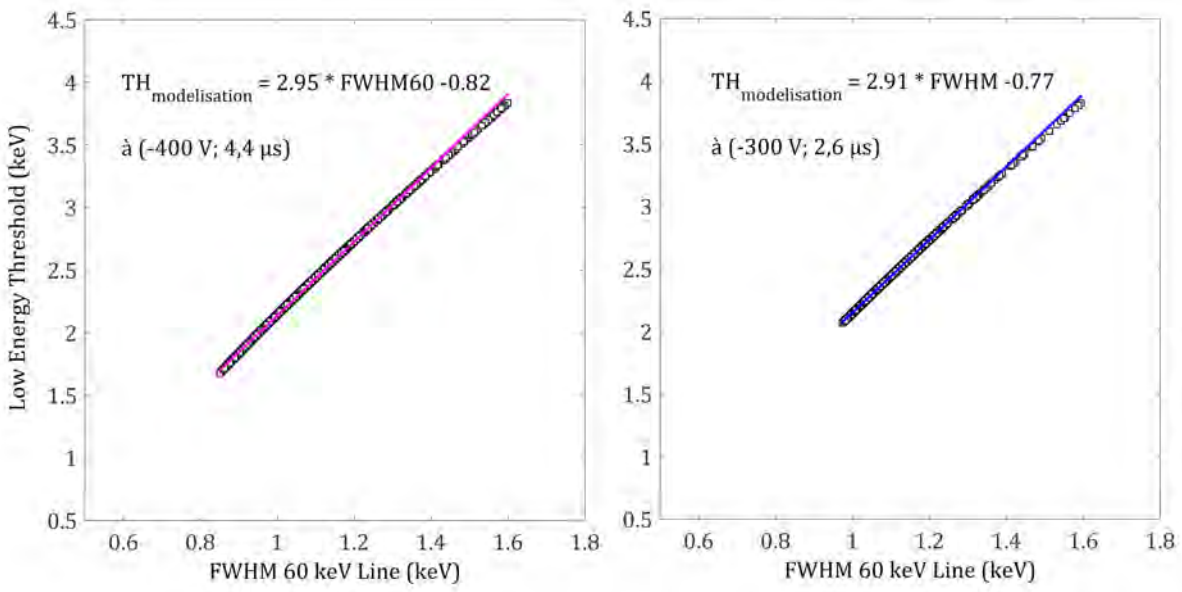


FIGURE 5.34 – Modélisation du seuil bas en énergie (calculé à 6 sigma) en fonction de la FWHM à 60 keV (calculée à 60 keV). Graphe de gauche : Configuration (−400 V ; 4,4 µs) / Graphe de droite : Configuration (−300 V ; 2,6 µs) - Modèle obtenu à partir de 8288 mesures de courants de fuite (soit 259 Céramiques Détecteurs).

En étudiant les graphes des figures 5.33 et 5.34, nous confirmons plusieurs comportements précédemment observés :

- Les mesures de seuil bas en énergie montrent une distribution relativement hétérogène dans les deux configurations (HT ; tp), avec une partie de sa population de seuils qui s'écarte singulièrement de sa tendance centrale.

- La configuration (−300 V ; 2,6 µs) présente une distribution des seuils plus homogène, de par un moins grand nombre de voies à soustraire de notre calcul (21 valeurs de seuil contre 77 dans l'autre configuration) et, au vu d'un plus grand nombre de voies hors spécification mission dans ce cas.

- Les coefficients de tendance linéaire simulés sont comparables aux coefficients directeurs obtenus par mesure, ce qui valide d'une part les calculs de seuil bas et de FWHM, et d'autre part la modélisation (concordance plus prononcée à (−300 V ; 2,6 µs) qu'à une autre configuration). Les corrélations Seuil-FWHM (relations obtenues par régression linéaire) sont les suivantes :

Lors des mesures des acquisitions spectrales en configuration (−400 V ; 4,4 µs), après soustraction des voies ayant un seuil bas supérieur à 4 keV :

$\text{Seuil}_{mesure} = 2{,}35 * \text{FWHM[60keV]}_{mesure} - 0{,}20$

Pour la simulation, $\text{Seuil}_{modèle} = 2{,}95 * \text{FWHM[60keV]}_{modèle} - 0{,}82$

Lors des mesures des acquisitions spectrales en configuration (−300 V ; 2,6 µs), après soustraction des voies ayant un seuil bas supérieur à 4 keV : :

$\text{Seuil}_{mesure} = 2{,}91 * \text{FWHM[60keV]}_{mesure} - 0{,}40$

Pour la simulation, $\text{Seuil}_{modèle} = 2{,}91 * \text{FWHM[60keV]}_{modèle} - 0{,}77$

5.3.1.3 Le comptage des modules XRDPIX FM

Une première étude sur le comptage des détecteurs XRDPIX est celle de leur homogénéité inter-voies selon la configuration (HT ; tp) dans laquelle ils sont testés. En effet, comme nous l'avons vu précédemment, du fait de leur design, il existe des différences de performances intrinsèques à un même module entre chacune de ses 32 voies.

Nous allons débuter cette section par l'évaluation de cette dispersion de comptage, pour ensuite étudier le rapport de comptage entre deux raies de l'américium-241. Nous finirons par approfondir l'étude des voies anormales en ce qui concerne le comptage.

Le comptage entre les 32 voies d'un module XRDPIX à deux configurations

Pour vérifier l'homogénéité du comptage, nous avons mesuré le taux de comptage moyen de chaque pixel, en additionnant les événements de la plage d'énergie [8–65] keV, qui contient les principales raies d'émission de l'^{241}Am, et en divisant par le temps d'acquisition de 30 minutes. Les conditions de test restent les mêmes que celles décrites précédemment pour le banc n°2, et en particulier la source ^{241}Am située à 8,1 cm au-dessus du XRDPIX (Fig. 5.23).

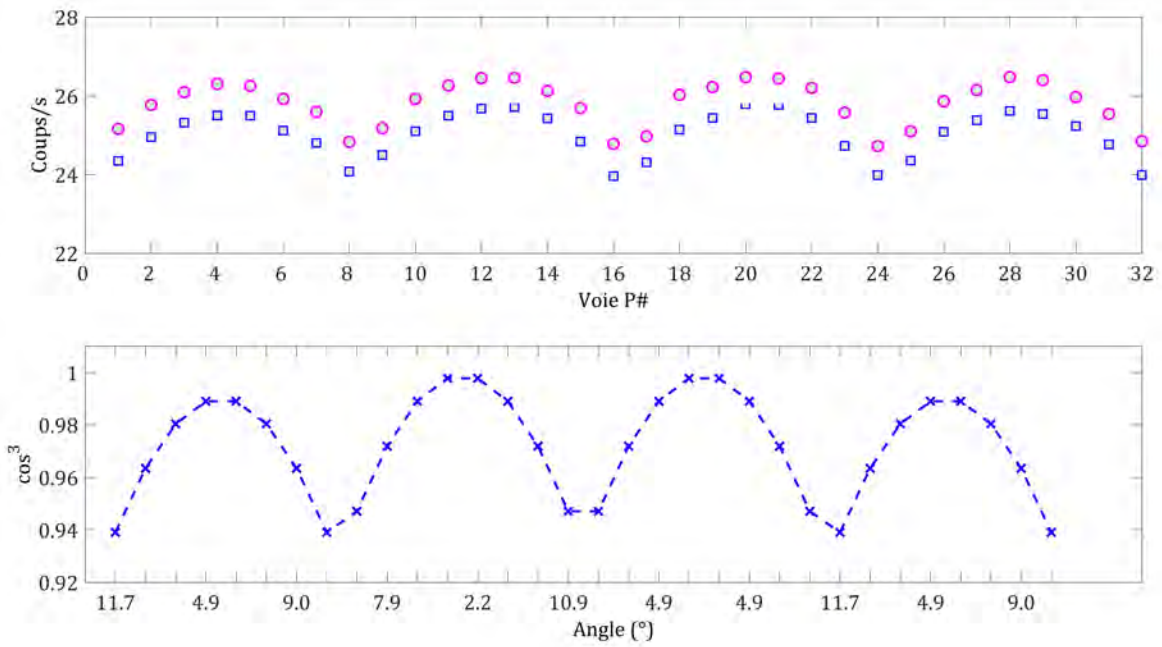


FIGURE 5.35 – Graphe du haut : Taux de comptage des 32 voies de 80 modules XRDPIX (pour chaque voie détecteur de même numéro P#, j'ai calculé la médiane de 80 taux de comptage correspondant aux 80 modules testés sur le même banc d'essais à savoir BC2 dans cet exemple) dans le cas de la configuration (−400 V ; 4,4 µs) - cercles magentas - et de la configuration (−300 V ; 2,6 µs) - carrés bleus - à partir de spectres acquis avec des seuils numériques à 30 / Graphe du bas : courbe théorique de comptage (en pointillés) d'une fonction en $\cos^3$ en fonction de l'angle des détecteurs (par exemple un détecteur situé au centre du module XRDPIX a un angle de 2,2°).

La Figure 5.35 montre le taux de comptage par voie détecteurs (P0 – P31) dans les deux

configurations (HT = −400 V ; tp = 4,4 µs) et (HT = −300 V ; tp = 2,6 µs), respectivement en magenta et en bleu. L'aspect des courbes est expliqué par la distance et l'angle de chaque détecteur par rapport à la source ; en effet, ces courbes de comptage sont liées à une fonction en cosinus-cube de l'angle des détecteurs vus depuis la source (variation théorique en cos^3 sur la courbe du bas - marqueurs noirs - de la figure 5.35).

Dans le cas de 640 voies détecteurs de 20 modules du premier lot FM, le comptage moyen est de 25,1 $\pm 0,95$ c/s/pix à −300 V et de 25,8 $\pm 1,57$ c/s/pix à −400 V et à un peaking time plus grand, indiquant une dispersion plus grande pour cette configuration.

Ajoutons que les bancs BC1 et BC2 ont des différences de comptages attendus, au vu de l'agencement mécanique propre à chacun : hauteur entre la source et le module, activités des sources radioactives et leur incertitude, épaisseur du support en plexiglass. Il est donc intéressant d'étudier le rapport entre deux pics si nous voulons soustraire au mieux ces différences, comme nous pouvons le voir dans la figure suivante 5.36.

Les rapports de coups selon le banc de test

Nous voyons sur le graphe ci-dessous (Fig. 5.36) le rapport des coups du pic à 14 keV sur le pic à 60 keV (sur près de 1300 voies) dans une même configuration ici (−400 V ; 4,4 µs) en fonction des deux bancs d'essais utilisés pour effectuer la caractérisation de chaque XRDPIX FM.

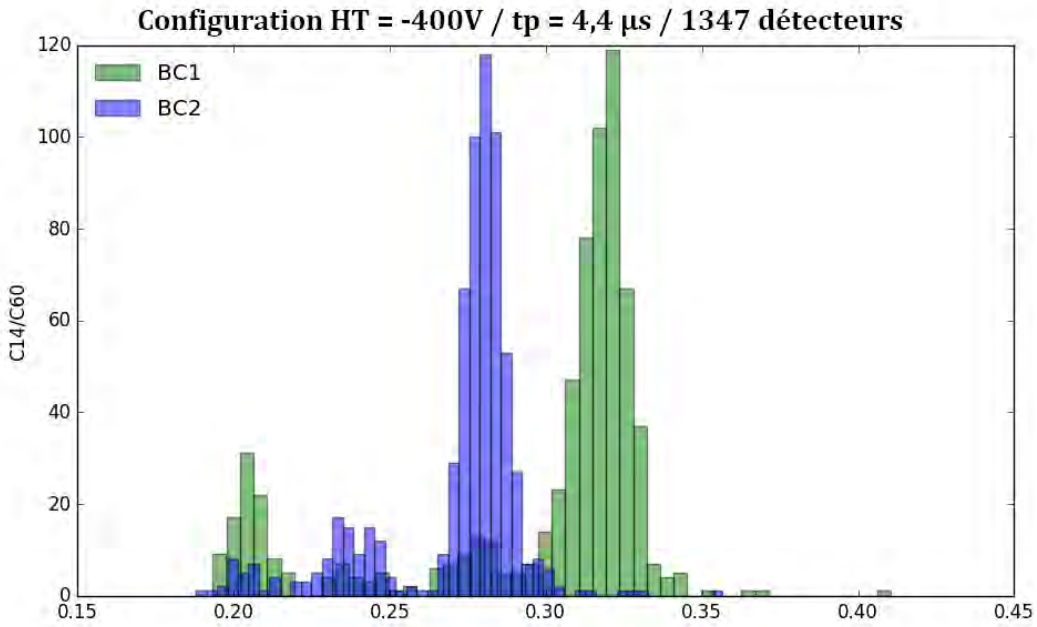


FIGURE 5.36 – Rapport des coups du pic à 14 keV sur le pic à 60 keV dans la configuration (−400V ; 4,4 µs).

Nous constatons une différence des rapports de comptage selon les bancs de tests BC1 et BC2, ce qui s'explique par la différence des épaisseurs du plexiglas de l'encapsulation de chaque source radioactive.

De plus, nous voyons l'apparition d'une deuxième population de comptage, avec des rapports plus faibles qui n'appartiennent pas à la gaussienne principale. Nous pouvons penser que les voies singulières P8 et P16 sont à l'origine de ces faibles comptages, car nous étudions ici des spectres en mode « single » (événement simple) et donc tous les multiples en sont écartés. Par conséquent, les spectres étudiés intègrent moins de coups, et les rapports sont diminués. Nous pouvons aussi expliquer ces faibles rapports de comptage dans le cas où le pic à faible énergie (14 keV) serait moins élevé, si la collection de charges devient moins efficace.

Comme nous avons vu précédemment que ces voies présentaient un bruit plus prononcé que les autres, il faudrait alors étudier le ratio des comptages multiples pour vérifier cela, ce qui dans notre cas (essais unitaires de validation de chaque module), n'est pas réalisable, car nous travaillons à partir de spectres où seuls les coups simples sont enregistrés. Néanmoins, la phase de tests de la caméra de vol pourrait permettre l'étude de cette problématique, étant donné le contenu complet des spectres acquis (single et multiples).

Les anomalies de comptage

Nous venons de voir que certaines voies pouvaient être à l'origine de singularités dans les rapports de coups des pics à 14 et 60 keV. Nous allons étudier ici le profil de comptage des 32 voies d'un même XRDPIX dans une même configuration, et tenter d'ajouter une explication à celles déjà mentionnées précédemment.

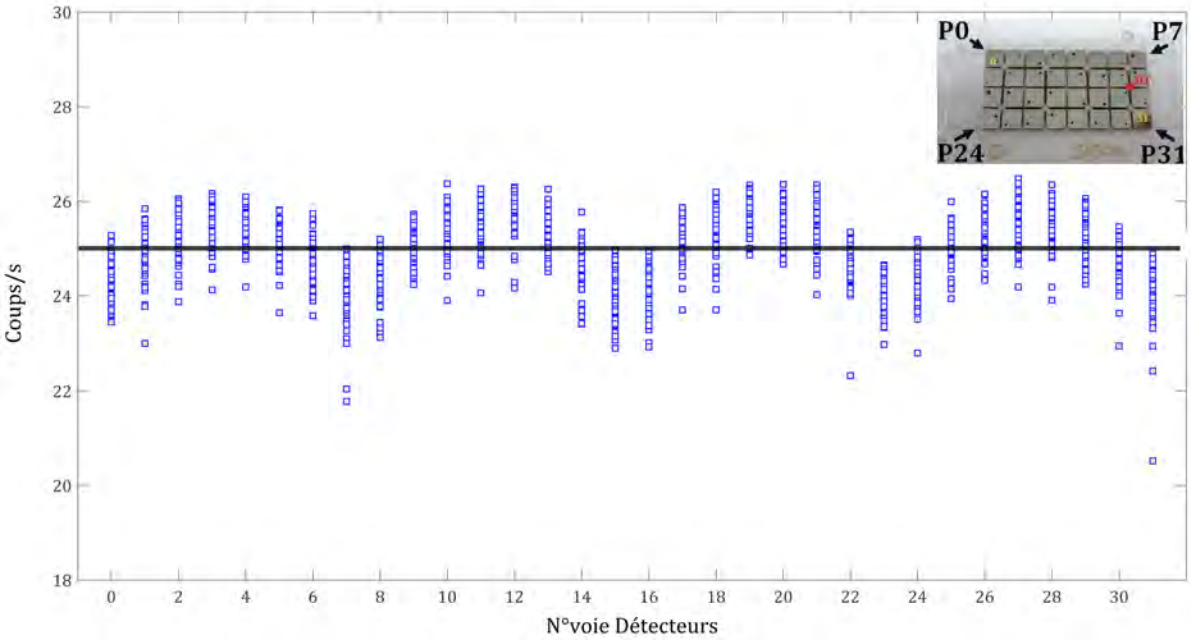


FIGURE 5.37 – Comptage de 91 modules XRDPIX de la série 2 (modèles de vol) en fonction de leurs 32 détecteurs, configurés à (−300 V ; 2,6 µs) et mesurés sur un même banc de test (BC2) / 2912 voies analysées avec un taux de comptage moyen de 25 c/s.

En s'appuyant sur la figure 5.37, nous voyons que les voies P8 et P16 se distinguent encore des autres voies détecteurs par leur comportement particulier : ici, elles comptent moins que les autres voies quand nous nous plaçons en mode single, c'est à dire quand nous ne lisons pas les événements qui surviennent simultanément durant la même fenêtre temporelle de 10

µs. En comparant à la valeur moyenne du taux de comptage sur la statistique de près de 3000 détecteurs (25 c/s), les voies P8 et P16 montrent respectivement un taux moyen (sur 91 modules) de 24 c/s et 24,3 c/s. Je parviens à la conclusion que ces voies doivent montrer un taux d'événements multiples bien plus élevé que les autres, et sont donc plus bruyantes, ce qui converge avec les résultats trouvés pour le seuil bas en énergie (paragraphe 5.3.1.2).

Après plusieurs phases d'investigation, j'en déduis que certains signaux numériques d'entrée (comme SC, STROBE, D_{IN}) sont « ré-injectés » en entrée de certaines voies détecteurs et provoquent alors une saturation des voies concernées pendant les phases de lecture de l'énergie, pendant lesquelles il ne devrait rien se passer. Une conséquence directe de ce phénomène est que les voies affectées par ce problème vont mettre plus de temps à revenir à un état stable (dépendance du peaking time) : dans le meilleur des cas, le temps mort est augmenté, et dans le pire des cas c'est le seuil bas qui augmente.

D'autre part, j'ai étudié l'influence du signal TRIG sur les entrées détecteurs P8 et P16. Ainsi, en diminuant ce signal (avec par exemple l'ajout d'une capacité), nous parvenons à diminuer le nombre de multiples. Cette solution reste tout de même assez brutale, car nous avons mis en œuvre un filtrage du signal TRIG trop fort, et ce dernier ne varie plus : il faut alors trouver une valeur limite du signal pour laquelle il ne perturbe pas ces deux voies détecteurs tout en maintenant son intégrité. Une solution « hardware » alternative a été trouvée, en modifiant les résistances du signal TRIG vers la tension d'alimentation (ligne TRIG - Receiver LVDS), amenant les voies P8 et P16 à compter normalement, et éviter de parasiter les autres voies du module. En effet, cette solution efficace consiste à abaisser les résistances connectées aux signaux TRIG (par défaut à 3,3 kΩ, modifiées à 1,5 kΩ par exemple), ce qui conduit le déclenchement intempestif à s'adoucir ; c'est d'ailleurs cette solution que j'avais choisie pour réaliser les tests unitaires dans des conditions optimales pour évaluer les performances ultimes de chaque module.

Toutefois, s'il n'est pas possible d'appliquer ces modifications sur le design de l'électronique ELS de vol (notamment avec le choix réduit des composants électroniques dû aux contraintes liées aux réglementations d'exportation), je peux aussi configurer les modules XRDPIX avec une valeur de seuil numérique plus élevée pour ces voies, par exemple SBN = 20 (soit une valeur équivalente de seuil bas en énergie autour de 5 keV), et ce comportement, perturbateur pour l'imagerie, va diminuer, voire disparaître totalement. C'est la raison pour laquelle, dans le cas du modèle de vol, je propose de paramétrer les seuils numériques des voies P8 et P16 à cette valeur '20' plutôt qu'à 12 ($\approx$ 2,8 keV), comme initialement prévu pour définir une marge de détection autour du seuil de 4 keV, même si ma préférence ne va pas vers cette solution !

D'autres voies montrent un comptage particulier, phénomène que je pense être corrélé à leurs positions sur la matrice XRDPIX (Fig. 5.37). En effet, j'ai pu constater que les détecteurs positionnés dans les quatre coins du module sont majoritairement les plus bruyants, affichant des performances dégradées, que ce soit en matière de comptage mais aussi de FWHM et de seuil bas en énergie. Dans le cas du comptage, l'exemple des voies détecteurs P0 et P31 est pertinent : elles ont, respectivement, un taux de comptage de 24,3 c/s, et de 24 c/s, anormalement bas, tout comme les voies P8 et P16. Je pense que, dans ce cas, cela est dû essentiellement au design du module, qui conduit à des capacités équivalentes plus importantes en périphérie ; d'ailleurs, les voies estimées puis mesurées comme étant les meilleures sont celles des positions centrales, à savoir P19, P20, etc. Cela peut aussi être, dans une moindre mesure, la conséquence d'une dégradation physique des détecteurs après leur montage sur les céramiques CE ; les CdTe dans les coins (soit avec deux faces non entourées par d'autres cristaux) sont moins protégés durant la phase de découpe des trottoirs par exemple, et lors

des nombreuses étapes de manipulation des Céramiques Détecteurs (même si la préhension des détecteurs ne se fait jamais directement !).

5.3.1.4 Quelques corrélations

Le comptage en fonction de la FWHM

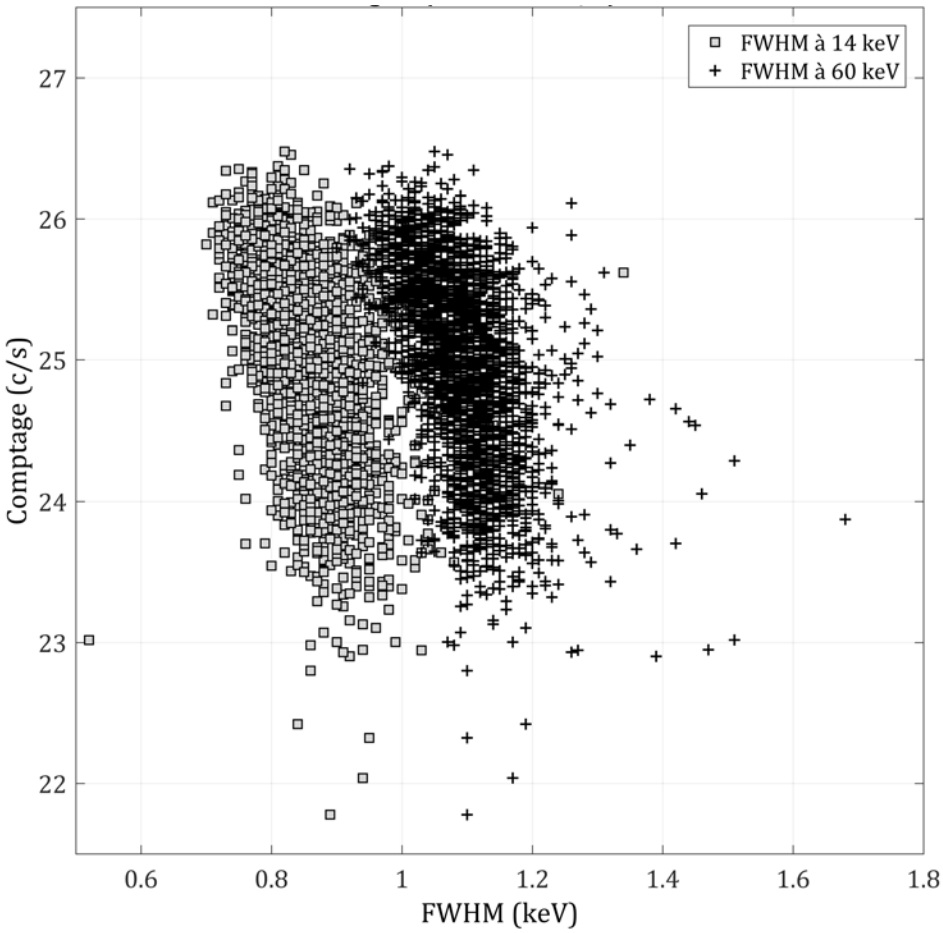


FIGURE 5.38 – Taux de comptage en fonction de la FWHM de la raie à 14 keV (cercles gris) et de la raie à 60 keV (croix noires) de 80 modules XRDPIX (soit 2560 voies détecteurs) testés dans la configuration (−300 V ; 2,6 µs) à −20°C.

La figure 5.38 nous éclaire sur l'évolution du comptage de photons avec la finesse de la largeur à mi-hauteur des pics à 14 keV et à 60 keV, pour lequel une dispersion des valeurs est légèrement plus grande (dans cet exemple, plus de 2000 détecteurs ont été analysés).

Nous observons une inversion de proportionnalité non négligeable, indiquant la corrélation entre l'efficacité de détection des modules XRDPIX, et leur résolution spectrale. Les coefficients de corrélation de la régression linéaire sont de 0,51 pour le pic à 14 keV et de 0,52 pour le pic à 60 keV.

La FWHM en fonction du courant de fuite des détecteurs

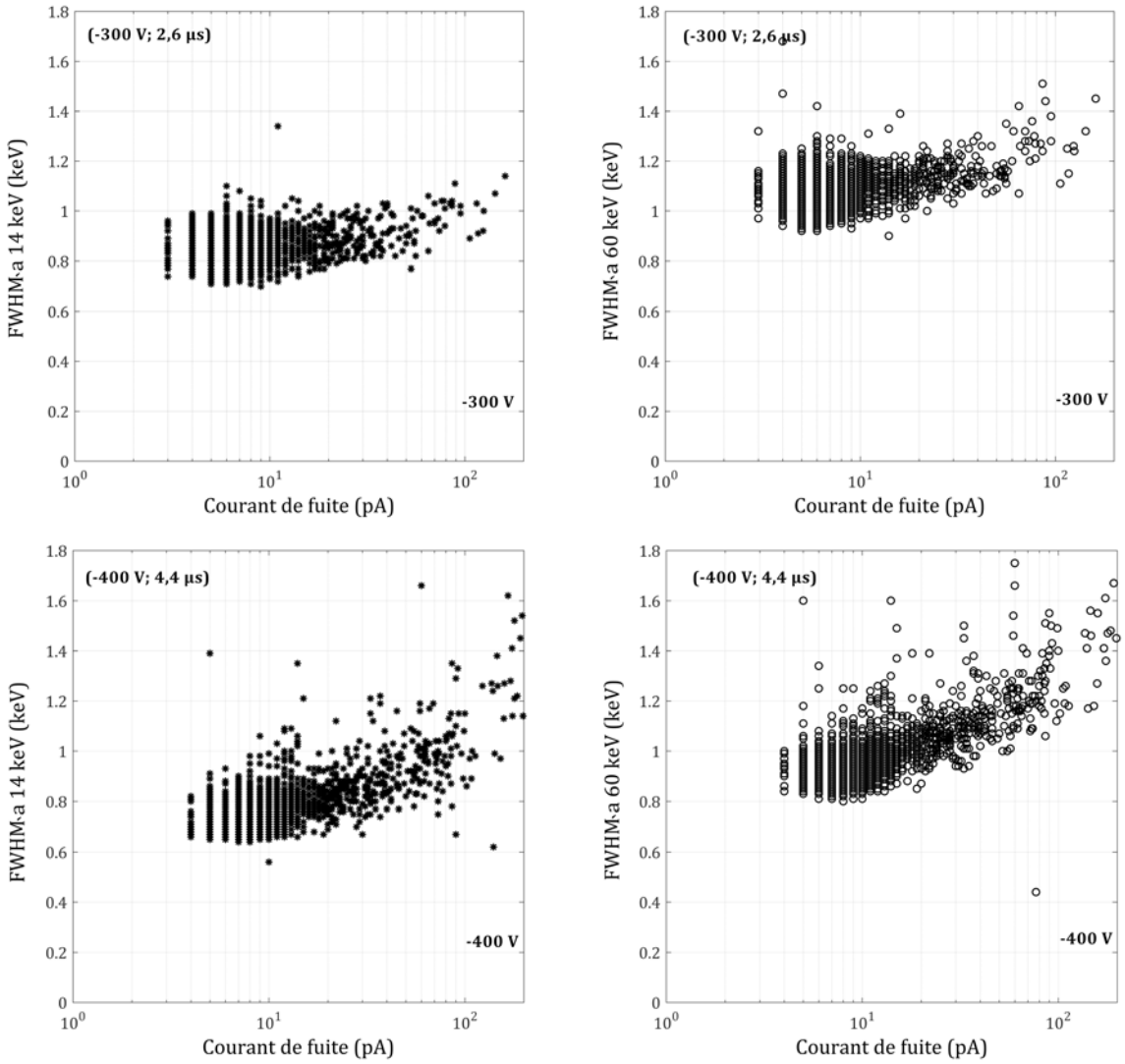


FIGURE 5.39 – FWHM des pics à 14 keV (graphes de gauche) et à 60 keV (graphes de droite) de 80 XRDPIX FM testés en configuration (−300 V ; 2,6 µs) et (−400 V ; 4,4 µs), en fonction du courant de fuite des détecteurs CdTe polarisés à −300 V (graphes du haut) puis à −400 V (graphes du haut).

Les graphes de la figure 5.39 illustrent la relation entre les valeurs de FWHM (dans cet exemple, des pics à 14 keV et 60 keV) des modules XRDPIX, et les courants de fuite des détecteurs CdTe (mesurés sur les Céramiques Détecteurs, avant leur contre-collage sur les Céramiques ASICs), à deux polarisations (−300 V et −400 V), en lien avec la formule F4.1 de la section 5.2.1.

Nous constatons une population de 2560 courants de fuite plus dispersée à plus haute tension de polarisation, mais avec des valeurs de FWHM affinées dans la configuration (−400 V ; 4,4 µs).

La FWHM, le courant de fuite et les capacités selon les positions détecteurs

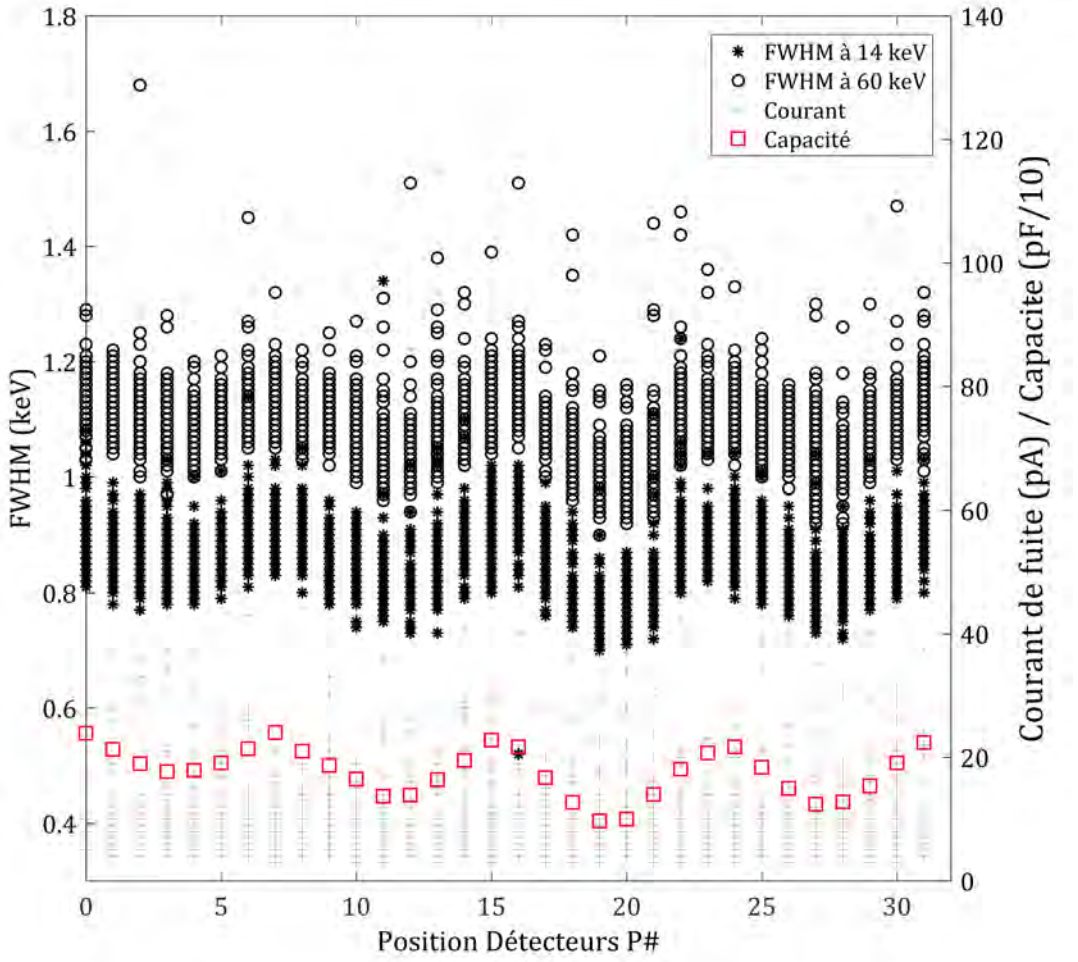


FIGURE 5.40 – Quatre courbes de paramètres de performance selon la position des voies détecteurs : FWHM à 14 keV (étoiles noires) / FWHM à 60 keV (cercles noirs) / Courants de fuite (croix grises) / Capacités (carrés rouges).

L'étude de la figure 5.40 permet de confirmer, d'une part, l'impact défavorable des capacités des substrats céramiques sur les valeurs de FWHM (dans cet exemple, 80 modules XRDPIX ont été testés en configuration (-300 V ; $2,6$ µs), soit 2560 spectres en énergie des détecteurs, dont j'ai extrait 2560 largeurs à mi-hauteur classées selon la position de chaque détecteur sur le XRDPIX), et, d'autre part, le lien quasi inexistant entre le courant de fuite et ces mêmes capacités. Nous confirmons ainsi la somme quadratique de tous ces bruits, qui ne proviennent pas d'une seule source, et leur forte corrélation avec les performances spectrales.

5.3.2 Des études spécifiques sur un module XRDPIX FM

Dans ce chapitre, nous allons étudier des comportements particuliers d'un même module, en jouant sur un paramètre clé différent dans chaque sous-section.

5.3.2.1 L'évolution des performances à plus basse température d'un XRDPIX

Nous avons réalisé des mesures spectrales à 4 températures basses, de −20°C à −35°C, dans une même configuration de polarisation (−300 V) et de peaking time (2,6 µs), pour étudier l'impact de la température sur les performances. Les statistiques couvrent l'ensemble des 32 voies d'un même XRDPIX, toutes programmées à la même valeur de seuil numérique de 16, qui équivaut à ~4 keV.

Les graphes ci-dessous montrent les spectres calibrés de la voie 'P10' d'une source radioactive scellée d'^{241}Am aux températures de −20°C, −25°C, −30°C et −35°C (fig. 5.41) :

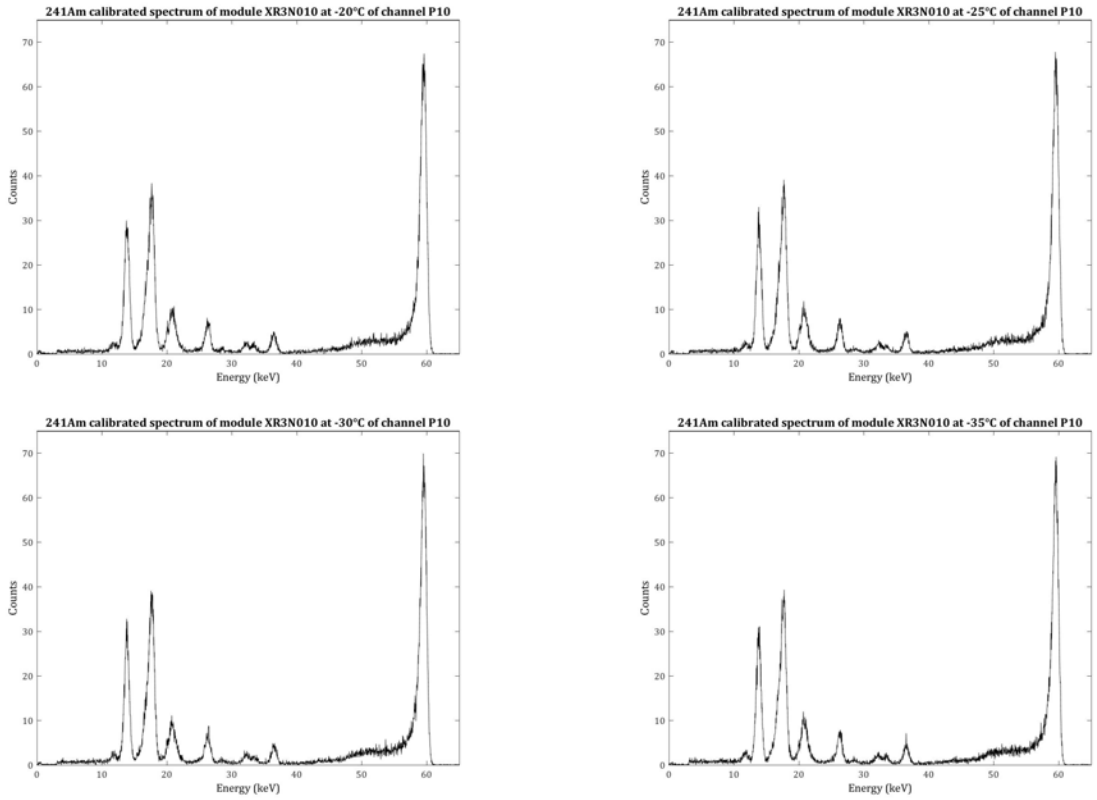


FIGURE 5.41 – Spectres en énergie calibrés d'une source de la source ^{241}Am d'une voie CdTe d'un module de détection XRDPIX, à partir d'une chaîne d'acquisition de 65536 canaux reconstruite sur 8192 canaux avant calibration.

Ainsi, nous observons une grande stabilité spectrale au cours de la descente en température. Le tableau des statistiques 5.6 montre une évolution très légèrement positive de la résolution en énergie et surtout, une amélioration des seuils bas.

En effet, les FWHM des pics de ^{241}Am diminuent de ~0,02 keV à −35°C, et le seuil bas en énergie s'améliore avec la baisse de température de 0,2 keV en 15°C, ce qui correspond à une précision d'un canal de conversion de l'électronique de vol.

En conclusion, en dessous de −20°C, la baisse de température a un véritable impact sur la performance de seuil bas en énergie.

Parmi les modules XRDPIX de vol, nous avons effectué des tests supplémentaires pour peaufiner la phase de qualification spatiale. C'est ainsi que nous avons testé 3 modules à des

Table 5.6 – Statistiques de 32 voies d'un module XRDPIX QM (XR3N010) en fonction de la température de test, en configuration (-300 V ; $2,6$ μs).

Température (°C)	-20	-25	-30	-35
FWHM[14keV] - Moyenne (keV)	0,942	0,934	0,933	0,923
FWHM[14keV] - Ecart-type (keV)	0,031	0,032	0,032	0,029
FWHM[18keV] - Moyenne (keV)	1,177	1,162	1,140	1,141
FWHM[18keV] - Ecart-type (keV)	0,049	0,050	0,046	0,051
FWHM[60keV] - Moyenne (keV)	1,134	1,122	1,122	1,117
FWHM[60keV] - Ecart-type (keV)	0,035	0,034	0,036	0,037
Seuil bas 6σ - Moyenne (keV)	2,55	2,51	2,44	2,38
Seuil bas 6σ - Ecart-type (keV)	0,32	0,27	0,34	0,31

températures plus basses que la température nominale de l'instrument ECLAIRs (jusqu'à -35°C).

Le plan de détection sera régulé à -20°C avec une marge [-18°C / -23°C]. Cependant, il peut arriver que le système thermique général ne chauffe pas suffisamment et que, dans ce cas, les modules XRDPIX soient plus froids que la spécification.

Dans cette partie, nous présentons un test spécifique réalisé sur 96 voies détecteurs afin d'étudier l'évolution de leurs performances aux températures suivantes : -25°C, -30°C et -35°C. La configuration est la même que celle décrite dans la section 5.3, hormis le temps de stabilisation de la température plus long (4 h au lieu de 2 h).

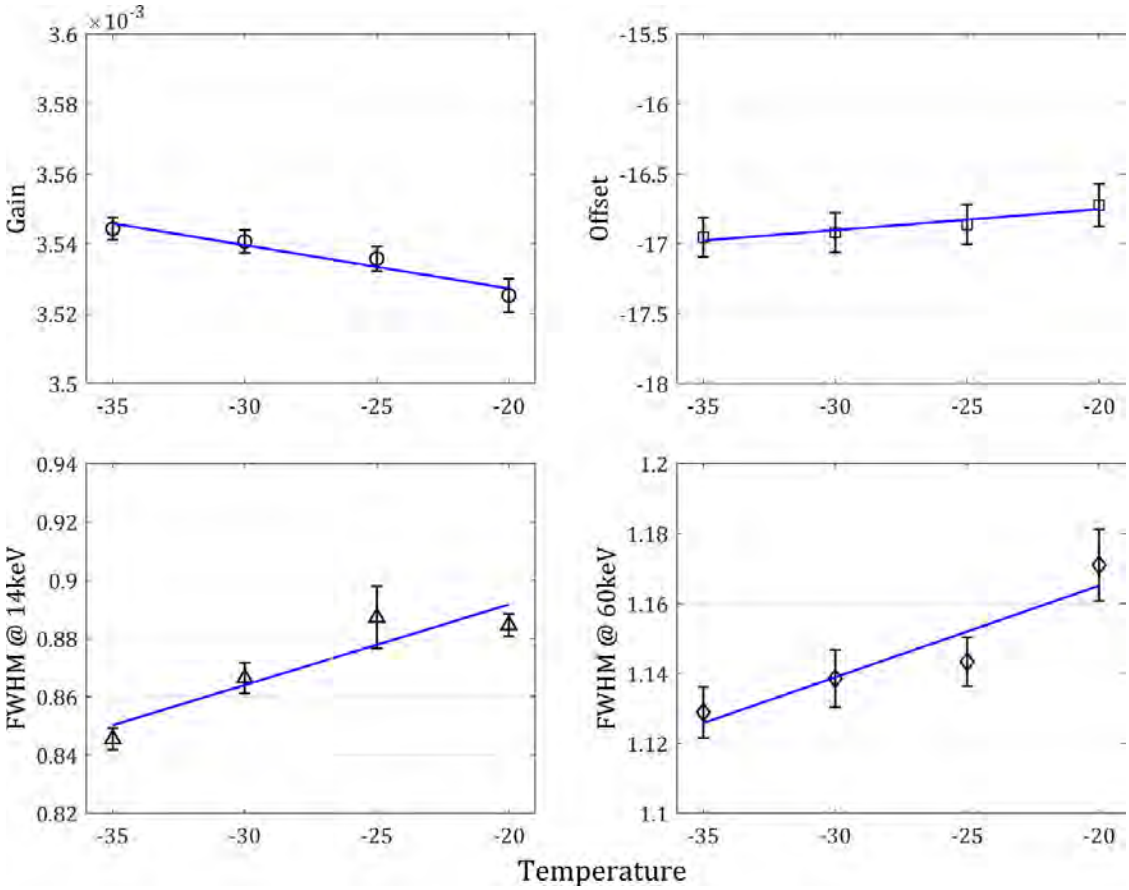


FIGURE 5.42 – Quatre paramètres de performance en fonction de la température - En haut à gauche : Gain après calibration 16 bits / En haut à droite : Offset après calibration 16 bits / En bas à gauche : FWHM du pic à 14 keV / En bas à droite : FWHM du pic à 60 keV - Tous les graphes sont obtenus à partir de 96 spectres détecteurs (soit 3 modules XRDPIX) paramétrés à la configuration (−300 V ; 2,6 µs).

En étudiant une plus grande statistique sur la figure 5.42 (ici 96 détecteurs contre une seule voie figure 5.41), nous constatons une excellente stabilité des performances spectrales des modules de détection à des températures inférieures à −20°C.

En effet, les mesures donnent une moyenne des 96 FWHM des 2 pics de ^{241}Am diminuée de 0,04 keV en 15°C, ce qui reste très faible. De plus, nous pouvons conclure que nous sommes, dans ce cas, à la limite du bruit du détecteur.

5.3.2.2 L'effet du temps de polarisation sur la résolution et sur le comptage d'un XRDPIX

L'ensemble de nos mesures ont été réalisées à partir d'acquisitions de 30 minutes, avec une même durée de polarisation des détecteurs, et ce de façon à comparer les quelques 250 XRDPIX dans des conditions identiques et reproductibles.

Au vu du nombre d'essais et du temps que nous avions sur le projet, nous avons dû choisir de privilégier une durée d'acquisition assez courte, au détriment de la représentativité du taux de comptage ; en effet, pendant la mission SVOM, nous nous attendons à des taux

de comptage légèrement inférieurs à 1 événement par seconde, tandis que pour les essais de validation des performances, nous avions, selon le banc de test, de l'ordre de 40 c/s/dét et 50 c/s/dét en moyenne.

Pour autant, j'ai étudié 2 modules, toujours à partir de spectres acquis pendant 30 minutes, mais cette fois-ci pendant un temps de polarisation des détecteurs XRDPIX qui a duré jusqu'à 24 h (quatre valeurs de durée de la haute tension appliquée : 30, 60, 300 et 1440 min), soit plus élevé qu'il ne sera configuré dans l'espace.

J'ai analysé l'évolution de la résolution et du comptage de 64 voies détecteurs au cours du temps, illustrée dans la figure 5.43.

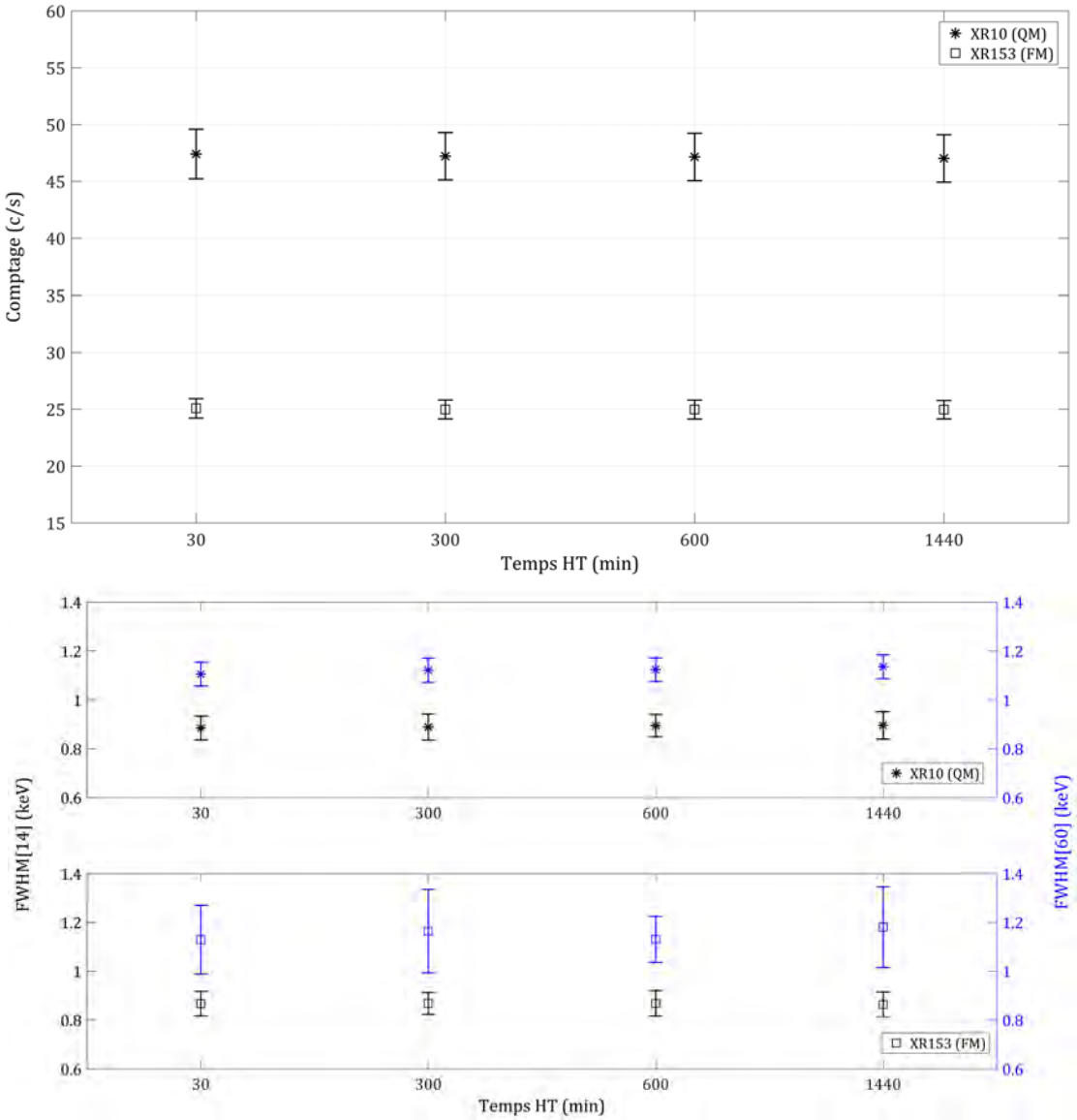


FIGURE 5.43 – Graphe du haut : Taux de comptage en fonction de temps de polarisation (30 min - cas nominal - 300 min - 600 min - 1440 min) / Graphe du bas : FWHM des raies à 14 keV et 60 keV en fonction de temps de polarisation - Configuration (-300 V ; $2,6\mu$s) - 2 modules XRDPIX 'XR10' et 'XR153' (soit 64 voies mesurées) refroidis à $-20°C$.

En s'appuyant sur les graphes présentés, nous pouvons constater que les valeurs de FWHM et les taux de comptages sont très stables au cours du temps (haute tension de valeur $-300V$ appliquée jusqu'à 24 h).

C'est ainsi que la valeur de FWHM de la raie à 14 keV varie de 0,885 ±0,049 keV (au bout de 30 min de polarisation) à 0,895 ±0,056 keV (quand 1440 min de polarisation se sont écoulées) pour le XRDPIX 'XR10' et de 0,867 ±0,050 keV (30 min) à 0,863 ±0,052 keV (1440 min) pour le 'XR153'. En moyennant les deux modules, cela correspond à une augmentation de 0,4 %.

Concernant la valeur de FWHM de la raie à 60 keV, nous débutons à 1,105 ±0,048 keV (30 min) pour finir à 1,136 ±0,049 keV (1440 min) pour le XRDPIX 'XR10' et de 1,129 ±0,141 keV (30 min) à 1,181 ±0,165 keV (1440 min) pour le 'XR153'. En moyennant les deux modules, cela induit une augmentation de 3,6 % sur près d'une journée.

Enfin, les taux de comptage débutent en moyenne à 47,4 ±2,2 c/s/det pour terminer à 47 ±2,1 c/s/det pour le XRDPIX 'XR10' et de 25,1 ±0,85 c/s/det à 24,9 ±0,81 c/s/det, soit une baisse de $-0,7$ % pour une haute tension de 24 h (les taux sont très différents entre les modules car ils ont été testés sur des bancs différents (5.3).

En conclusion, les dérives temporelles de la résolution (dégradation) et du comptage (diminution) sont très faibles, et tout à fait acceptables pour le projet.

5.3.3 Quelques performances de la caméra prototype

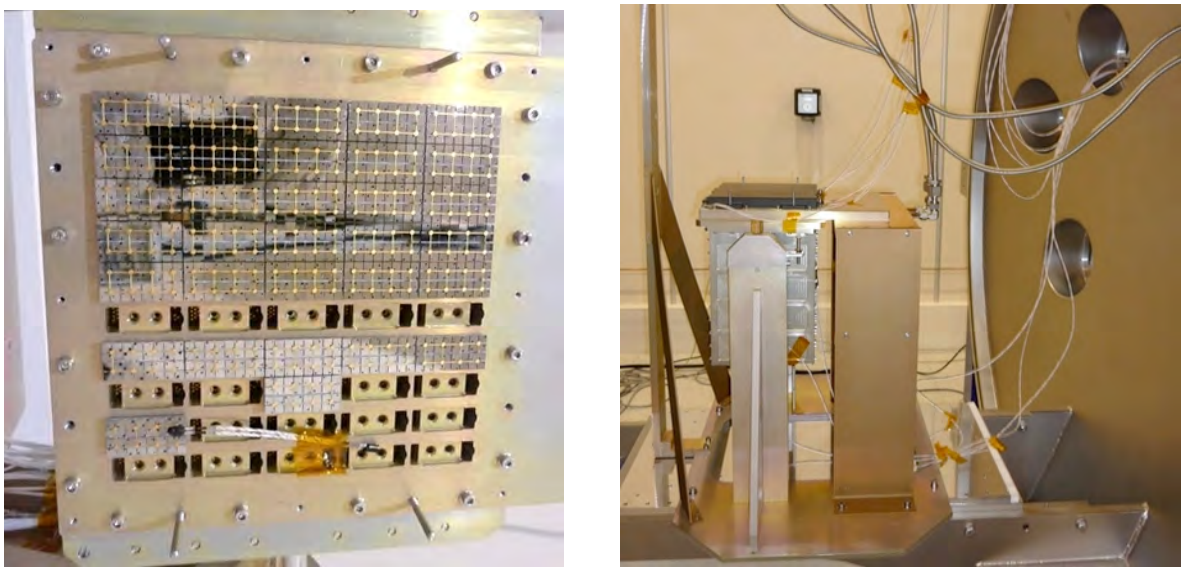


FIGURE 5.44 – Images du ProtoDPIX : un secteur complet représentant 1/8 de la caméra ECLAIRs, et un secteur dépeuplé avec 7 modules.

Une fois les modules XRDPIX testés unitairement sur les bancs jumeaux (Figure 5.23), nous avons monté 25 XRDPIX (modèles de présérie correspondants à des modules de qualification) sur un même secteur (un ELS en version « Engineering model »), appelé « ProtoDPIX » que nous pouvons voir sur la figure 5.44. C'est ainsi qu'en connaissant les performances individuelles ultimes de chaque module, nous cherchons alors à vérifier, d'une part, le bon fonctionnement de ce sous-système ProtoDPIX, et d'autre part, la qualité des performances

Table 5.7 – Table des étapes de mise en route et de vérification précédents une acquisition spectrale du ProtoDPIX

	Description des étapes de mise en route
Etape 1	Mise sous tension d'un module ELS : tensions +/- 7V et +5V
Etape 2	Mise sous tension des 25 modules XRDPIX d'un secteur : tension +3V
Etape 3	Vérification du fonctionnement des 800 voies détecteurs d'un secteur (déclenchement nominal)
Etape 4	Polarisation de 25 modules XRDPIX d'un secteur (la Haute Tension est activée à la valeur nominale).
Etape 5	Acquisition de données : comptages et spectres en énergie de chaque voie détecteur.

spectrales et de comptage, dans le cas d'un regroupement de modules, représentatif d'une future partie de la caméra d'ECLAIRs (1/8).

Pour réaliser les tests du ProtoDPIX, nous avons utilisé un moyen d'essais spécifique, développé par l'IRAP et installé au CNES (Fig. 5.45), composé notamment des éléments suivants : une enceinte thermique d'environ 3,4 m^3, un cryothermostat fonctionnant en circuit fermé pour atteindre des températures basses jusqu'à $-60°C$, des pompes à vide, primaire et turbo, pour obtenir un vide secondaire meilleur que $P < 10^{-5}$ mbar. Outre le volume important de la cuve, la grande différence avec les bancs de tests unitaires est l'électronique de commande et de traitement des photons. Par exemple, le convertisseur analogique-numérique est de 12 bits, avec des spectres en énergie convertis sur 10 bits (1024 canaux) de façon à se rapprocher de l'électronique de vol.

Les résultats que je présente par la suite sont extraits de mesures effectuées dans les conditions suivantes :

1. Pour réaliser une étude comparative des performances spectrales des 25 modules XRDPIX montés sur le ProtoDPIX, j'ai programmé les détecteurs à plusieurs configurations (HT ; tp) : (−400 V ; 4,4 µs) / (−300 V ; 2,6 µs) / (−300 V ; 6,8 µs) / (−250 V ; 4,4 µs) / (−450 V ; 2,6 µs) / (−450 V ; 6,8 µs) ; par défaut, les voies qui avaient été identifiées mauvaises lors d'essais précédents, ont été désactivées (le registre de seuil est fixé à '63') et toutes les autres voies détecteurs sont programmées à deux seuils numériques différents ('30', soit ≈ 8 keV pour l'étape de calibration des spectres, puis 'automatique', avec des valeurs s'échelonnant entre '7' et '11', soit respectivement 1,4 keV et 2,5 keV, pour l'étape du calcul de seuil bas en énergie). Tous les autres registres ASIC sont programmés à des valeurs fixes identiques à celles des bancs de recette (Tableau 5.3). La source de ^{241}Am a une activité de 2,14 MBq (à la date du 04/08/2009), est positionnée à 45 cm au dessus du mini plan, et l'acquisition spectrale débute au bout de 5 min de stabilisation de la haute tension.

2. Pour étudier l'évolution des performances dans le temps (durée de polarisation jusqu'à 24 h), et ainsi évaluer l'impact de la polarisation sur plusieurs orbites, j'ai réalisé des spectres dans les mêmes conditions que précédemment décrites, exceptées les différences suivantes : une seule configuration (−300 V ; 2,6 µs), et une polarisation de 24 h au lieu de 3600 s, avec des acquisitions toutes les 15 min.

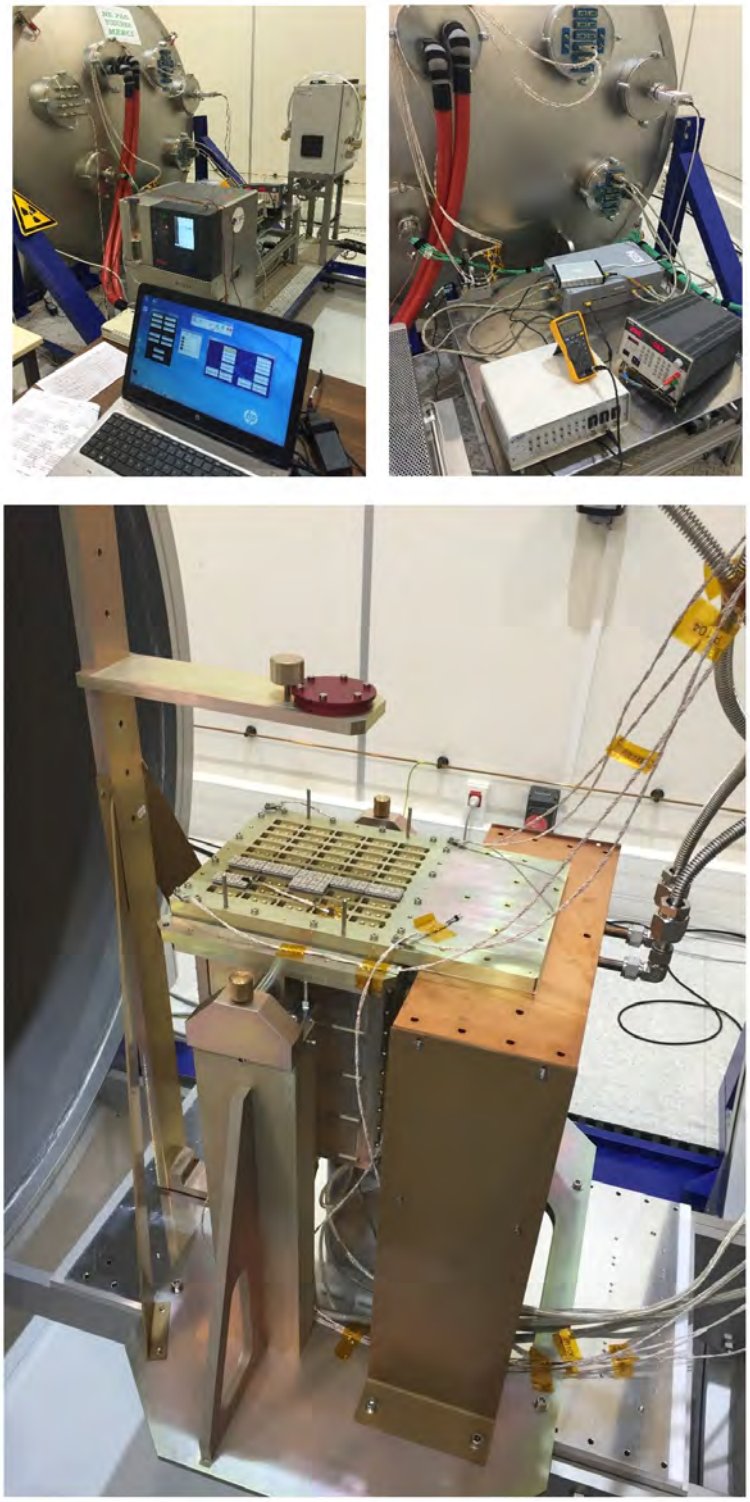


FIGURE 5.45 – Banc de test pour valider le protoDPIX représentant 1/8 de la caméra de l'instrument ECLAIRs. L'électronique est située sous le plan de détection. La source radioactive est contenue dans le boîtier rouge. La température mission est assurée par un liquide caloporteur circulant à l'intérieur de flexibles inox (sur la droite de la photo du bas).

5.3.3.1 Les performances du ProtoDPIX selon plusieurs configurations (HT ; tp)

La résolution comparée dans plusieurs configurations (HT ; tp)

Les histogrammes de la figure 5.8 montrent des valeurs de FWHM à 14 keV (graphes de gauche) et des valeurs de FWHM à 60 keV (graphes de droite) selon des paramètres communs de peaking time, qui nous permettent de comparer les performances du ProtoDPIX en fonction de la haute tension : 4,4 µs pour la première ligne (histogrammes magentas et gris), 2,6 µs pour la deuxième ligne (histogrammes bleus et gris) et 6,8 µs pour la dernière ligne (histogrammes cyans et gris).

Nous observons des distributions très proches pour la FWHM à 14 keV, pour un peaking time identique ; seule la population à −250 V est légèrement décalée vers la droite, avec une médiane plus élevée dans ce cas (cf. tableau 5.8).

En revanche, l'étude des distributions des valeurs de FWHM à 60 keV montre des différences significatives : nous voyons l'impact négatif de l'abaissement de la haute tension (en valeur absolue), avec des médianes plus élevées dans les configurations à −250 V et −300 V (respectivement de 1,96 keV, 1,66 keV et 1,62 keV). Cela confirme, d'une part, une dégradation des performances spectrales à plus haute énergie, lorsque les détecteurs sont polarisés à plus basse tension, et d'autre part, la prédominance du paramètre 'Haute tension' devant le paramètre 'Peaking time'.

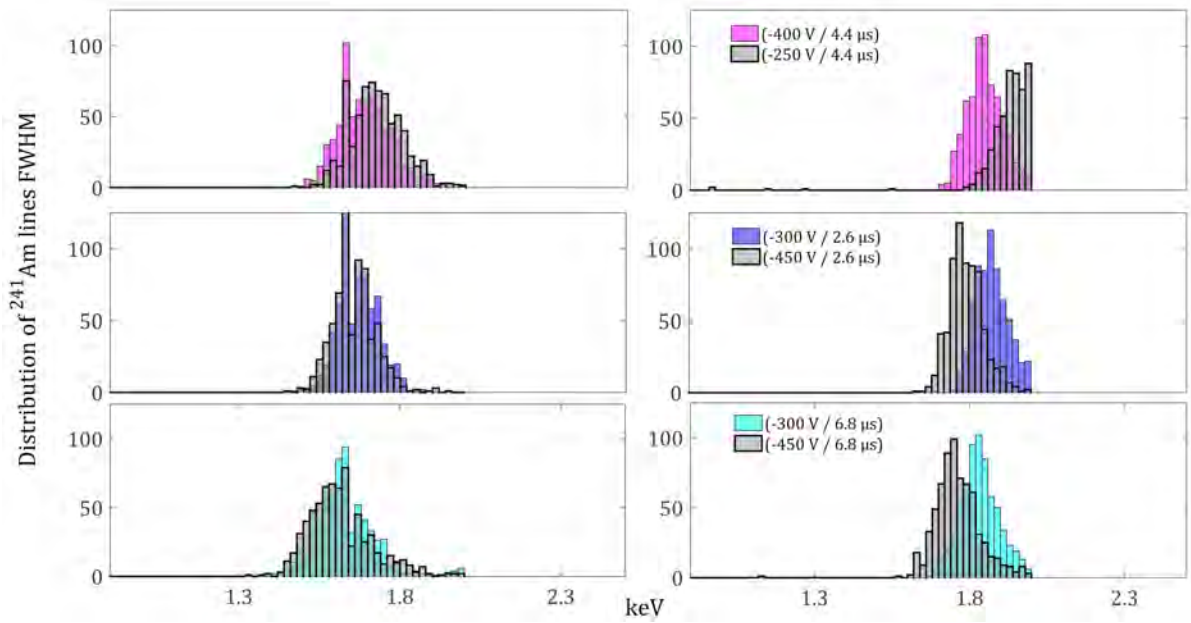


FIGURE 5.46 – Histogrammes des valeurs de FWHM des pics à 14 keV (graphes de gauche) et 60 keV (graphes de droite) de la source de ^{241}Am en fonction de 6 configurations (Haute tension ; Peaking time) : (−400 V ; 4, 4µs) en magenta / (−300 V ; 2, 6µs) en bleu / (−300 V ; 6, 8µs) en cyan / (−250 V ; 4, 4µs), (−450 V ; 2, 6µs) et (−450 V ; 6, 8µs) en gris.

Table 5.8 – Statistiques du ProtoDPIX : FWHM

Configurations (V ; µs)	−400 ; 4,4	−300 ; 2,6	−300 ; 6,8	−250 ; 4,4	−450 ; 2,6	−450 ; 6,8
Médiane[1] (keV)	1,67	1,66	1,62	1,72	1,65	1,60
Médiane[2] (keV)	1,84	1,87	1,83	1,96	1,78	1,75

[1] : FWHM du pic à 14 keV (≈ 10% des 800 valeurs non analysées)
[2] : FWHM du pic à 60 keV (≈ 10% des 800 valeurs non analysées)

Le seuil bas en énergie étudié dans deux configurations

La figure 5.47 permet de constater que la valeur maximale de la haute tension appliquée aux détecteurs, à savoir −450 V, a un impact sur la performance en seuil bas ; en effet, à même valeur de peaking time, la dispersion des valeurs de seuil bas est accentuée à polarisation plus élevée, avec dans ce cas une moyenne de 6,6±4,5 keV contre une moyenne égale à 5,7±4,1 keV à −300 V. De la même façon, tout comme j'avais pu observer dans le cas de l'étude des modules XRDPIX unitaires (section 5.3.1.2), une plus grande dispersion des seuils bas en énergie en configuration (−400 V ; $4,4\mu$s), il y a convergence de ces deux conclusions. Enfin, en calculant les valeurs de seuil bas au paramètre de peaking time $4,4\mu$s, nous obtenons une moyenne de 5,6±4,4 keV contre 5,7±4,1 keV à $2,6\mu$s, ce qui permet de conforter les choix pris en termes de configuration (HT ; tp), à savoir de privilégier l'homogénéité à la moyenne des seuils bas (notons la légère différence de tension à −250 V au lieu de −300 V).

5.3.3.2 L'évolution dans le temps de la résolution et du taux de comptage

FWHM à 14 keV et 60 keV d'un secteur sur 24 h de polarisation

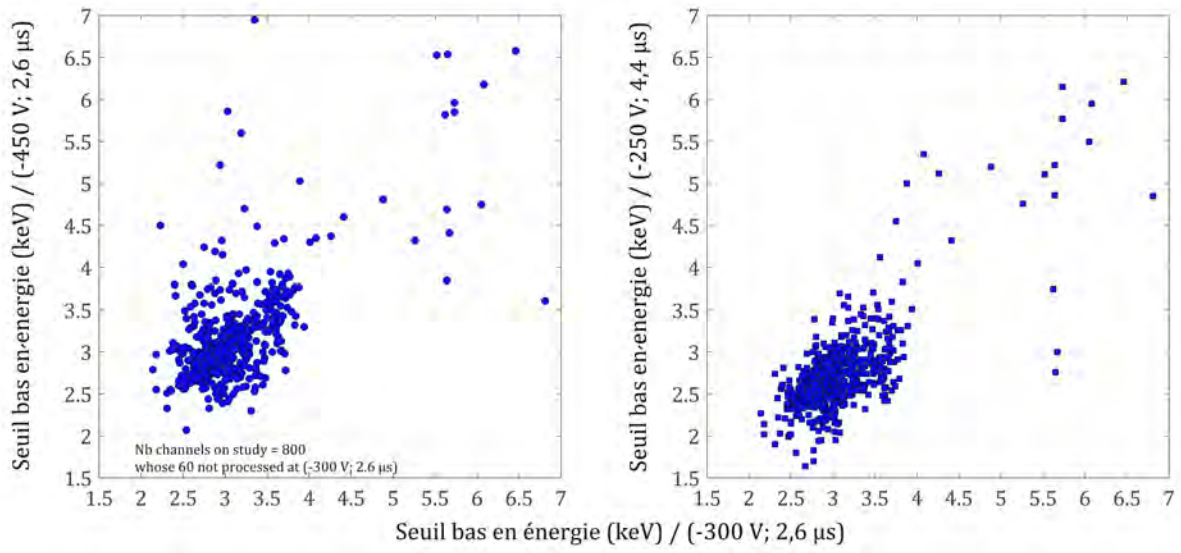


FIGURE 5.47 – Seuil bas en énergie de 25 modules XRDPIX d'un secteur ELS (soit 800 voies du ProtoDPIX). Graphe de gauche : mesures en configuration (-450 V ; $2,6\mu$s) en fonction des mesures effectuées à (-300 V ; $2,6\mu$s). La médiane des seuils bas (calculés à 6 σ) est, respectivement, de 3,02 keV dans la première configuration contre 2,91 keV dans la deuxième. / Graphe de droite : mesures en configuration (-250 V ; $4,4$µs) en fonction des mesures effectuées à (-300 V ; $2,6\mu$s). La médiane des seuils bas est de 2,69 keV dans la configuration à peaking time plus élevé.

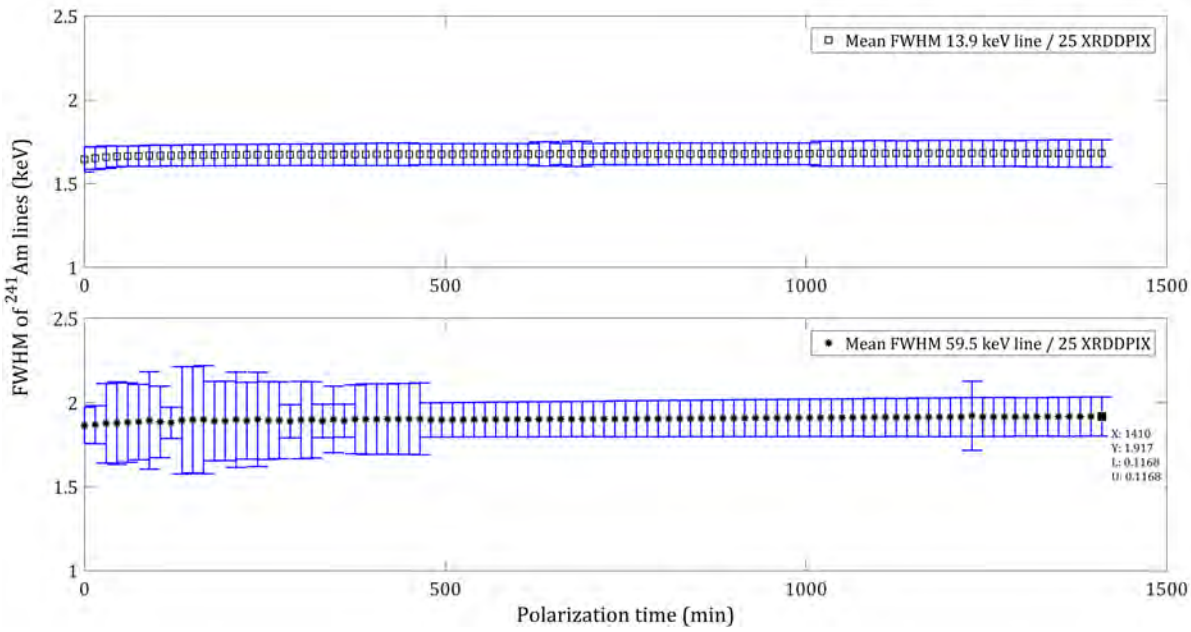


FIGURE 5.48 – Évolution de la moyenne des 800 valeurs des FWHM aux pics à 14 keV (graphe du haut) et 60 keV (graphe du bas) en fonction de la durée de la haute tension de -300 V appliquée aux détecteurs pendant 24 h. Le ProtoDPIX est refroidi à -20 ± 1°C.

Le graphe 5.48 nous permet de voir que la moyenne de FWHM à 14 keV est stable dans le temps : au bout de 15 min de polarisation (t_0), la moyenne des 800 voies détecteurs du ProtoDPIX est de 1,644±0,075 keV et au bout d'une journée de polarisation, la moyenne atteint 1,680±0,081 keV. De plus, la médiane des FHHWM à 14 keV évolue de ≈ 1,8 %. En ce qui concerne la FHWM au pic de 60 keV, la moyenne des 800 voies détecteurs est de 1,865±0,108 keV à t_0, et après 24 h de polarisation, la moyenne atteint 1,917±0,117 keV. De plus, la médiane des FHHWM à 60 keV évolue de ≈ 2,6% (près de 10 % des voies ont été écartées de l'analyse). Cela confirme la grande stabilité temporelle de la résolution spectrale des détecteurs XRDPIX lorsqu'ils sont refroidis à la température de −20°C. L'effet de polarisation (dont j'ai parlé au chapitre 2), avec la dégradation des performances spectroscopiques qu'il peut causer, n'est pas observé ici, ce qui est très encourageant pour les mesures spectrales en vol.

Comptage d'un secteur sur 24 h de polarisation

Grâce à la figure 5.49, nous constatons que la moyenne du taux de comptage, effectuée sur 800 voies détecteurs du ProtoDPIX, est de 8,62 ±0,21 c/s à t_0, et après 24 h de polarisation, la moyenne est de 8,63 ±0,21 c/s. Par ailleurs, si la médiane des comptages évolue très faiblement pendant plus de 14 h, de ≈ 0,4%, nous observons ensuite une augmentation sans continuité de ≈ 0,76% par rapport à la dernière valeur de médiane, et de ≈ 1,12 % par rapport à la médiane à t_0 ; de même, il apparaît une voie singulière, qui s'est mise à compter de façon prononcée au même moment (voie instable), qu'il sera possible de couper sans perturber les comptages des autres voies. Malgré cet événement non élucidé, il y a donc une grande stabilité du taux de comptage dans le temps, au moins durant 14h pendant lesquelles les détecteurs sont polarisés à −300 V.

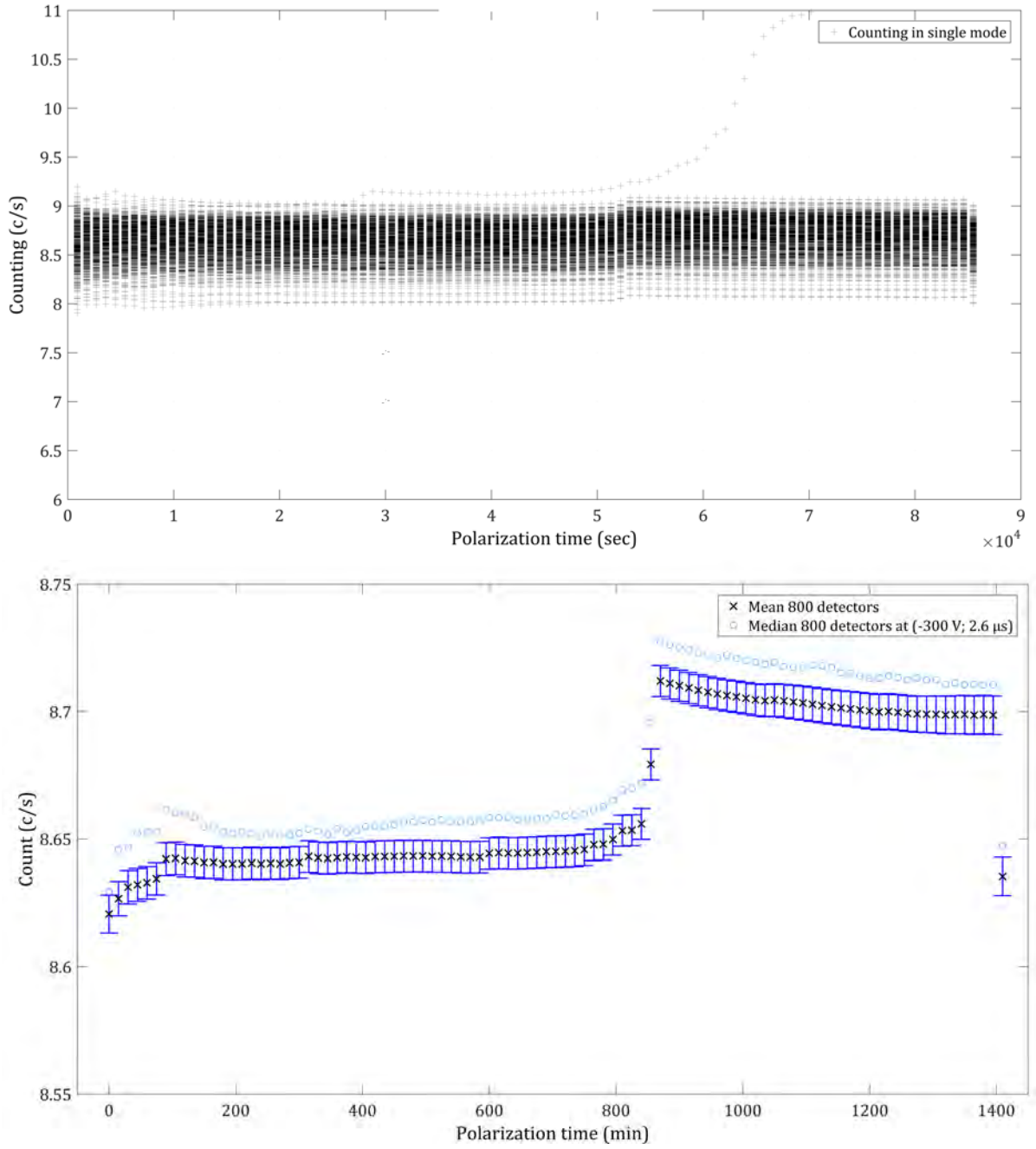


FIGURE 5.49 – Évolution du comptage en fonction de la durée de la haute tension de −300 V appliquée aux détecteurs pendant 24 h. Graphe du haut : 800 valeurs de taux de comptage / Graphe du bas : moyenne des 800 valeurs de taux de comptage. Le comptage intégral est effectué sur chaque spectre dans la gamme d'énergie [8 - 65] keV dans le mode single, c'est à dire que tous les événements multiples ne sont pas intégrés au calcul. Le ProtoDPIX est refroidi à −20±1 °C.

Je termine ce chapitre avec quelques mots de synthèse sur l'étude des performances des modules XRDPIX. Au travers des figures que j'ai présentées, la résolution spectrale, le seuil

bas en énergie, le comptage, des modules unitaires puis du ProtoDPIX, je suis confiante pour la suite des activités du projet, même si bon nombre de tests de qualification (*mécanique* [Vibrations Sinus et Aléatoire et Chocs], *thermique* [Cyclages sous vide], *mécanique* [chocs], *EMC* [modes conduit et rayonné], etc.) attendent ces petits XRDPIX.

C'est ainsi que nous avons vu l'importance de paramètres de configuration, qui assureront les beaux résultats vus précédemment :

— le peaking time, qu'il faudra programmer entre 2,6 µs et 4,4 µs (la valeur intermédiaire de 3,4 µs n'a pas été étudiée dans ce manuscrit mais pourra aussi convenir)

— la haute tension, qui pourra être plus basse en début de mission, autour de −300 V, pour être augmentée en milieu de vie du satellite (−450 V), avec l'évolution du comportement des détecteurs CdTe (dégradation probable au cours du temps, du fait des interactions avec des particules chargées)

— la température, à réguler à −20°C (voire plus bas encore !), qui est le paramètre majeur pour le succès de SVOM, sans quoi, non seulement les performances vont être dégradées, mais surtout nous observerons une perte d'homogénéité sur la caméra, due notamment à l'augmentation rapide de la dispersion des courants de fuite avec la remontée en température.

Chapitre 6

Perspectives instrumentales pour le futur

SVOM sera lancé en 2022, et nous nous projetons, dans ce chapitre, dans l'avenir des télescopes spatiaux tels que l'instrument ECLAIRs. Nous commencerons par identifier les leçons tirées de cet instrument, pour ensuite amener une réflexion sur son optimisation et proposer un Super ECLAIRs, et un tout nouveau concept d'instrument hautes énergies pour la détection des sources transitoires.

Avant d'imaginer les perspectives instrumentales pour le futur, je trouve intéressant de regarder le passé. Voici un tableau (6.1) qui relate les caractéristiques scientifiques et techniques de plusieurs télescopes spatiaux, dont certains sont toujours en activité et d'autres représentent des perspectives de détection de sursauts.

Table 6.1 – Missions à la découverte des sources transitoires X durs

Mission Instrument	*INTEGRAL*[a] ISGRI[b]	*SWIFT*[c] BAT[d]	*ASTROSAT*[e] CZTI[f]	*SVOM*[g] ECLAIRs[h]	*eXTP*[i] WFM[j]	*THESEUS*[k] XGIS-LE[l]
Surface de détection (cm^2)	2600	5000	976	1024	1080	512
Champ de vue (sr)	0,11	1,4	0,01[1]	0,9	3,7	2,51
Gamme d'énergie (keV)	[15 - 1000]	[15 - 150]	[20 - 200]	[4 - 150]	[2 - 50]	[2 - 30]
Résolution (arcmin)	12	17	18[1]	86	4,2	25
Nombre sursauts/an	9,3	90	55 (~ 1[1])	70		
Technologie	CdTe	CZT	CZT	CdTe	SDD	SDD[g]
Détecteurs Nombre de détecteurs / pixels	16384 / 16384	32768 / 32768	64 / 16384	6400 / 6400	24 / $\approx 3\ 10^6$	24576 / 24576
Nombre d'ASIC	4096	256	128	200	24	7680
Température de fonctionnement (°C)	0°	20°	[5°- 15°]	−20	−30/−3	−20/0
Orbite (Hauteur)[2] (km)	9,000 × 150,000	600	650 / 6°	650	550	600
Orbite (Inclinaison)[2] (°)	52°	22°	6°	3	5	3
Durée nominale Mission (années)	≥ 16	≥ 15	≥ 5			

[1] Pour des sursauts gamma dans le champ de vue de CZTI.

[2] Données orbitales en début de mission.

Références : [a]Winkler et al. [2003], [b]Lebrun et al. [2003], [c]Gehrels et al. [2004], [d]Barthelmy et al. [2005], [e]Agrawal [2004]; Singh et al. [2014], [f]Bhalerao et al. [2017]; Vadawale et al. [2016], [g]Wei et al. [2016], [h]Godet et al. [2014], [i]Zhang et al. [2016], [j]Hernanz et al. [2018], [k]Campana et al. [2018], [l]Amati et al. [2017]; Stratta et al. [2018]

6.1 Les problématiques des grands télescopes

Dans cette section, nous menons une réflexion sur la conception de grands plans de détection placés derrière des masques codés. En effet, le besoin scientifique pour ce type d'imageurs est fort, avec la constante nécessité d'augmenter leur sensibilité aux sources transitoires [Lacombe et al., 2019].

D'ailleurs, pour détecter les sources transitoires à rayons X, beaucoup d'instruments à base de CdTe ont montré leur efficacité au cours de l'histoire spatiale, comme présenté dans l'introduction. De par les progrès continus dans la technologie CdTe et notre propre expertise sur ces détecteurs, nous allons surtout focaliser notre discussion sur les plans de détection pixélisés comprenant des cristaux de Tellure de Cadmium.

6.1.1 Les grandes surfaces

Comme expliqué dans la section 2, dans les années à venir il sera très probablement nécessaire de recourir à des imageurs dotés de grandes surfaces. Comme le montrent les tableaux précédents, les instruments spatiaux actuellement développés présentent des zones sensibles pixelisées qui ont une surface égale ou supérieure à 0,1 m^2 (soit 1000 cm^2).

Nous pouvons voir notamment que le record est détenu par BAT/*SWIFT*, avec une zone de 5200 cm^2 comprenant 32768 détecteurs CdTe lus par 256 ASICs. Bien qu'il semble difficile de dépasser cette taille impressionnante (pour des raisons budgétaires, de complexité, de masse et de volume), les progrès dans la technologie des détecteurs ouvrent de nouvelles voies à la construction de grandes surfaces de détection.

Avant d'aborder les télescopes du futur, nous allons évoquer les caractéristiques importantes à prendre en compte dans la conception de grands plans détecteurs, telles que le champ de vue, l'énergie d'observation, la résolution angulaire, la modularité et le multiplexage essentiel au traitement d'un très grand nombre de pixels.

6.1.2 Un grand champ de vue

Le champ de vue est la mesure du ciel observable, représenté par l'angle solide au travers duquel un détecteur est sensible aux rayonnements (X et gamma dans notre cas). Cela correspond à la zone totale de l'espace que la caméra perçoit lorsqu'elle fixe un point, et en l'occurrence une source.

A partir d'un certain angle (quelques dizaines de degrés carrés), nous pouvons parler de grand champ de vue, qui déterminera la capacité de l'instrument à détecter plus d'objets tels que les sursauts, même si finalement, avec un petit champ de vue et moins de bruit, la détection peut aussi être fructueuse, selon le type de sources étudiées.

Nous voyons dans la table 6.1 que la statistique des sursauts observés est fortement corrélée à ce paramètre angulaire, couplé à une grande surface.

6.1.3 La gamme d'énergie

Contrairement à la polarimétrie ou à la spectroscopie, l'imagerie ne nécessite pas une aussi grande gamme d'énergie, l'essentiel étant d'obtenir beaucoup de photons.

Ainsi, une décade est généralement acceptable car elle fournit une information spectrale de base (par exemple un indice spectral pour un spectre en loi de puissance), permettant

de classer la source, et de mesurer son évolution spectro-temporelle, sans la nécessité d'une électronique avec une grande dynamique.

Dans le cas de photons détectés par des imageurs à masque codé, il est préférable de réaliser des observations à basse énergie, typiquement de l'ordre de la dizaine de keV, pour obtenir une efficacité maximale (la mise en œuvre d'un masque codé est d'autant plus complexe que les photons à haute énergie sont plus difficiles à atténuer). Par ailleurs, le multiplexage des pixels du ciel sur le plan de détection nécessite un nombre minimum de photons pour localiser une source ponctuelle sans ambiguïté.

Travailler dans une gamme d'énergie inférieure à 100 keV, permet aussi de limiter la masse de l'instrument : les éléments constituant le masque, ainsi que le blindage, peuvent être moins épais (par exemple, 0,3 mm de tantale absorbent 98 % des rayons X en dessous de 80 keV).

Cependant, la détection aux énergies de quelques keV doit faire face à des défis techniques importants. Premièrement, étant donné la spécification de transparence totale de la partie du masque laissant passer les photons, l'utilisation de tout support est écartée ; cela nécessite alors des masques codés autoportants, difficiles à développer, en particulier pour des grands instruments. Deuxièmement, les détecteurs nécessitent une température de fonctionnement assez basse, ce qui complique le système thermique général. C'est pourquoi il est préférable de ne descendre à quelques keV que si c'est une exigence scientifique forte, et sinon il est préférable de travailler au delà d'un seuil en énergie de 10 keV, qui sera plus facilement atteignable.

Pour terminer, étant donné la forme spectrale des sources cosmiques, le nombre de coups détectés (et en général le rapport signal sur bruit) est maximisé dans les gammes d'énergies plus basses. Ceci est important pour optimiser les statistiques, si nous voulons obtenir de bonnes localisations.

6.1.4 La résolution angulaire et le nombre de pixels

La résolution angulaire des imageurs à masque codé est proportionnelle au rapport xd/H, où xd est la taille des éléments du masque et H la hauteur du masque au dessus des détecteurs.

Il est généralement demandé aux imageurs grand champ d'avoir une résolution angulaire bien inférieure au degré. Cette précision, bien qu'elle soit insuffisante pour identifier les galaxies hôtes de sources transitoires extragalactiques, est tout à fait acceptable pour faire des observations de suivi avec des télescopes optiques ou à rayons X à champ étroit, pouvant localiser l'émission rémanente de la source (afterglow) avec une précision de l'ordre de la seconde d'arc.

INTEGRAL/ISGRI, *SWIFT*/BAT et *SVOM*/ECLAIRs ont tous des détecteurs de même taille (16 mm^2), mais avec des choix différents en termes de champ de vue et de résolution angulaire.

INTEGRAL/ISGRI offre la meilleure résolution angulaire ($\approx$ 12 minutes d'arc, avec xd = 11,2 mm et H = 3,2 m) et la meilleure efficacité d'imagerie, mais avec un champ de vue assez petit.

SWIFT/BAT offre un excellent compromis entre résolution angulaire (17 minutes d'arc, avec xd = 5 mm, et H = 1,0 m), champ de vue (1,4 sr à demi-codé) et efficacité d'imagerie (72 %).

Étant limité par l'encombrement qui lui est octroyé, *SVOM*/ECLAIRs offre une résolution angulaire réduite (85 minutes d'arc, avec xd = 11,4 mm et H = 0,46 m), pour un grand champ

de vue (≈ 2sr total ou 0,9 sr demi-codé), avec une très bonne efficacité d'imagerie (85 %), similaire à ISGRI.

INTEGRAL/IBIS et *SWIFT*/BAT sont des instruments très volumineux, pesant respectivement 677 kg et 200 kg ; *SVOM*/ECLAIRs est nettement plus petit et plus léger, ne pesant que 85 kg.

Compte tenu des contraintes de volume pour les instruments spatiaux, il convient de réduire la taille des pixels du masque et du détecteur, afin de conserver une précision de localisation à la minute d'arc, avec un masque codé situé à quelques dizaines de cm seulement des détecteurs.

Par ailleurs, l'utilisation de détecteurs plus petits permet un meilleur échantillonnage des shadowgrams, c'est-à-dire une meilleure efficacité en imagerie, et permet d'utiliser un masque avec de plus petits pixels pour une meilleure résolution angulaire. En théorie, nous pourrions diriger notre conception vers des pixels de taille inférieure au millimètre, et il faudrait alors plus de 10^5 pixels détecteurs pour couvrir un plan de détection de seulement 1000 cm^2. Même en choisissant d'utiliser un ASIC pour lire plusieurs dizaines de détecteurs, cela reste une contrainte importante.

Le choix des satellites *INTEGRAL*/ISGRI, *SWIFT*/BAT et *SVOM*/ECLAIRs a plutôt été de concevoir des instruments avec des détecteurs unitaires assez gros (pixels de dimensions 4 x 4 mm^2), et ce pour favoriser la sensibilité au détriment de la précision de localisation.

Par ailleurs, la conception de l'électronique de lecture pour un si grand nombre de détecteurs est un point critique pour le développement de grands plans de détection (section 6.2).

6.1.5 La modularité

Une autre propriété technique, importante pour le développement de grands plans de détection tels que BAT, ISGRI et ECLAIRs, est leur modularité.

Avec autant de détecteurs, il est essentiel d'adopter une approche modulaire, notamment en divisant le plan de détection en plusieurs centaines de modules identiques.

Compte tenu de l'intérêt pour les très grands plans de détection futurs, il semble judicieux d'étendre cette technique à la construction globale de l'instrument lui-même, en réalisant différents modules de détection (ou unités) fonctionnant ensemble, chacun ayant une surface efficace de centaines à quelques milliers de cm^2. On notera qu'après une génération d'instruments de très grande taille, comme ISGRI ou BAT, les futures missions proposent des instruments composés de plusieurs modules ayant chacun une surface de détection d'environ 1000 cm^2.

Cette stratégie, qui a été adoptée par *eXTP*/WFM (avec six modules) et *THESEUS*/XGIS (avec trois modules), renforce la fiabilité de l'instrument, et évite de fabriquer des instruments « géants », qui peuvent avoir des problèmes d'alignement, de stabilité et des phases complexes d'intégration, de test et de validation. Elle permet aussi un gain de temps, car il est possible de réaliser ou tester plusieurs modules en parallèle.

La modularité permet également de contrôler plus facilement l'homogénéité des plans de détection et les performances de l'instrument. Enfin, cette stratégie permet d'obtenir un bon compromis entre la couverture du ciel (avec les modules pointant dans différentes directions) et la sensibilité (avec des modules orientés dans la même direction). Cette approche nécessite toutefois un travail complexe et approfondi de simulations lors de la phase de conception de l'instrument pour optimiser la géométrie en fonction des objectifs scientifiques.

6.1.6 Le multiplexage

Quand nous avons plusieurs milliers voire dizaines de milliers de voies détecteurs à traiter, le multiplexage, qui permet de transmettre plusieurs voies sur une seule sortie, semble incontournable. En effet, il n'est alors plus nécessaire de faire transiter chaque information par un fil dédié, mais en les regroupant dans un seul après traitement électronique.

Face à une demande toujours croissante en commandes analogiques et numériques, un instrument spatial va embarquer plusieurs centaines de mètres de fils électriques. Quand le design électronique nécessite un grand nombre de câbles, l'encombrement peut devenir critique, combinant un problème de masse (avec l'exemple d'ECLAIRs : plus de 7 kg de harnais embarqués !) avec un problème de compatibilité électromagnétique à maîtriser, ainsi que le maintien de la fiabilité, avec une surabondance de connexions qui multiplie le risque de panne. Ainsi, le développement du harnais du DPIX ECLAIRs est un vrai challenge en raison du nombre élevé de fils à acheminer.

Pour connecter chaque module XRDPIX à l'électronique secteur, nous avons conçu un harnais spécifique prenant en charge :

— le support mécanique des connecteurs « interposeurs » pour 25 modules XRDPIX,
— les 450 connexions électriques entre 25 XRDPIX et un secteur électronique (18 signaux par module),
— la distribution de la haute tension pour 200 modules [Amoros et al., 2018].

Au total, si nous ne regardons que la caméra d'ECLAIRs, nous comptabilisons près de 4000 fils ! Nous pourrions même nous demander jusqu'à combien de fils la mission reste viable, pour que la difficulté de développement ne se transforme pas en contrainte technique insurmontable.

6.2 Parmi les télescopes du futur : un Super ECLAIRs !

Créer de grands télescopes est un challenge complexe : dans ce chapitre nous allons proposer des pistes pour réaliser des instruments significativement plus sensibles dans le futur. En se basant sur le développement de l'instrument ECLAIRs, et sur les paramètres clés qui déterminent la sensibilité d'un imageur grand champ, nous allons imaginer un instrument moderne dédié à l'étude des sources cosmiques transitoires dans le domaine des X durs.

Nous allons tout d'abord expliquer quels sont les défis à relever pour construire un imageur aussi sensible qu'ECLAIRs, avec comme contraintes un développement plus court, une diminution des rebuts et pertes, ainsi que du nombre d'essais, et enfin une optimisation de l'homogénéité des performances.

Ensuite, nous étudierons le cas d'une exigence scientifique forte, qui serait d'obtenir dix fois plus de sursauts gamma que peut détecter l'instrument ECLAIRs, et ce avec les mêmes performances de localisation. C'est ainsi que nous étudierons la faisabilité d'un ECLAIRs plus performant.

En résumé, dans ce chapitre, nous tenterons d'optimiser l'instrument ECLAIRs, pour proposer un plan de détection bien plus sensible avec moins de contraintes de design et de développement, un « Super ECLAIRs » en somme !

Un ECLAIRs optimisé

De nombreux points sont complexes à gérer dans la réalisation d'un instrument spatial dédié à la détection de sources transitoires ; son rôle bi-fonctionnel d'imageur et de spectro-

scope, avec l'objectif de localiser précisément les sources cosmologiques détectées, nous amène à connaître et surtout bien maîtriser tous les éléments du système, ainsi qu'en anticiper les problèmes d'interfaces à tous les niveaux.

C'est pourquoi à chaque étape de choix, il paraît capital de mener une phase de réflexion pour chacun des composants du plan de détection : une première phase de sélection et de caractérisation de la technologie des détecteurs (PMT, SiPM, CdTe, CdZnTe, germanium, scintillateur,...), suivie d'une phase de choix et de conception de l'électronique de proximité (un ASIC analogique comprenant des fonctions de filtrages et d'amplification, ou un ASIC analogique plus complexe intégrant des fonctionnalités de conversion du signal, ou même un ASIC quasi tout numérique, ou revenir à des composants discrets,...).

Une fois ces choix statués, des études mécano-thermiques sont indispensables à la naissance de l'instrument, incluant des compromis sur le type de blindage, actif ou passif, et sur la technologie de localisation utilisée (masque codé ou système optique).

Si un deuxième instrument ECLAIRs devait être mis au point rapidement, c'est à dire avec une exigence forte sur le temps de développement, il faudrait opter pour une nouvelle stratégie de fabrication, de conception et de test.

Tout d'abord, nous pourrions envisager de ne pas tester tous les détecteurs individuellement avant leur phase de collage (en effet, nous avons caractérisé plus de 14 000 détecteurs CdTe pour une sélection de 6400), mais plutôt de caractériser de façon approfondie et complète les matrices détecteurs (« Céramiques Détecteurs »), étant donné la différence de performance mesurée entre les détecteurs avant (unitaires) et après montage (groupe de 32). Ceci est justifié par le fait que, d'une part, j'ai observé une augmentation du courant de fuite après avoir collé les détecteurs sur leur substrat, et d'autre part, j'ai constaté une très forte homogénéité des courants de fuite des détecteurs unitaires du fabricant ACRORAD.

Ensuite nous adopterions une stratégie 'qualité' différente, comme par exemple une politique de lot, en choisissant de ne tester qu'un pourcentage des « Céramiques Détecteurs » (30 % par exemple, au vu du faible pourcentage de rebuts, technologiques ou en performance, constaté lors de la chaîne de développement des modules d'environ 15 % à 25 % et au vu des très bonnes stabilité et reproductibilité entre XRDPIX).

De plus, nous choisirions une simplification de la puce ASIC, en supprimant des fonctionnalités optionnelles pouvant causer des problèmes de bruit supplémentaires et influer négativement ainsi sur la performance de seuil bas en énergie.

Par exemple, si nous sélectionnions une seule valeur de peaking time pour l'ASIC Flight Model, nous diminuerions la complexité de l'électronique front-end en évitant la programmation de signaux numériques pouvant causer une diaphonie inter-voies (Cf. chapitre 4). En effet, nous avions sélectionné l'ASIC du CEA sur les arguments techniques de très faible bruit et de faible puissance, ce qui a été largement démontré au cours des essais de validation. Cependant, nous nous étions laissé un large choix de configuration quant au filtrage du signal (peaking time) mais aussi au type de détecteurs (deux entrées possibles pour des impulsions positives ou négatives) ainsi qu'aux possibilité de tests de la puce ASIC elle-même. C'est pourquoi il serait intéressant, en cours de projet, de faire évoluer la version de puce, en réduisant au maximum le nombre des fonctionnalités pour la version de vol.

Ce retour d'expérience m'amène à la remarque suivante : il est bon de connaître, bien en amont du choix de l'ASIC, le détecteur que nous devons hybrider et ainsi son signal à formater. Il est alors préférable de développer un ASIC dédié, c'est à dire conçu pour une seule mission spatiale, même si les ASICs actuels sont réalisés à partir de fonctions communes appartenant souvent à des bibliothèques connues et éprouvées. Ceci a l'avantage de ne pas

étaler dans le temps le développement d'une nouvelle caméra ECLAIRs, tout en définissant de façon précise les spécifications techniques de cette électronique front-end.

Par ailleurs, si nous remplacions le positionnement actuel des entrées ASIC (placées d'une seul côté) en les répartissant sur deux (ou plus) côtés de la puce, nous gagnerions en homogénéité inter-voies voire éviterions des croisements de piste malheureux. Si nous réalisions un blindage métallique autour de la céramique ASIC (sur la tranche du substrat par exemple), nous parviendrions à mieux maîtriser le bruit électrique équivalent entre chaque module. Enfin, il semble qu'une solution essentiellement analogique au sein d'une même puce ASIC, génère moins de bruit.

D'autres optimisations peuvent réduire a minima le cross-talk : en isolant le signal d'horloge (correspondant au signal « STROBE » dans notre cas de la puce ASIC Idef-X), ou en minimisant le nombre de signaux numériques qui traitent directement le signal de sortie des détecteurs, ou même en réduisant au maximum la longueur des pistes, surtout celles qui transitent entre les sorties des détecteurs et les entrées ASIC.

Un autre point important dans le design d'un grand plan de détection pixelisé est l'homogénéité inter-pixels, qui est d'autant plus difficile à obtenir qu'il y a de voies. Tous ces argumentaires techniques sont portés par la maîtrise du routage des substrats qui entrent dans la composition de l'hybride final (support Détecteurs et support ASIC).

En effet, la valeur des capacités équivalentes du circuit, ainsi que son matériau (PCB classique, PCB Téflon ou matériau céramique) vont influencer la performance des détecteurs et constituer un facteur majeur dans leur dispersion (Figures. 6.1 et 5.18).

Le choix entre un PCB courant (Printed Circuit Board ou circuit imprimé) ou une céramique est une étape clé dans le développement d'une caméra de vol : d'un côté, les substrats en céramique offrent une meilleure compatibilité thermique et un assemblage optimal avec les pixels ; d'un autre côté, leur fragilité est un frein face à des PCB solides, de plus en plus diversifiés et « à la carte ».

Enfin, pour créer un instrument spatial plus performant que l'instrument ECLAIRs tout en gardant son architecture, nous pouvons améliorer la robustesse des modules XRDPIX, en proposant de placer une protection autour du crystal CdTe (sur les tranches ou faces du pavé droit), actuellement très fragile, telle qu'une résine, ou un matériau isolant qui éviterait des fissures et dégradations du détecteur tout au long de son développement, pendant lequel il est manipulé un grand nombre de fois (phases de tests, de collage, d'inspection visuelle, etc.). Toutefois, selon le type et l'épaisseur de la résine, il faudra tenir compte de son impact sur la valeur de seuil bas exigée par la mission.

Pour résumer, la modularité apparaît essentielle dans le travail d'assemblage de ce type de détecteur X/gamma. La simplification des tests et des phases de validation est également importante, au vu des risques de casse à chaque nouvelle préhension des pixels. Nous avons vu aussi qu'il faudrait éviter de mélanger ou tout du moins rapprocher de trop les signaux analogiques avec les signaux numériques. Néanmoins, cette technologie reste complexe à mettre en œuvre pour faire plusieurs milliers de centimètres carrés.

En conclusion, si vous souhaitez faire un nouvel ECLAIRs en un temps record, un certain nombre de difficultés seront à surmonter :

— sélectionner le détecteur répondant au mieux aux exigences scientifiques et vérifier ses performances tout au long du projet,
— spécifier puis développer une électronique front-end intégrée de type ASIC par exemple, dédiée au détecteur choisi,
— sélectionner le ou les substrat(s), qui, d'une part, ne dégraderont pas les performances

du détecteur, et d'autre part, s'adapteront aux contraintes thermo-mécaniques du projet,
— concevoir le design et l'assemblage des différents matériaux de l'hybride, en évitant d'ajouter des capacités parasites et dégrader les performances unitaires de chaque élément,
— trouver un fabricant (industriel) en charge de la production des hybrides, qui sera capable de respecter les exigences technico-scientifiques assurées par le prototype (réalisé par le laboratoire ou l'agence spatiale),
— garantir le suivi des industriels pour devancer toute dérive des performances spécifiées,
— spécifier et développer tous les essais qui échelonneront le projet spatial, tout en diminuant les tests non pertinents, pouvant d'ailleurs rallonger le temps de développement.
— chercher les compétences chez les anciens !, savoir écouter les experts, et parfois, se faire confiance même quand votre idée n'est pas majoritairement approuvée.

Pour finir cette section, nous pourrions faire évoluer notre ECLAIRs avec des détecteurs sinon de nouvelles technologies, tout au moins de technologies actuelles optimisées, en proposant des améliorations pour minimiser la fragilité du CdTe (avec par exemple un blindage métallique ou une résine protectrice sur les quatre tranches du cristal), ou même l'utilisation de détecteurs « double-sided stripped CdTe », prolongement des technologies CdTe à électrodes Al et Pt, qui me paraissent être une solution d'avenir [Takeda et al., 2012][Katsuragawa et al., 2018].

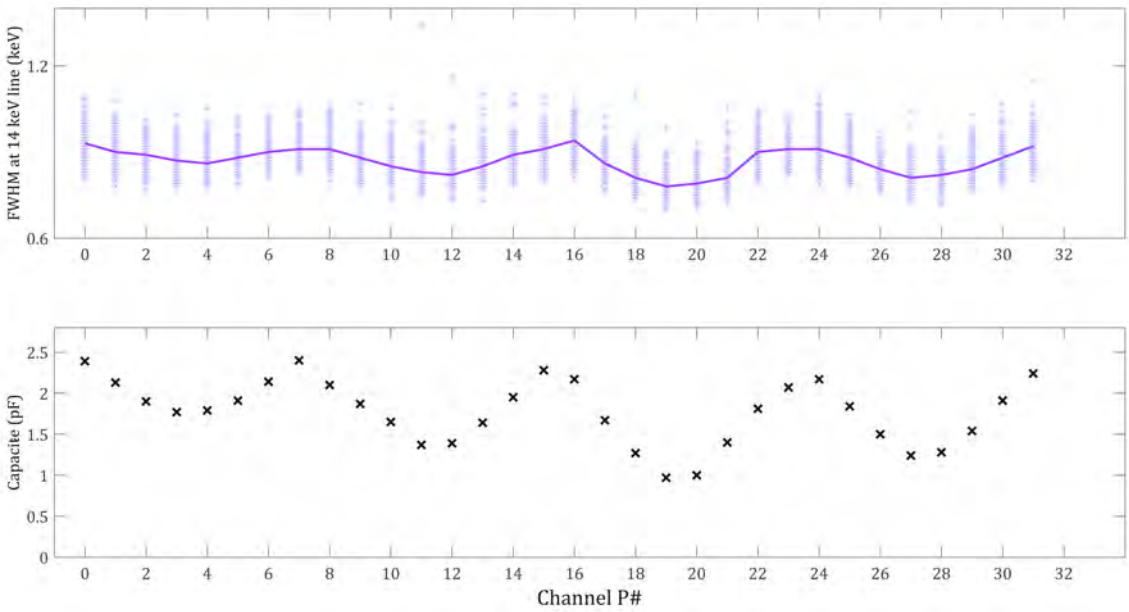


FIGURE 6.1 – Graphe du haut : FWHM du pic à 14 keV ($\approx$ 5000 valeurs) en fonction des 32 voies de chaque module XRDPIX de la série 2 (soit 163 XRDPIX) paramétré en configuration (−300V ; 2,6 µs) - En violet, tracé de la médiane de chaque module. / Graphe du bas : Capacités mesurées sur chaque voie d'une même céramique.

Un imageur dix fois plus grand

Avec ce retour d'expérience, et en émettant l'hypothèse d'une surface de détection dix fois plus grande, nous pouvons quantifier le nombre de sursauts qu'un super ECLAIRs pourrait détecter, et espérer en augmenter significativement la statistique, tout en montrant une plus grande fiabilité et un développement rapide et optimal.

Agrandir un imageur par un facteur dix est un challenge technique difficile : aussi, il est intéressant d'évaluer si les contraintes technologiques et instrumentales auxquelles doit répondre un super ECLAIRs se justifieraient par une plus grande statistique de sursauts gamma détectés.

J'ai simulé la probabilité de détection de sursauts à partir d'une table de sursauts gamma détectés par BAT/*SWIFT* dans plusieurs cas d'instruments, avec des surfaces totales plus grandes que celles de l'instrument ECLAIRs, dont un super ECLAIRs dix fois plus grand (≈ 4000 cm^2 de surface efficace), ayant un champ de vue et un temps d'observation identiques, en émettant les hypothèses suivantes :

— une gamme d'énergie se situant entre 4 keV et 80 keV,
— une extraction et une analyse des mêmes valeurs de T90, fluences, peak photon flux et index des lois de puissance,
— un nombre de coups dans chacun des instruments, divisé par la racine carrée du produit du bruit de fond et du T90,
— une ouverture du masque de 40 %.

Les figures 6.2 et 6.3 affichent huit graphes donnant une population de sursauts gamma détectés par l'instrument BAT, avec leur nombre de photons en fonction de leur fluence respective. Ils sont répartis selon la valeur du rapport signal sur bruit (égal à 7 pour les graphes de gauche et 14 pour ceux de droite).

Cela nous permet de constater une différence assez faible entre ECLAIRs et les plus grands instruments, avec un écart du nombre de sursauts détectés qui se réduit dans le cas d'un rapport S/B plus élevé. En effet, si ECLAIRs perdait 45 sursauts gamma sur un total de 335 (rapport signal sur bruit de 7), un super ECLAIRs n'en perdrait que 5 (quelque soit le seuil), ce qui semble être une avancée discutable. D'ailleurs, dans cet exemple, à partir de 2000 cm^2 de surface efficace, quasiment tous les sursauts gamma observables seraient détectés, ce qui, connaissant les problématiques de développement, n'incite pas à réaliser un plan de détection pixelisé de 10000 cm^2, si nous gardons le même champ de vue et surtout avec un temps d'observation comme celui d'ECLAIRs.

A contrario, nous voyons que la statistique de détection diminue rapidement avec la taille du plan, avec 64 sursauts non détectés sur 205 cm^2 contre 45 sursauts gamma non détectés sur 410 cm^2, et ce pour un même rapport signal sur bruit. L'instrument ECLAIRs apparaît comme une limite inférieure, avec ses 1024 cm^2 de surface totale.

Nous pouvons aussi nous demander si les limites supérieures en matière de surface géométrique ne sont pas déjà atteintes avec BAT/*SWIFT*. Ainsi, l'enjeu d'un ECLAIRs plus grand serait d'associer aux 5000 cm^2 de surface totale (soit 2000 cm^2 de surface efficace si l'on souhaite garder la même ouverture de masque ECLAIRs) un champ de vue plus grand, supérieur ou au moins égal à 2 sr. Une nouvelle étude du bruit de fond serait alors implicite, dans la gamme d'énergie de [4 - 80] keV. Par ailleurs, étant donné les compromis technologiques inhérents aux grandes surfaces détectrices, nous comprenons que le temps d'observation joue un rôle important dans l'augmentation de la statistique de détection des sursauts gamma.

La figure 6.4, donnant le taux de détection par l'instrument ECLAIRs des sursauts gamma

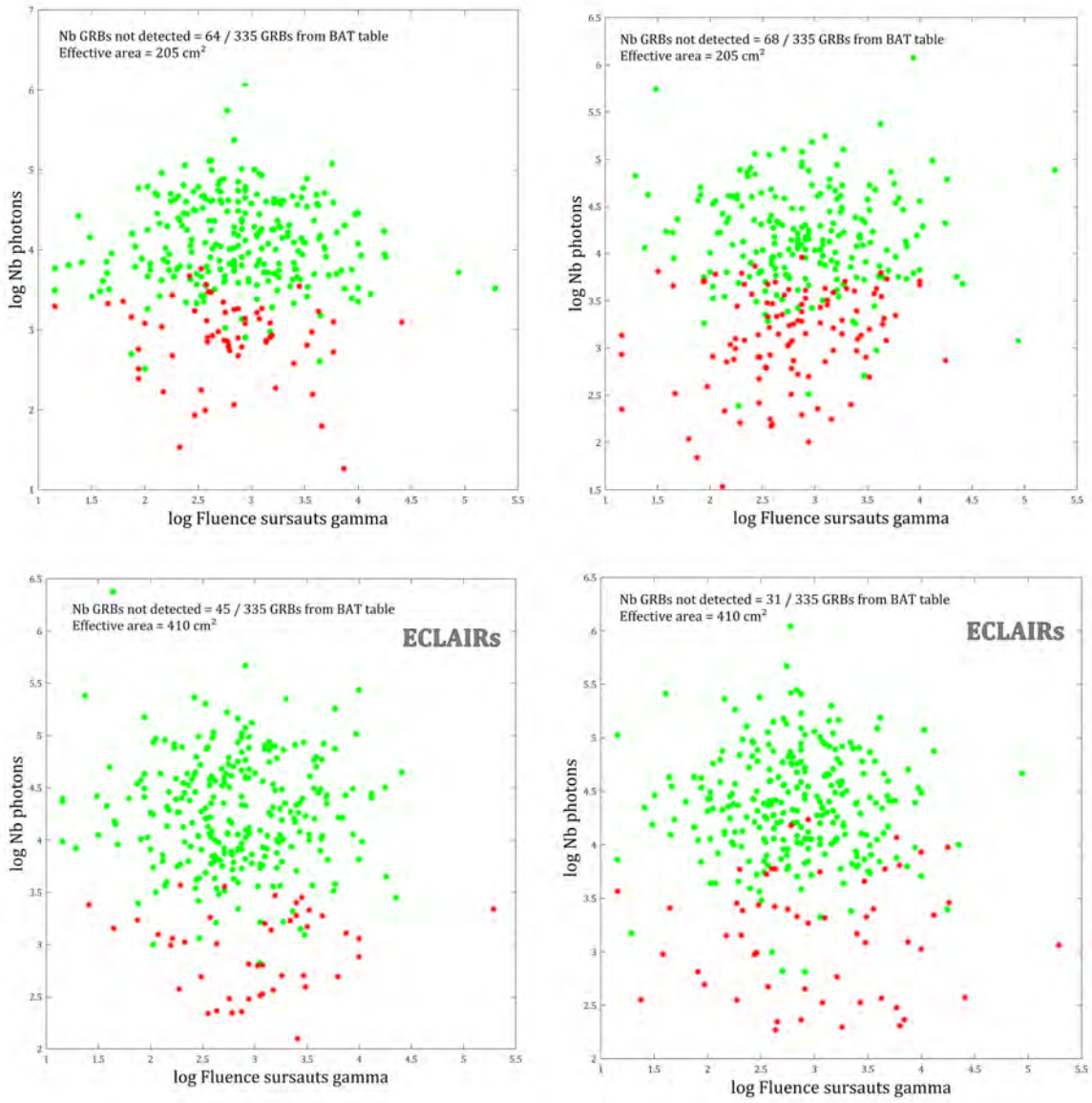


FIGURE 6.2 – Sursauts gamma que pourrait détecter un instrument de conception similaire à ECLAIRs, dans la gamme d'énergie [4 - 80] keV, mais avec une surface efficace plus petite (en vert : les sursauts détectés / en rouge : les sursauts non détectés). Graphes du haut : un mini ECLAIRs deux fois plus petit (surface efficace $\approx$ 200 cm^2)/ Graphes du bas : Instrument ECLAIRs - Simulation effectuée à partir de la table des sursauts gamma détectés par BAT/*SWIFT* dans [15 - 150] keV (liste du 05/03/2015) - Hypothèse : S/B = 7 pour les graphes de gauche et S/B = 14 pour les graphes de droite.

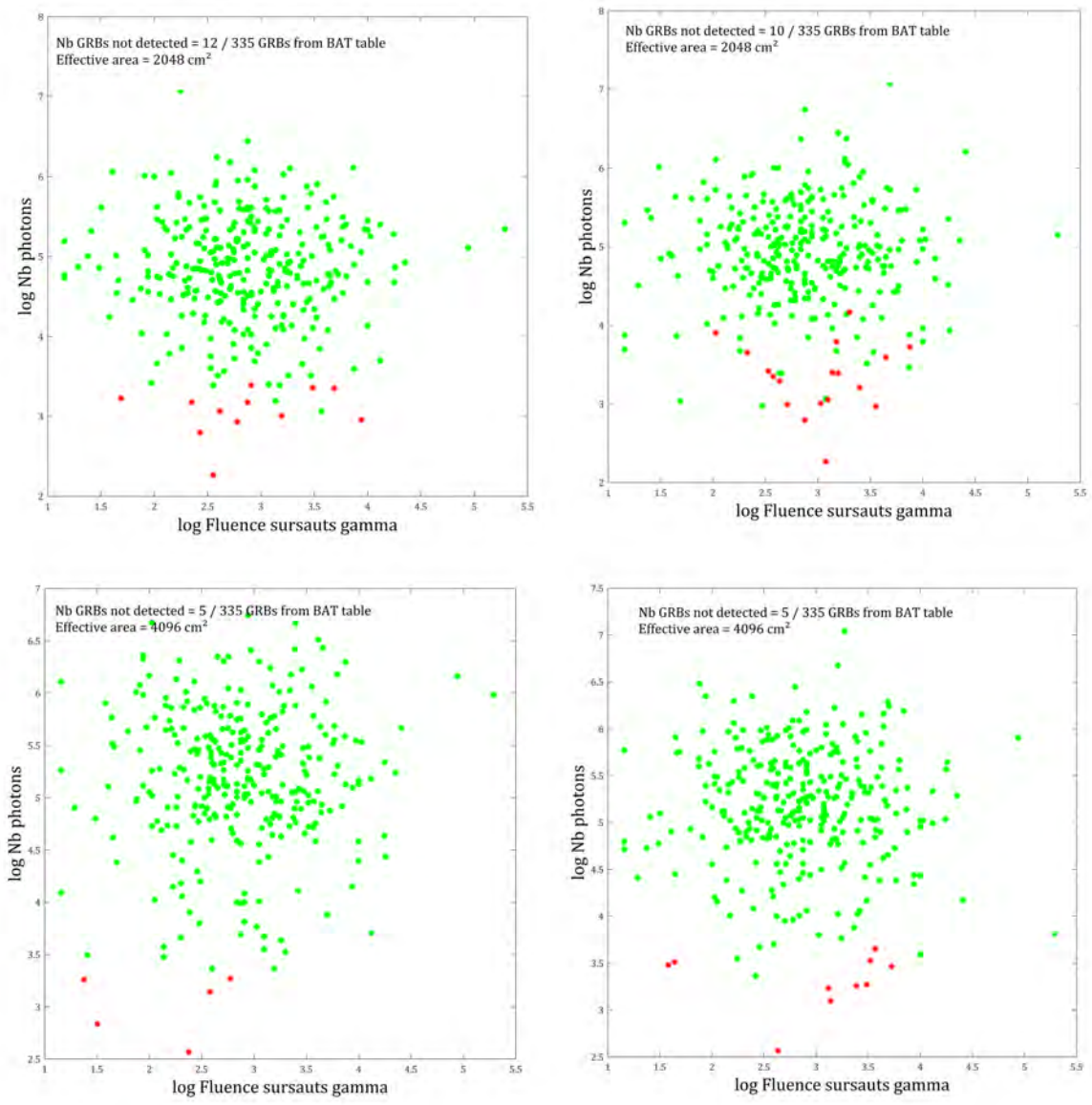


FIGURE 6.3 – Sursauts gamma que pourraient détecter deux instruments de conception similaire à ECLAIRs, dans la gamme d'énergie [4 - 80] keV, mais avec une surface efficace plus grande (en vert : les sursauts détectés / en rouge : les sursauts non détectés). Graphes du haut : un SUPER ECLAIRs cinq fois plus grand ($\approx$ 2000 cm^2)/ Graphes du bas : un SUPER ECLAIRs dix fois plus grand ($\approx$ 4000 cm^2) - Simulation effectuée à partir de la table des sursauts gamma détectés par BAT/*SWIFT* dans [15 - 150] keV (liste du 05/03/2015) - Hypothèse : S/B = 7 pour les graphes de gauche et S/B = 14 pour les graphes de droite.

de BAT en fonction de la longueur du côté du plan de détection puis de la gamme d'énergie, nous permet de voir que le taux de détection est optimal à plus basse énergie, dans l'hypothèse d'une surface constante. Toutefois, cette pré-étude succincte se veut surtout introductive, pour nous amener à étudier de façon approfondie la balance bénéfice-risque (un futur sujet de thèse ?).

Un autre point critique reste la technologie de masque codé, qui, au delà d'une certaine aire, conduit à des problématiques non seulement de masse mais aussi de planéité. J'aboutis à la conclusion que l'avenir de l'instrumentation spatiale gamma, pourra, peut-être, résider dans le développement d'une dizaine de petits instruments, qui, s'ils sont convenablement agencés et s'ils fonctionnent correctement ensemble, détecteront autant voire davantage de sursauts qu'un seul grand instrument de dimensions équivalentes, tout en maximisant la performance de localisation.

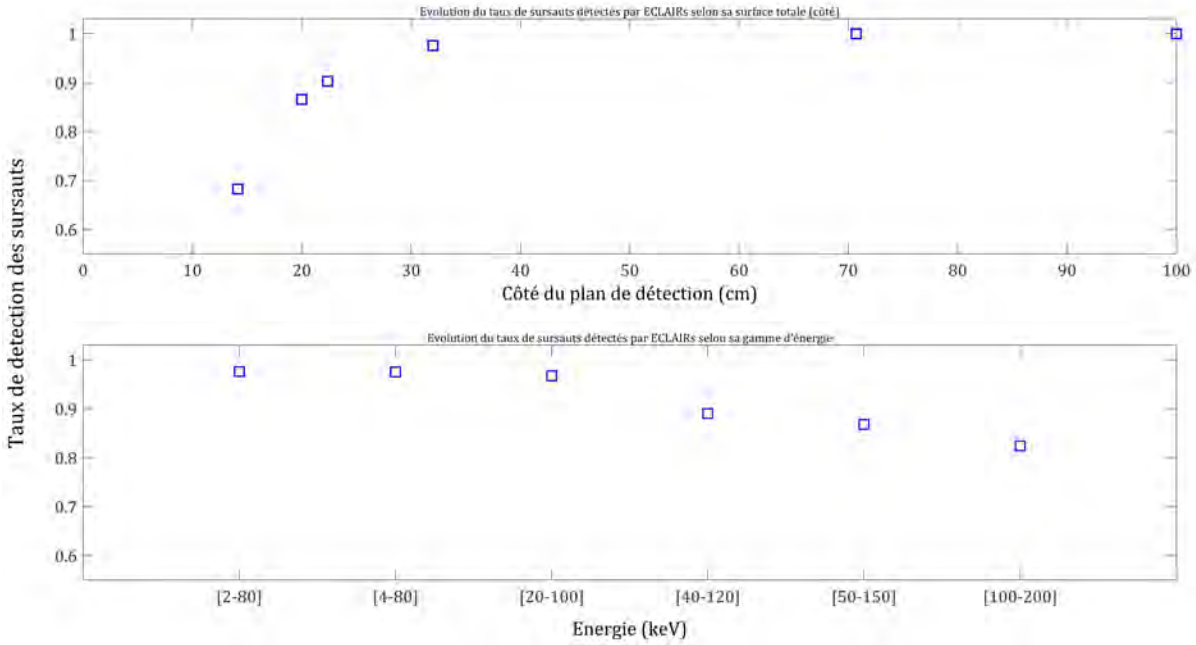


FIGURE 6.4 – Graphe du haut : Évolution du taux de détection par l'instrument ECLAIRs des sursauts de BAT en fonction de la longueur du côté du plan de détection supposé carré (dans la gamme d'énergie [4 - 80] keV / Graphe du bas : Évolution du taux de détection par l'instrument ECLAIRs des sursauts de BAT en fonction de la gamme d'énergie (pour une surface efficace d'environ 410 cm^2).

Réflexion sur un autre type de détecteur de sources transitoires

Beaucoup de questions nous traversent l'esprit durant une thèse, certaines pertinentes, d'autres moins ! Quoiqu'il en soit, j'en ai regroupé quelques unes dans ce petit paragraphe, si nous étions amenés à développer un autre type de détecteur pour les sources gamma transitoires.

La première question que je me suis posée est celle de la nécessité d'utiliser un masque codé. En effet, plus nous chercherons à obtenir de la surface efficace, et plus le masque sera grand. Le problème réside alors dans sa masse, mais aussi dans le maintien de sa structure, pour garder une planéité suffisante sans dégrader la performance de localisation. Pour autant,

pouvons-nous envisager de réaliser un plan de détection pixelisé sans masque, tout en gardant une aussi bonne précision de localisation de l'instrument ECLAIRs ?

Existe-t-il une forme du plan pour qu'il se suffise à lui-même ?

Quelle stratégie à adopter dans un contexte spatial très concurrentiel, où les budgets (coût ; masse) n'ont jamais été aussi regardés ? D'ailleurs, des collaborations scientifiques travaillent sur un concept de plusieurs centaines de micro-satellites en orbite autour de la Terre [Fuschino et al., 2018] pendant que d'autres préfèrent un satellite unique doté d'un immense instrument.

Quelle fraction des ressources (masse, électronique, etc...) doit être consacrée à la détection par rapport à la localisation ? A titre d'exemple, nous constatons avec ECLAIRs que le blindage coûte cher en masse, tandis que le grand nombre de détecteurs (pixels) coûte cher termes de puissance et de complexité (voire en masse).

Plutôt qu'un seul plan de détection, il pourrait y avoir, par exemple, trois plans de détection de même surface active, avec par exemple 2000 cm^2 chacun. L'imageur pourrait prendre cinq positions sur une même orbite, échelonnées sur les 180° de plan perpendiculaire à la Terre (de 30° à 150°). Les deux plans de côté seraient à 210° du plan central. Les surfaces seraient faites de détecteurs SiPM couverts de scintillateurs de type LaBr3 ou autre. Un blindage complexe servirait à la fois de blindage aux photons X, de blindage électronique et de boîtier mécanique sur lequel tiendrait le bras de rotation du détecteur général. (figure 6.5) Ainsi, nous devons étudier si trois intensités provenant d'une même source permettraient de pré-localiser la direction de celle-ci. Quelle précision de localisation obtiendrions-nous avec le mouvement de l'imageur : sans masque puis avec masque codé ?

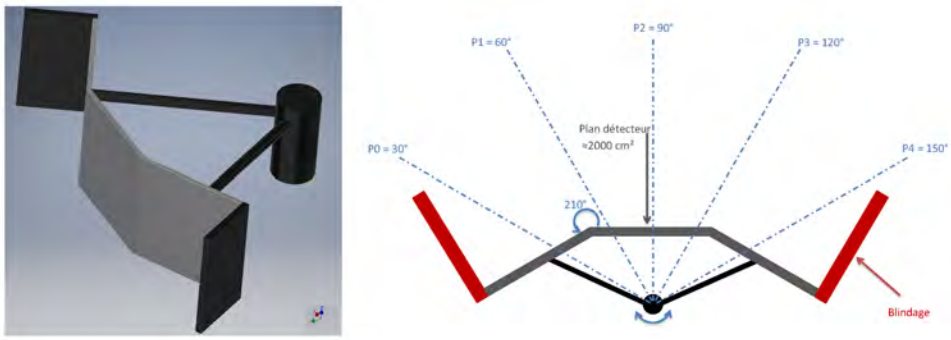


FIGURE 6.5 – Exemple de concept d'imageur.

Finalement, le point essentiel dans la phase d'un design préliminaire d'une nouvelle mission, est d'élargir la réflexion du plan de détection à celle de l'ensemble de l'instrument, de la technologie de localisation, de l'orbite et de la stratégie de pointage, etc. Ce travail se fera donc au niveau global, et se basera sur des simulations détaillées qui permettront de comparer objectivement les performances de plusieurs concepts, en fonction des objectifs scientifiques de la mission spatiale. Pour autant, je reste convaincue que tout doit commencer par le choix du détecteur, d'où l'effort que j'ai mené pour résumer mon retour d'expérience de plusieurs années, acquis avec ECLAIRs.

6.3 Epilogue

Conclusion sur les performances des modules unitaires

L'analyse des mesures spectrales des XRDPIX de la première série, qui compte près de 45 modules, a montré des performances excellentes, en matière de résolution, de comptage, de gain et de seuil bas en énergie. En effet, j'ai débuté l'analyse par une étude globale aux configurations de base (−400 V ; 4,4 µs) et (−300 V ; 2,6 µs), ce qui m'a permis d'observer des moyennes de FWHM répondant aux exigences du projet, et des valeurs de seuils bas en deçà des spécifications pour 97 % des voies mesurées.

Parmi les modules étudiés de la série 1, il apparaît 13 modules ayant une ou deux voies singulières, autrement nommées « voies mauvaises », qui montrent des FWHM et des seuils bas en énergie dégradés.

La table 6.2 synthétise quelques uns des résultats de l'analyse globale effectuée sur les modules XRDPIX, dont la plupart forment la caméra de vol. Dans le cas de la série 2, nous voyons par exemple des médianes de FWHM aux pics de 14 keV et 60 keV, respectivement de 0,78 keV et 0,97 keV à tension et peaking time plus élevés. Dans la configuration (−300 V ; 2,6 µs), les médianes des quelques 5000 valeurs de FWHM sont de 0,87 keV au pic de 14 keV et de 1,10 keV à 60 keV.

En ce qui concerne le seuil bas en énergie calculé à partir des 163 modules de la série 2, le test sans source (spectre de bruit électronique seul) montre que 93,7 % des 5216 voies détecteurs sont inférieures à 4 keV dans le cas de la configuration (−400 V ; 4,4 µs) ; toutefois, ce pourcentage baisse à 86,6 % pour le test avec source radioactive. La configuration (−300 V ; 2,6 µs) permet à 98,2 % des voies XRDPIX d'obtenir un seuil bas meilleur que 4 keV dans le cas du test sans source, et à 95,3 % pour le test avec source (Fig. 5.30). Cette différence de résultats selon les conditions de tests (avec ou sans source X/gamma) peut s'expliquer de deux façons : sans source, le pic de bruit est net et plus étroit, le calcul du seuil bas est plus aisé et donne des valeurs moins dispersées. Avec une source radioactive, dont le taux de photons est élevé par rapport aux exigences de la mission, le pic de bruit est plus large et son ajustement est plus difficile, ce qui peut induire un sigma plus grand. De plus, lorsque il y a beaucoup de photons en entrée, cela peut générer un bruit supplémentaire à très basse énergie, qui va conduire à l'élargissement du pic de bruit. Pour autant, ces différences entre le test 2 et le test 3, vont permettre de réaliser un encadrement des valeurs de seuil bas minimales et maximales.

De façon globale, en complétant les données de la série 1 avec les statistiques de la série 2, nous obtenons des médianes de seuil bas et de FWHM plus basses à (−400V ; 4,4 µs), de respectivement 2,13 keV et 0,98 keV, mais dont les mesures présentent une dispersion plus forte : en effet, l'écart-type et le nombre de voies soustraites de l'analyse sont plus élevés (Table 6.2).

De plus, dans le cas de l'étude unitaire (section 5), quand j'ai étudié un seul XRDPIX (module que j'ai choisi particulièrement mauvais dans cet exemple), et comparé ses performances avec celles de la Céramique Détecteurs et de la Céramique ASIC d'origines, j'ai observé que certaines voies (près de la moitié) présentaient des forts courants de fuite mesurés initialement sur les Céramiques Détecteurs. Cela a permis de confirmer que lorsqu'une voie XRDPIX donne une résolution élevée et un seuil bas en énergie au-dessus de la spécification de 4 keV, cela provient, dans la plupart des cas, du bruit intrinsèque du détecteur CdTe plutôt que du bruit ENC de la voie ASIC de la Céramique ASIC, et qu'un pixel dit « bruyant » est

ANALYSE GLOBALE - S2 - 163 XRDPIX (5216 voies détecteurs)			
(-400 V; 4,4 µs)			
Traitement : 2019	**FWHM[13.9] (keV)**	**FWHM[59.5] (keV)**	**Seuil bas (keV) [^{241}Am]**
Median	**0,78**	**0,97**	**2,14**
Mean	0,81	1,01	3,56
Sigma	0,1419	0,16066	8,23
Nb voies non traitées	61	61	179 / 5216
(-300 V; 2,6 µs)			
Median	**0,87**	**1,10**	**2,80**
Mean	0,87	1,10	2,93
Sigma	0,076157	0,081902	2,08
Nb voies non traitées	3	3	53 / 5216
ANALYSE GLOBALE - S1 - 45 XRDPIX (1440 voies)			
(-400 V; 4,4 µs)			
	FWHM[13.9] (keV)	**FWHM[59.5] (keV)**	**Seuil bas (keV) [^{241}Am]**
Median	**0,79**	**0,97**	**2,10**
Mean	0,80	1,00	4,56
Sigma	0,11	0,14	14,21
Nb voies non traitées	11	11	19 / 1440
(-300 V; 2,6 µs)			
Median	**0,87**	**1,10**	**2,83**
Mean	0,88	1,11	2,96
Sigma	0,07	0,10	1,30
Nb voies non traitées	3	3	9 / 1440

208 MODULES XRDPIX (6656 VOIES ANALYSEES)		
	CONF01 (-400V; 4,4µs)	**CONF10 (-300V; 2,6µs)**
Nombre Voies FWHM à 60 keV > 1,6 keV	77	16
Nombre Voies Seuil bas à 6 σ > 4 keV	630	256
Nombre Voies non traitées	198	62
FWHM à 14 keV Médiane (keV)	0,79	0,87
FWHM à 60 keV Médiane (keV)	0,98	1,10
Seuil bas à 6 σ Médiane (keV)	2,13	2,82

TABLE 6.2 – Tables regroupant des données de performance des modules XRDPIX : Tableau du haut : Statistiques selon la série analysée 1 ou 2 / Tableau du bas : Statistiques sur 208 modules XRDPIX des séries 1 et 2, testés aux configurations (−400 V ; 4,4 µs) et (−300 V ; 2,6 µs).

essentiellement le fait d'une voie détecteurs d'une Céramique Détecteurs.

Par ailleurs, la dispersion des performances intra-XRDPIX (entre les 32 voies d'un même module) est amenée principalement par le design des céramiques nues (CE Détecteurs et HTCC ASIC), soit les 32 capacités équivalentes du routage.

De plus, il apparaît que le comportement des XRDPIX est très similaire à −300 V et −400 V, en termes de qualité spectrale à basse énergie et de seuil bas. Seules les raies à plus hautes énergies, en l'occurrence le pic à 60 keV dans notre étude, montrent une résolution légèrement dégradée, expliquée par une collecte de charges moins efficace des photons plus énergétiques à −300 V. Il faut donc anticiper une accentuation de cet effet quand seront effectuées des acquisitions spectrales autour de 100 keV (par exemple, durant la phase de calibration avec la source de ^{57}Co et son pic à 122 keV). Le courant de fuite n'étant pas prédominant à des tensions de polarisation plus basses (à −200 V par exemple), c'est le bruit de l'ASIC, dépendant du peaking time, qui oriente alors la valeur de la résolution en énergie.

Néanmoins, la configuration (−400 V ; 4,4 µs) est pertinente, car elle m'a permis de mieux identifier les voies mauvaises : c'est d'ailleurs en combinant l'analyse des performances dans cette configuration avec l'analyse des résultats de la configuration nominale (−300 V ; 2,6 µs), que j'ai effectué un classement des modules XRDPIX à monter sur la caméra de vol de l'instrument ECLAIRs.

Dans le cadre de la recette des modules individuels, les spectres, permettant les mesures de bruit, de seuil bas de détection, des largeurs des raies et des comptages, ont été acquis grâce à une électronique de test spécifique, bas bruit, qui, contrairement à l'électronique ELS, ne peut gérer qu'un seul module à la fois. En outre, seuls des événements simples (« single ») peuvent être mesurés, ce qui ne permet pas d'étudier de façon approfondie la multiplicité des événements détectés, à savoir le fait qu'ils ont touché une ou plusieurs voies du module dans une même fenêtre temporelle. Ainsi, nous ne pouvons pas connaître le rapport de coups single/multiple, la version de l'électronique numérique ne le détaillant pas.

Pourtant, ces études unitaires m'ont permis de mettre en évidence certaines anomalies des voies P8 et P16. En effet, le comportement des comptages est cohérent dans notre cas « single », excepté pour ces deux voies, qui peuvent perdre en efficacité de comptage d'événements simples, au vu de la diaphonie observée et des probables événements multiples dominants. Seulement, le temps m'a manqué dans ce manuscrit pour prouver cette hypothèse de manière arithmétique.

De plus, la singularité des voies P8 et P16 est notable car, même avec un faible courant de fuite et un faible bruit ENC, j'observe des valeurs FWHM plus élevées que la moyenne matricielle et c'est surtout dans le cas d'un seuil bas en énergie calculé à partir de spectres en photons (test 2), que ce constat est fait. Toutefois, en ajustant leur seuil bas numérique à une valeur un peu plus élevée (SBN16), nous pouvons amoindrir voire faire disparaître leur comportement plus bruyant, avec le compromis de ne détecter des photons qu'à partir de 4,5 keV. Je propose donc de paramétrer les seuils numériques à cette valeur (ou même 17 ou 18) plutôt qu'à 12, comme initialement prévu.

En résumé, l'analyse des modules XRDPIX m'a permis de vérifier qu'ils répondaient pleinement aux performances exigées par la mission SVOM, et ce en termes de résolution spectrale, de seuil bas en énergie et de comptage. Sur la population de modules XRDPIX des séries 1 et 2 (6656 pixels), 1,05 % des voies garantissent une FWHM inférieure à 1,6 keV pour le pic à 60 keV dans la configuration (−400 V ; 4,4 µs), et 0,24 % à (−300 V ; 2,6 µs). Dans cette même configuration (HT ; tp), la médiane des FWHM du pic à 60 keV est de 1,10 keV, et de 0,87 keV pour le pic à 14 keV, sur une statistique de 6656 mesures.

De plus, j'ai pu déterminer que 96,15 % des voies détecteurs ont un seuil bas en énergie inférieur à 4 keV, avec une médiane de 2,82 keV sur 208 modules XRDPIX étudiés (mesures spectrales de ^{241}Am). A valeurs de peaking time et haute tension plus élevées, 90,84 % des voies détecteurs ont un seuil bas en énergie inférieur à 4 keV, avec une médiane de 2,12 keV, toujours sur l'ensemble des modules de la série 1 et de la série 2.

S'agissant de la phase de sélection, nous verrons que la configuration (−400 V ; 4,4 µs) est donc pertinente pour trouver rapidement les modules XRDPIX les moins performants, car elle permet de discriminer aisément les voies défaillantes.

Pour conclure, ces belles performances unitaires des modules XRDPIX qui vont façonner le plan de détection de l'instrument ECLAIRs sont prometteuses pour la moisson future de nouvelles données concernant les sursauts gamma.

Conclusion sur la sélection des XRDPIX de vol

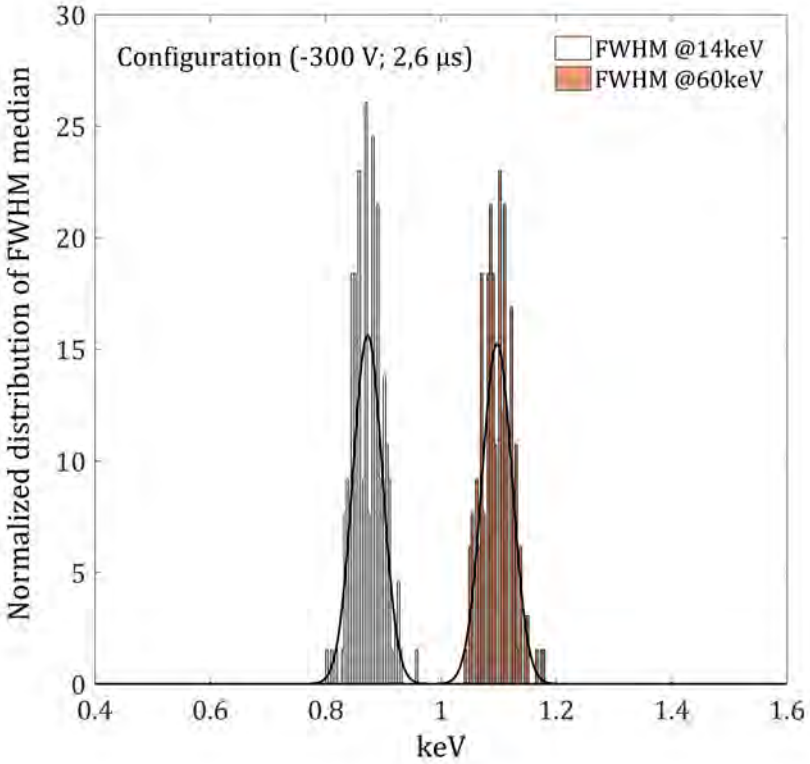
Toutes ces études m'ont permis de préparer la sélection des 200 modules XRDPIX qui doivent être montés sur la caméra de vol (DPIX FM) de l'instrument ECLAIRs.

A partir des statistiques de la série complète (« série 1 », « série 2 » et « série 2 complémentaire » soit près de 300 modules de niveau modèle de vol ou « Flight models » testés et analysés), j'ai créé une méthode de sélection des modules, en développant une matrice générale donnant les XRDPIX choisis ('OK'), ceux écartés de la caméra de vol ('NOK') et ceux avec une note intermédiaire, qui pourraient être montés sur le modèle de vol (noté 'POS' pour possiblement sélectionnable), tout en mentionnant le pourquoi.

Cette matrice (Fig. 6.3) intègre les paramètres clés qui permettent d'extraire les plus mauvais modules et d'identifier les voies mauvaises, en y incluant les problèmes technologiques et les performances scientifiques de chaque XRDPIX. Dix critères, explicités ci-après, conduisent chacun à une note pondérée selon la pertinence de l'observable sur la performance globale, qui est additionnée aux neuf autres pour obtenir une note finale :

- Critère technologique : selon le rapport du point clé (inspection visuelle) que j'ai effectué chez SAFRAN (note = 1)
- Performance en FWHM à 14 keV par module : moyenne des 32 voies du XRDPIX comparée à la moyenne ±1 écart-type de la série (note pondérée de 0,2)
- Performance en FWHM à 60 keV par module : moyenne des 32 voies du XRDPIX comparée à la moyenne ±1 écart-type de la série (note = 0,2)
- Performance en seuil bas par module : médiane < 2,8 keV (note = 0,5)
- Performance en Comptage par module : moyenne des 32 voies du XRDPIX comparée à la moyenne ±1 écart-type de la série (note = 0,3 si critère valide)
- Performance en Gain par module : moyenne des 32 voies du XRDPIX comparée à la moyenne ±1 écart-type de la série (note = 0,3)
- Nombre de voies détecteurs > 4 keV en seuil bas par module, calculé à partir d'un spectre avec source de ^{241}Am (note = 1)
- Nombre de voies détecteurs > 4 keV en seuil bas par module, calculé à partir d'un spectre de bruit électronique (note = 0,3)
- Nombre de voies détecteurs > 1,6 keV en FWHM à 60 keV (note = 0,7)
- Nombre de voies détecteurs non traitées en seuil bas (note = 0,5)

Nous pouvons constater que certains paramètres ont été plus déterminants sur la note finale, comme les aspects technologiques, la FWHM à 60 keV ou le seuil bas de détection. Par



TOTAL XRDPIX S1	FM CONF01	FM CONF10
45	36	38
	6	5
	3	2
TOTAL XRDPIX S2	**FM CONF01**	**FM CONF10**
163	119	125
	27	27
	17	11

Modules pour caméra de vol
Modules possibles FM ou SPARE
Modules à ne pas monter sur le FM

FIGURE 6.6 – Graphe du haut : Histogramme des médianes (163) des 32 FHWM de chaque XRDPIX (163 modules de la série 2 soit 5216 voies) / Bas : Tableau récapitulatif sur le nombre de modules XRDPIX pouvant être montés sur la caméra de vol (en vert) parmi les séries 1 et 2 (Seule la série 2 complémentaire, d'une quarantaine de modules, ne figure pas dans le tableau).

exemple, un module XRDPIX aura 1 point (correspondant à la note maximale pour ce critère) s'il n'a pas plus d'une voie montrant un seuil bas supérieur à 4 keV. Du reste, le module aura 0,2 points si la moyenne FWHM à 60 keV de ses 32 voies appartient à la moyenne générale de la série ±1 écart-type, et aura 0 si la condition n'est pas respectée (annexe A.3.1).

Chaque XRDPIX obtient une note finale (sur 5) par configuration (HT ; tp), en privilégiant la configuration mission (−300 V ; 2,6 µs). Une fois le classement des modules finalisé, je le soumets à validation à trois autres scientifiques du projet, qui vont alors combiner les résultats pour l'obtention d'une liste finale (donnée en annexe A.5.1), à partir de laquelle je définis le positionnement sur la caméra, avec un placement par secteur ELS (exemple du secteur E01 en annexe A.6.1).

Le tableau 6.5 montre un exemple de la classification que j'ai obtenue, avec quelques lignes du classement des modules de la série 2 en lice pour la sélection finale, et un extrait de la matrice de notes ci-après, mentionnant les observables servant de critères de sélection (table 6.3) et les valeurs de pondérations (table 6.4) que j'ai choisies d'appliquer.

Pour conclure, j'ai analysé plus de 280 XRDPIX, correspondant au traitement de près de 9000 voies détecteurs, pour terminer mes études sur une proposition de classement de tous ces modules, basé sur un barème à la fois technologique et de performance, de façon à déterminer s'ils peuvent constituer le plan de détection de la caméra de vol de l'instrument ECLAIRs pour la mission SVOM. A titre d'exemple, en configuration (−300 V ; 2,6 µs) ou « CONF10 », 163 modules sur 208 (série 1 + série 2) ont montré la meilleure performance pour constituer la caméra de vol ; en configuration (−400 V ; 4,4 µs) ou « CONF01 », 155 modules sur 208 sont acceptables. A cela s'ajoutent les modules de la série 2 complémentaire (une vingtaine de modules), et les possibles candidats 'POS', au nombre de 32 ou 33 selon la configuration (tableau 6.6).

XRDPIX	CD	I_{leak} (pA)	$I_{leak[mesure]}$ @400V	CA	ENC (e-)	$ENC_{[mesure]}$ @4,4 µs	FWHM	$FWHM14_{[mes]}$	$FWHM18_{[mes]}$	$FWHM60_{[mes]}$	Nb Voies > 1,6 keV @2,6 µs	SB en énergie	$SB_{[mes]}$	Nb Voies > 4 keV	Nb Voies t3 > 4 keV	Comptage intégral moyen$_{[6-65\ keV]}$ (C/det)	Comptage intégral moyen$_{[6-65\ keV]}$ (C/det) mes	Nb Voies non traitées SB	Gain / Offset	$Gain_{[mes]}$	$Offset_{[mes]}$	TECHNO OK / NOK	TECHNO 1 / 0
XR101	D101	Moy	25	N111	Moy	65	Moy	0,939	1,218	1,147	0	Moy	3,033	1	0	Moy	94510	0	Moy	0,003538563	-15,88728438	OK	1
XR102	D102	Moy	16	N145	Moy	60	Moy	1,098	1,384	1,334	0	Moy	3,223	2	4	Moy	44869	0	Moy	0,003543	-15,69084063	OK	1
XR103	D103	Moy	837	N136	Moy	59	Moy	0,899	1,167	1,160	0	Moy	3,237	3	1	Moy	44814	0	Moy	0,003519	-16,26992813	OK	1
XR105	D105	Moy	58	N103	Moy	60	Moy	0,921	1,200	1,160	0	Moy	3,136	1	0	Moy	95722	0	Moy	0,003527594	-16,80656563	OK	1
XR106	D106	Moy	19	N117	Moy	60	Moy	0,867	1,126	1,113	0	Moy	2,860	1	0	Moy	44791	1	Moy	0,003487688	-18,06309063	OK	1
XR107	D107	Moy	34	N154	Moy	61	Moy	0,916	1,213	1,187	0	Moy	3,403	3	1	Moy	95302	0	Moy	0,003503844	-18,2129375	OK	1
XR108	D108	Moy	58	N101	Moy	59	Moy	0,895	1,217	1,210	0	Moy	3,709	3	0	Moy	46111	0	Moy	0,003543719	-15,78301875	OK	1
XR110	D110	Moy	34	N102	Moy	60	Moy	0,909	1,194	1,125	0	Moy	4,000	4	1	Moy	88363	0	Moy	0,003553813	-17,5500375	OK	1
XR114	D114	Moy	15	N132	Moy	60	Moy	0,856	1,093	1,134	1	Moy	2,983	3	1	Moy	45013	0	Moy	0,003491469	-18,077925	OK	1
XR116	D116	Moy	22	N138	Moy	61	Moy	0,884	1,157	1,104	0	Moy	3,024	1	0	Moy	95205	0	Moy	0,003470219	-15,70163125	OK	1
XR117	D117	Moy	18	N107	Moy	60	Moy	0,846	1,101	1,074	0	Moy	2,828	2	0	Moy	45240	0	Moy	0,00351125	-17,00512813	OK	1
XR118	D118	Moy	17	N133	Moy	59	Moy	0,881	1,147	1,096	0	Moy	2,958	1	0	Moy	95901	0	Moy	0,003501094	-15,741625	OK	1
XR121	D121	Moy	13	N147	Moy	60	Moy	0,854	1,090	1,080	0	Moy	2,773	1	0	Moy	44811	0	Moy	0,003487531	-16,97015313	OK	1
XR123	D123	Moy	19	N135	Moy	61	Moy	0,894	1,157	1,090	0	Moy	2,886	0	0	Moy	95730	0	Moy	0,003522563	-18,36062813	OK	1
XR124	D124	Moy	8	N150	Moy	61	Moy	0,825	1,069	1,050	0	Moy	3,004	1	0	Moy	43027	0	Moy	0,003536656	-17,36492813	OK	1
XR125	D125	Moy	31	N105	Moy	60	Moy	0,900	1,169	1,119	0	Moy	3,324	1	0	Moy	95059	1	Moy	0,003546938	-16,1087375	OK	1
XR127	D127	Moy	16	N137	Moy	60	Moy	0,840	1,068	1,054	0	Moy	3,439	2	0	Moy	44912	0	Moy	0,003525969	-16,2423125	OK	1
XR128	D128	Moy	16	N151	Moy	60	Moy	0,877	1,126	1,094	0	Moy	2,990	2	0	Moy	95848	0	Moy	0,003476906	-16,84333125	OK	1
XR129	D129	Moy	24	N139	Moy	60	Moy	0,884	1,128	1,123	1	Moy	2,733	0	2	Moy	47839	2	Moy	0,003510063	-15,64434063	OK	1
XR131	D131	Moy	9	N144	Moy	62	Moy	0,867	1,126	1,077	0	Moy	2,854	1	0	Moy	95763	0	Moy	0,003523344	-15,3829875	OK	1
XR133	D133	Moy	15	N140	Moy	62	Moy	0,865	1,078	1,082	1	Moy	2,873	2	0	Moy	44780	0	Moy	0,003479344	-14,6871	OK	1
XR134	D134	Moy	9	N153	Moy	60	Moy	0,878	1,151	1,133	1	Moy	2,877	1	0	Moy	95071	0	Moy	0,003511406	-16,6527	OK	1
XR135	D135	Moy	20	N120	Moy	62	Moy	0,849	1,090	1,075	0	Moy	2,702	1	0	Moy	45075	0	Moy	0,003526688	-18,5411375	OK	1
XR136	D136	Moy	11	N155	Moy	59	Moy	0,871	1,131	1,095	0	Moy	2,859	2	0	Moy	95868	0	Moy	0,003501625	-18,45068438	OK	1
XR138	D138	Moy	13	N141	Moy	60	Moy	0,847	1,083	1,060	0	Moy	2,960	1	0	Moy	45457	0	Moy	0,00348975	-16,15854688	OK	1
XR141	D141	Moy	13	N163	Moy	62	Moy	0,832	1,069	1,063	0	Moy	2,686	1	0	Moy	45670	1	Moy	0,003500156	-17,59776563	OK	1
XR142	D142	Moy	16	N106	Moy	58	Moy	0,887	1,159	1,104	0	Moy	2,903	1	0	Moy	95908	0	Moy	0,003562281	-16,95991563	OK	1
XR143	D143	Moy	14	N127	Moy	63	Moy	0,852	1,087	1,074	0	Moy	2,703	1	0	Moy	45354	0	Moy	0,003541063	-17,80209063	OK	1
XR145	D145	Moy	12	N164	Moy	60	Moy	0,877	1,138	1,085	0	Moy	2,885	1	0	Moy	95550	1	Moy	0,003520531	-16,47182188	OK	1
XR146	D146	Moy	69	N142	Moy	61	Moy	0,866	1,092	1,099	1	Moy	2,786	1	1	Moy	45181	0	Moy	0,003560406	-17,00383125	OK	1

TABLE 6.3 – Observables utilisées comme critères de sélection des modèles de vol pour chaque module XRDPIX (dans cet exemple, 46 modules de la série 1) avant l'application des notes de pondération, pour l'obtention d'une note finale.

PERF FWHM14 € 95 %	PERF FWHM60 € 95 %	PERF FWHM60 NB VOIES < 1,6 keV	PERF SB Mediane < 2,8 keV	PERF COMPTAGE € 95 %	PERF GAIN € 95 %	PERF SB NB VOIES < 4 keV	NB VOIES NON TRAITEES SB	PERF SB T3 NB VOIES < 4 keV	NOTE / 5
0,2	0,2	0,7	0,5	0,3	0,3	1	0,5	0,3	4,7
0	0	0,7	0,5	0,3	0,3	0,5	0,5	0	3,8
0,2	0,2	0,7	0,5	0,3	0,3	0,5	0,5	0	4,2
0,2	0,2	0,7	0,5	0,3	0,3	1	0,5	0,3	4,7
0,2	0,2	0,7	0,5	0,3	0,3	1	0,5	0,3	4,7
0,2	0,2	0,7	0,5	0,3	0,3	0,5	0,5	0	4,2
0,2	0	0,7	0,5	0,3	0,3	0,5	0,5	0,3	4
0,2	0,2	0,7	0,5	0	0,3	0	0,5	0	3,4
0,2	0,2	0	0,5	0,3	0,3	0,5	0,5	0	3,5
0,2	0,2	0,7	0,5	0,3	0,3	1	0,5	0,3	4,7
0,2	0,2	0,7	0	0,3	0,3	0,5	0,5	0,3	3,7
0,2	0,2	0,7	0,5	0,3	0,3	1	0,5	0,3	4,7
0,2	0,2	0,7	0	0,3	0,3	1	0,5	0,3	4,2
0,2	0,2	0,7	0,5	0,3	0,3	1	0,5	0,3	4,7
0,2	0,2	0,7	0,5	0	0,3	1	0,5	0,3	4,4
0,2	0,2	0,7	0,5	0,3	0,3	1	0,5	0,3	4,7
0,2	0,2	0,7	0	0,3	0,3	0,5	0,5	0,3	3,7
0,2	0,2	0,7	0,5	0,3	0,3	0,5	0,5	0,3	4,2
0,2	0,2	0	0	0	0,3	1	0	0	2,7
0,2	0,2	0,7	0	0,3	0,3	1	0,5	0,3	4,2
0,2	0,2	0	0	0,3	0,3	0,5	0,5	0,3	3
0,2	0,2	0	0	0,3	0,3	1	0,5	0,3	3,5
0,2	0,2	0,7	0	0,3	0,3	1	0,5	0,3	4,2
0,2	0,2	0,7	0	0,3	0,3	0,5	0,5	0,3	3,7
0,2	0,2	0,7	0	0,3	0,3	1	0,5	0,3	4,2
0,2	0,2	0,7	0	0,3	0,3	1	0,5	0,3	4,2
0,2	0,2	0,7	0,5	0,3	0,3	1	0,5	0,3	4,7
0,2	0,2	0,7	0	0,3	0,3	1	0,5	0,3	4,2
0,2	0,2	0,7	0,5	0,3	0,3	1	0,5	0,3	4,7
0,2	0,2	0	0	0,3	0,3	1	0,5	0	3,5

TABLE 6.4 – Valeurs de pondération utilisées pour donner un poids différent aux critères de sélection des XRDPIX FM vus dans le tableau 6.3.

XRDPIX	NOTE CONF01 / 5	FM CONF01	NOTE CONF10 / 5	FM CONF10	MOYENNE CONF /5	FM	XRDPIX
XR166	4,7	OUI	4,7	OUI	4,70	OUI	XR166
XR167	5	OUI	4,5	OUI	4,75	OUI	XR167
XR168	3,2	OUI	4,2	OUI	3,70	OUI	XR168
XR169	4,2	OUI	5	OUI	4,60	OUI	XR169
XR170	3,9	OUI	4,5	OUI	4,20	OUI	XR170
XR171	4,5	OUI	4,5	OUI	4,50	OUI	XR171
XR172	3,8	OUI	3,5	NON	3,65	OUI	XR172
XR173	4	OUI	5	OUI	4,50	OUI	XR173
XR175	3	OUI	4,2	OUI	3,60	OUI	XR175
XR176	3,2	OUI	3,5	NON	3,35	POS	XR176
XR179	2,2	NON	4,7	OUI	3,45	POS	XR179
XR180	3,2	OUI	4,5	OUI	3,85	OUI	XR180
XR181	3,4	OUI	4,7	OUI	4,05	OUI	XR181
XR184	2,2	NON	3,7	POS	2,95	NON	XR184
XR185	2,3	NON	3,9	POS	3,10	NON	XR185
XR186	3,2	OUI	4,5	OUI	3,85	OUI	XR186
XR188	3,2	OUI	4,7	OUI	3,95	OUI	XR188
XR189	3	OUI	4,5	OUI	3,75	OUI	XR189
XR190	2,2	NON	4,2	OUI	3,20	POS	XR190
XR191	3,2	OUI	4,2	OUI	3,70	OUI	XR191
XR193	3,7	OUI	4,5	OUI	4,10	OUI	XR193
XR195	2,2	NON	4,5	OUI	3,35	POS	XR195
XR196	2,5	POS	4,5	OUI	3,50	OUI	XR196
XR203	2,5	POS	5	OUI	3,75	OUI	XR203
XR204	3,7	OUI	3,5	NON	3,60	OUI	XR204
XR206	2	NON	4,5	OUI	3,25	POS	XR206
XR209	2,5	POS	4	OUI	3,25	POS	XR209
XR211	3,4	OUI	3,9	POS	3,65	OUI	XR211
XR212	2,5	POS	4,5	OUI	3,50	OUI	XR212
XR215	5	OUI	4,5	OUI	4,75	OUI	XR215
XR217	2,5	POS	3,7	POS	3,10	NON	XR217
XR218	3,2	OUI	4,5	OUI	3,85	OUI	XR218
XR219	2,5	POS	4,2	OUI	3,35	POS	XR219
XR220	2,5	POS	5	OUI	3,75	OUI	XR220
XR222	1,8	NON	3,9	POS	2,85	NON	XR222
XR223	2,5	POS	4	OUI	3,25	POS	XR223
XR224	3,5	OUI	3,5	NON	3,50	OUI	XR224
XR225	3,5	OUI	4,5	OUI	4,00	OUI	XR225
XR227	1,7	NON	4,5	OUI	3,10	NON	XR227
XR229	4,2	OUI	4,5	OUI	4,35	OUI	XR229
XR231	3,2	OUI	4,2	OUI	3,70	OUI	XR231
XR233	4,2	OUI	4,7	OUI	4,45	OUI	XR233
XR234	2,2	NON	4,2	OUI	3,20	POS	XR234
XR235	2,5	POS	4,5	OUI	3,50	OUI	XR235
XR236	3	OUI	4,5	OUI	3,75	OUI	XR236
XR240	3,2	OUI	4,5	OUI	3,85	OUI	XR240
XR241	3,7	OUI	4,7	OUI	4,20	OUI	XR241
XR245	2,5	POS	4	OUI	3,25	POS	XR245
XR246	1,7	NON	2,5	NON	2,10	NON	XR246
XR247	3,7	OUI	5	OUI	4,35	OUI	XR247
XR248	2	NON	5	OUI	3,50	OUI	XR248
XR249	3,7	OUI	4,5	OUI	4,10	OUI	XR249
XR250	3,7	OUI	4,5	OUI	4,10	OUI	XR250
XR252	3,7	OUI	5	OUI	4,35	OUI	XR252
XR254	3,5	OUI	4,7	OUI	4,10	OUI	XR254
XR256	3	OUI	4,5	OUI	3,75	OUI	XR256
XR257	3	OUI	4,2	OUI	3,60	OUI	XR257
XR258	2,9	POS	4,5	OUI	3,70	OUI	XR258
XR259	4	OUI	4,5	OUI	4,25	OUI	XR259
XR262	3	OUI	4,2	OUI	3,60	OUI	XR262

TABLE 6.5 – Classement XRDPIX à partir des critères de performance de la table 6.3 et des notes pondérées du tableau 6.4.

Perspectives de l'instrumentation gamma

Dans les années à venir, le développement de plusieurs instruments consacrés à l'astronomie des phénomènes transitoires (par exemple, LSST ou SKA) et à l'astronomie multi-messagers (LIGO et VIRGO, ICECUBE, KM3NeT), nécessitera une observation continue du ciel des rayons X durs, avec une sensibilité plus accrue. La volonté d'explorer les populations mal connues de sursauts peu lumineux, tels que les sursauts GRB 170817 situé à 47 Mpc ou GRB 980425 situé à 37 Mpc, implique l'utilisation de grands plans de détection, comme expliqué précédemment.

Jusqu'à présent, seul *SWIFT*/BAT avait une aussi grande surface de détection, avec 32768 détecteurs CZT, ce qui a permis des découvertes importantes, comme la détection de sursauts avec un décalage vers le rouge allant jusqu'à 9 et la détection de quelques sursauts sous-lumineux, comme le GRB 060218 situé à 147 Mpc ([Campana et al., 2006] ; [Pian et al., 2006] ; [Soderberg et al., 2006] ; [Liang et al., 2007]).

A partir de notre discussion sur les imageurs à masques codés, actuels et futurs, et de notre expérience avec ECLAIRs (chapitres 3 et 4), nous résumons ci-dessous les conditions requises pour la construction de grands plans de détection pixélisés base de CdTe.

Les principaux avantages de ces détecteurs sont leur forte tenue en radiation, leur nombre atomique équivalent élevé, leur densité élevée, la possibilité de les fabriquer en grande quantité, leur robustesse et leur faible courant de fuite, même à température ambiante. Toutes ces qualités expliquent pourquoi les détecteurs CdTe (et aussi CZT) ont une excellente réputation et d'ailleurs, leur usage est devenu courant sur des missions spatiales, avec une surface de détection totale actuellement opérationnelle atteignant près de 1 m^2.

Au cours des trente dernières années, nous avons eu une continuité dans l'observation des sources transitoires de rayonnement gamma ; pour autant, le besoin scientifique pour l'exploration du ciel, et en particulier pour la détection des sursauts gamma est toujours très présent : il semble donc important d'étudier les voies futures qui répondront aux exigences accrues en matière de sensibilité, tout en intégrant le problème du bruit de fond qui se superpose aux signaux des sursauts, convergeant alors avec la problématique d'un grand champ de vue (Fig. 6.7).

Une figure de mérite (Fig. 6.8) qui montre le produit de la surface efficace par le champ de vue) permet de trouver les enjeux techniques et scientifiques des instruments destinés à détecter des sources transitoires. Les lignes représentent les performances d'un imageur grand champ pour la détection de sources transitoires : nous voyons que les instruments futurs ont un grand champ de vue, mais dotés d'une surface plus petite que celle de *SWIFT*, qui est un instrument très performant. L'objectif est donc d'aller dans la région située en haut à droite du graphe ! Ce qui représente un vrai challenge technologique pour les missions futures.

En conclusion, pour faire des progrès notables, nous avons besoin de grandes surfaces détectrices, combinées à de grands champs de vue et à des conditions d'observations optimales. De grands plans de détection permettront d'améliorer significativement la sensibilité des instruments, qui présenteront des surfaces de détection de l'ordre du mètre carré, soit deux fois la surface de BAT, ou même dix fois celle d'ECLAIRs !

En conséquence, les futurs concepteurs d'instruments spatiaux haute énergie pourront, en premier lieu, choisir le détecteur, de façon à développer une électronique sur mesure, très faible bruit (et faible consommation !), en examinant les avancées technologiques réalisées dans une grande gamme de détecteurs semi-conducteurs, et en particulier dans une même technologie comme le CdTe, qui se décline en de nombreuses solutions. Les détecteurs de type

Schottky notamment, qui montrent un très faible courant de fuite, peuvent ainsi fonctionner à température ambiante tout en offrant d'excellentes performances spectrales, dans leurs versions les plus récentes. D'autre part, la haute performance s'obtiendra en combinant des technologies avec des designs très faiblement capacitifs, la maîtrise du bruit, et de la chaîne de détection et de l'environnement du télescope spatial, étant primordiale.

Par ailleurs, les électrodes à motifs permettent de faire des détecteurs avec des pixels inférieurs au mm, pour construire des instruments compacts dotés d'une bonne résolution angulaire de quelques minutes d'arc, et avec un masque codé situé à quelques dizaines de centimètres au dessus des détecteurs.

Le besoin en grandes surfaces de détection avec une résolution spatiale inférieure au millimètre se traduit par des plans de détection de 10^5 pixels, nombre qui va amener des difficultés de conception si chaque pixel est lu individuellement.

La production de détecteurs à strip CdTe à double face résout ce problème car, dans ce cas, le nombre de voies de lecture augmente avec la racine carrée du nombre de pixels [Ishikawa et al., 2010].

S'agissant de l'épaisseur des détecteurs, elle doit être adaptée à la gamme d'énergie de l'instrument. Par exemple, en évitant l'utilisation de détecteurs trop épais, qui nécessitent une tension de polarisation élevée et qui peuvent montrer une faible efficacité de collecte des trous, nous réduisons la complexité du développement.

En résumé, les progrès de fabrication de détecteurs CdTe ouvrent la voie à des améliorations significatives par rapport aux instruments actuels (*INTEGRAL*/ISGRI, *SWIFT*/BAT, *ASTROSAT*/CZTI et futurs (*SVOM*/ECLAIRs).

Un autre point à bien étudier concerne la modularité des instruments impliquant 1 m^2 de détecteurs. Comme expliqué à la section 6.1, la modularité du plan de détection conduit tout naturellement à la modularité de l'instrument, avec par exemple plusieurs modules disposant de 1000 cm^2 de détecteurs. Cette stratégie facilite la réalisation de l'instrument, puisque les modules peuvent être construits et testés en parallèle : cela augmente la fiabilité globale, et évite de développer un instrument géant, avec tous les problèmes inhérents à la taille, soit de manipulation, d'intégration du système, de montage et d'équipements de test sur le satellite et plus particulièrement l'uniformité du plan de détection.

Choisir la modularité a également un impact sur la philosophie des modèles, notamment celle du modèle de rechange, réduisant considérablement son coût. D'ailleurs, après une série d'instruments intégrant faiblement la modularité (*INTEGRAL*/ISGRI, *SWIFT*/BAT, *ASTROSAT*/CZTI et *SVOM*/ECLAIRs, les missions *eXTP*/WFM et *THESEUS*/XGIS ont choisi de la globaliser complètement. La modularité est facile à mettre en œuvre lorsque l'objectif est d'augmenter le champ de vue, avec des modules pointés dans différentes directions. Cela devient plus complexe lorsque l'objectif est d'augmenter la sensibilité avec tous les modules orientés dans le même champ de vue. Dans ce cas, les modules doivent travailler en synergie afin de tirer pleinement parti du potentiel de la grande surface sensible. La détection des phénomènes transitoires doit être effectuée sur une image du ciel combinant les images du ciel des différents modules, nécessitant d'importantes ressources informatiques à bord. Néanmoins, il semble que l'avantage de la modularité dépasse la complexité de combiner les images du ciel à bord.

Enfin, lorsqu'il s'agit de grandes surfaces sensibles, il est essentiel de simplifier la conception instrumentale, de travailler à des températures proches de la température ambiante, ou à des températures négatives n'excédant pas les $-30°C/-40°C$ si la technologie le permet, d'adopter une approche industrielle pour la réalisation des centaines voire des milliers de mo-

dules de détection et de simplifier l'ensemble des tests des sous-systèmes, tout en maintenant une efficacité des essais à mener pour identifier le plus en amont possible dans la chaîne de développement les problèmes techniques et technologiques (avec une phase d'assemblage souvent plus critique que les composants unitaires), et en cherchant à favoriser l'homogénéité du système plutôt que la performance individuelle.

Tout ceci est rendu possible grâce à la résilience de l'instrument à masque codé dont les performances ne sont que très peu impactées lorsque quelques pourcents de détecteurs sont inopérants.

Malgré des besoins scientifiques forts pour des imageurs grands champs hautement sensibles, dotés d'une grande surface de détection pour l'exploration du ciel transitoire à haute énergie, et bien que la technologie existe, des efforts importants restent à faire avant de pouvoir proposer des instruments avec une surface de détection supérieure à 1 m^2, avec une masse, un volume et des coûts acceptables.

Finalement, après avoir fait face à des défis technologiques et scientifiques, ayant abouti à une performance de seuil bas de détection meilleure qu'attendue, je terminerai ce manuscrit avec l'espoir que, grâce à tous les développements réalisés, le savoir-faire acquis pendant toutes ces années, et à l'ensemble des travaux que j'ai menés sur les modules XRDPIX, la mission SVOM, au moyen du détecteur X et gamma de l'instrument ECLAIRs, apportera une moisson de résultats, et que ma recherche constante de voies d'optimisation suggérera de nouvelles et nombreuses pistes d'amélioration pour de grands plans de détection pixélisés de futurs télescopes spatiaux.

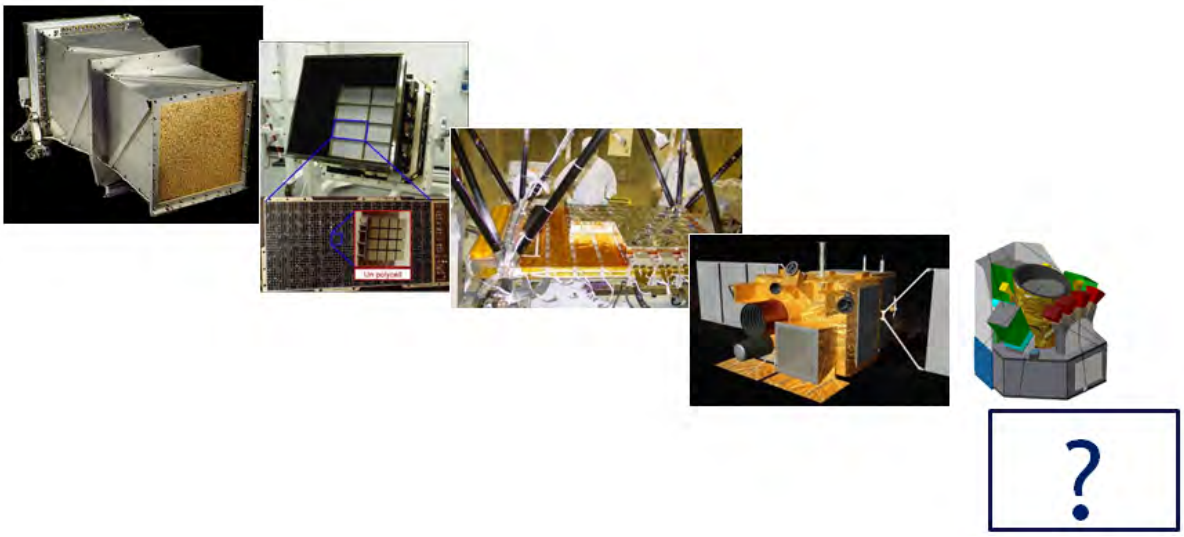


FIGURE 6.7 – L'évolution des missions spatiales au cours des dernières décennies, dédiées à l'exploration du ciel, avec en particulier l'observation des sources transitoires de rayonnement gamma.

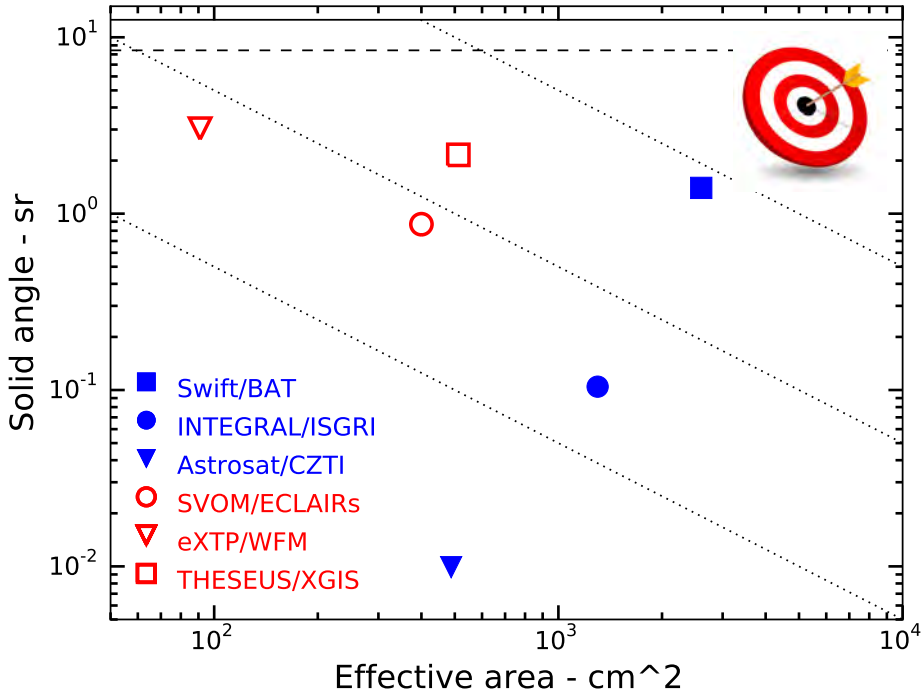


FIGURE 6.8 – Figure de mérite de six instruments, dont trois en opération (en bleu) et trois à venir (en rouge), destinés à détecter des sources transitoires pour l'astronomie gamma [Lacombe et al., 2019].

Table des figures

1 Bon voyage spatial petits modules XRDPIX ! 6

1.1 Illustration des conséquences d'une fusion d'étoiles à neutrons, comprenant la génération d'un sursaut gamma. Au centre se trouve un objet compact - soit un trou noir, soit une étoile à neutrons massive - avec un jet relativiste représenté en jaune. Crédit : NASA/CXC/M.Weiss 9
1.2 Distribution de la fluence de 2704 sursauts détectés par l'instrument BATSE. Credit : NASA/BATSE 12
1.3 Image du CGRO en orbite autour de la Terre. Credit : NASA 13
1.4 Carte du ciel du rayonnement gamma observé par EGRET dans la gamme d'énergie au dessus de 100 MeV. Credit : NASA 14
1.5 Carte du ciel de l'^{26}Al détecté par COMPTEL / Credit : COMPTEL Collaboration. 14
1.6 Image d'un modèle de BEPPOSAX. Credit : Mike Peel 15
1.7 Le satellite HETE-2. Credit : NASA 17
1.8 Dureté en fonction de la fluence de sursauts gamma détectés par la mission *HETE-2*. Credit : C. Barraud et l'équipe de *HETE-2* 17
1.9 Image de gauche : Satellite *INTEGRAL* / Image de droite : Instrument IBIS. Credit : ISDC 19
1.10 Images de la mission spatiale SWIFT. Credit : NASA 20
1.11 Trou noir supermassif détecté par SWIFT. Credit : NASA's Goddard Space Flight Center 21
1.12 Le satellite SVOM comprend quatre instruments spatiaux : deux instruments français, ECLAIRs et MXT (Microchannel X-ray Telescope), et deux instruments chinois, VT (Visible Telescope) et GRM (Gamma Ray Monitor). Credit : CNES 23

2.1 Courbe de lumière d'un sursaut gamma observé par BATSE, donnant l'évolution du nombre de coups détectés par seconde au cours du temps. Cet exemple montre le profil du sursaut gamma GRB 920216, dont le pulse unique est caractérisé par une montée rapide et une décroissance plus lente. 25
2.2 Graphe de gauche : Distribution en durée des sursauts gamma observés par l'instrument BATSE (chapitre introductif 1) qui montre la distinction de 2 classes de sursauts [Paciesas et al., 1999] / Graphe du bas : La durée T_{90} en fonction du rapport de dureté, analogue à la dureté spectrale du sursaut. Les points rouges sont ceux qui appartiennent le plus à la catégorie des sursauts longs et les points bleus à la catégorie des sursauts courts [Horváth et al., 2018]. 26

2.3 Courbe de la décroissance du flux et paramètres ajustés. L'émission prompte évolue jusqu'à une centaine de secondes, lorsque l'émission rémanente perdure jusqu'à une dizaine d'heures [Willingale et al., 2007]. 26
2.4 Gauche : Collision de 2 étoiles à neutron. Credit : Dana Berry, SkyWorks Digital / Droite : Image d'un sursaut gamma. Credit : Paulista, Shutterstock 28
2.5 Graphe du haut : Courbe de lumière du sursaut GRB 090816 C observé par Fermi, qui montre que le nombre de photons gamma reçus par seconde est très variable. / Graphe du bas : 12 courbes de lumières enregistrées par BATSE montrant la grande variabilité de profils temporels [Kouveliotou et al., 1993]. 30
2.6 Images de la Voie Lactée selon la fréquence d'émission des photons. Credit : NASA Goddard Space Flight Center 33
2.7 Transfert d'énergie aux électrons du milieu traversé par une particule chargée lourde (dans cet exemple, ce sont des particules α de 110 MeV) : le processus d'ionisation démarre au delà du potentiel d'ionisation et les électrons δ sont les électrons d'énergie supérieure à 100 eV. Les électrons déposent leur énergie localement à la suite de nombreuses collisions (énergie absorbée) tandis que les photons transmettent leur énergie à un unique électron qui la déposera ensuite dans le milieu cible (énergie transférée). Credit : Fabio Sauli, CERN 35
2.8 Image de gauche : Parcours d'un électron / Image de droite : Energie déposée par des électrons et Energie transmise par un photon très énergétique. 37
2.9 Interactions d'un électron incident avec un atome d'un matériau cible - Schéma de gauche : processus d'ionisation, avec l'électron incident qui est dévié (rétrodiffusé) après avoir éjecté de l'atome un électron situé sur une couche interne de celui-ci. / Schéma de droite : processus d'excitation, avec l'électron incident qui est dévié, après qu'un électron orbital est passé sur une couche supérieure. Dans les deux cas, la réorganisation du nuage électronique (l'électron redescend sur une couche inférieure) donne lieu à une émission caractéristique (fluorescence de l'atome ou rayonnement X secondaire). 38
2.10 Intéraction du rayonnement gamma - Prédominance des effets selon le numéro atomique Z et l'énergie incidente. 39
2.11 Absorption d'un photon gamma par un atome : l'effet photoélectrique se produit en deux temps. D'abord, le photon arrache un électron lié d'un atome (a). Dans le cas d'un photon gamma, il s'agit généralement d'un électron appartenant aux couches les plus internes L ou K. Ensuite l'atome qui a perdu un de ses électrons internes se trouve dans un état excité. Un électron d'une couche plus externe (b) vient occuper la lacune laissée par l'électron éjecté. Si l'électron éjecté appartenait à la couche K comme sur la figure, un rayon X est émis lors de cette transition. L'électron éjecté de la couche K va déposer son énergie dans le détecteur, provoquant un signal électrique (semi-conducteurs), lumineux (scintillateurs) ou thermique (calorimètre). Credit CNRS/In2p3 . . 40
2.12 Spectre d'une source de ^{137}Cs montrant le pic de pleine énergie $E_{Cs137[\gamma]}$ à 662 keV, le front Compton à 478 keV et le pic de rétrodiffusion Compton à 184 keV. Credit (fichier d'origine avant ajouts) : Dirk Hünniger 41
2.13 Création de paire par interaction d'un photon gamma dans le champ d'un noyau atomique. 42

2.14 Graphe de gauche : Structure d'un atome de Fer constitué de 26 protons / Graphe de droite : Spectres d'absorption X du fer chauffé à 100 eV pour différentes densités : sur une large plage spectrale, le plasma dense est principalement caractérisé par les flancs d'absorption ; le spectre d'un plasma peu dense contient un grand nombre de raies. 43
2.15 Graphe du haut : Processus d'atténuation / Graphe du bas : Courbes de coefficients d'atténuation linéique pour différents matériaux : CdTe (rouge), Germanium (vert), Si (cyan) et NaI (noir) [Takahashi & Watanabe, 2001]. 44
2.16 Interactions du rayonnement avec la matière : représentation de différents effets. 46
2.17 Gauche : Vue en coupe d'un détecteur Germanium et de l'électronique front-end associée. / Droite : Schéma simplifié d'un détecteur à semi-conducteur de type n, la partie hachurée représentant le germanium. Credit ORTEC 49
2.18 Courant d'obscurité en fonction de la tension appliquée à un détecteur SiPM SensL (de zone active 3x3 mm^2 et de taille de pixel 35 x 35 μm^2, mesuré à trois températures : +23°C (rouge), −15°C (cyan) et −22°C (bleu) [Lacombe et al., 2016b]. 51
2.19 Maille élémentaire de la structure cristallographique cubique du CdTe : les atomes de tellurure occupent les sites symbolisés par les grandes sphères et les atomes de cadmium par les petites sphères. 52
2.20 Image de gauche : Schéma des bandes d'énergie d'un semi-conducteur : E_V pour la bande de valence, E_C pour la bande de conduction, et E_G pour la bande interdite, de valeur typique autour de 1 eV - Dans le cas d'un conducteur, les bandes se chevauchent tandis que pour un isolant, E_V et E_C sont séparées par une bande interdite de plusieurs eV. / Image de droite : Schéma simplifié d'une étape de conduction dans un semi-conducteur solide : les électrons externes sont engagés dans des liaisons covalentes : lorsqu'une liaison est brisée, par un photon ou par agitation thermique, un électron devient mobile (électron libre) et il est remplacé par un trou. Un électron voisin, libéré par le même phénomène, va occuper cette lacune et laisser à son tour un trou libre. 56
2.21 Courant de fuite en fonction du temps de polarisation - Moyenne de 27 détecteurs CdTe d'une Céramique Détecteurs refroidie à −20°C avec l'erreur standard associée (écart-type par la racine carrée des 27 valeurs) - Haute tension appliquée = −600 V pendant 24 h de polarisation. 57
2.22 Spectres en énergie obtenus par des détecteurs CdTe ACRORAD. Graphes de gauche : Détecteur CdTe de type ohmique polarisé à −60 V, de résistivité à +25°C égale à $1{,}8.10^9$ Ω.cm / Graphes de droite : Détecteur CdTe de type Schottky polarisé à −700 V, de résistivité à +25°C égale à $3{,}7.10^{11}$ Ω.cm, soit un CdTe Schottky 200 fois plus résistif qu'un CdTe ohmique. Credit ACRORAD 58
2.23 Spectres du radionucléide ^{241}Am imagés par différents détecteurs - Graphe de gauche : Détecteur HPGe / Graphe de droite : Détecteur CdTe (rouge) et Photodiode silicium Si-PIN (noir) - Credit AMPTEK. 60
2.24 Gauche : Spectre de comptage photo-électron - Le seuil est défini entre deux pics - Les valeurs non entières de comptage sont dues au bruit du circuit électronique de lecture / Droite : Acquisition d'un spectre de comptage photo-électron d'un détecteur SiPM mesuré par un oscilloscope [Lacombe et al., 2018]. 65

2.25 Spectre d'un détecteur CdTe Schottky (voie P20 d'un prototype XRDPIX polarisé à -400 V, programmé au peaking time de 4,4 µs et refroidi à $-20°C$) de sources radioactives de ^{55}Fe et de ^{57}Co : à basse énergie apparaissent les raies X à 5,9 keV (^{55}Fe) et 6,4 keV (^{57}Co) et à plus haute énergie, les raies gamma à 14,4 et 122 keV émises par le ^{57}Co. 68

2.26 Principe du masque codé : chaque source projette l'ombre du masque (correspondant à un motif opaque) sur le plan de détection, qui représente une image avec une forme unique permettant d'identifier la direction et ainsi, l'origine de la source, de manière exacte (après reconstruction par calcul). 69

2.27 Quelques caractéristiques de sursauts gamma détectés par l'instrument BAT/*SWIFT*. 72

2.28 Nombre de sursauts détectables dans tout le ciel par l'instrument ECLAIRs dans des conditions d'observation idéales : un bruit de fond constant de 2500 c/s, pour une observation dans la gamme d'énergie [5 - 80] keV, un temps d'intégration de 1 s et un spectre en photons en loi de puissance $E^{-1,2}$ - La barre verticale (en rouge) correspond à la sensibilité de l'instrument ECLAIRs, qui croise la courbe de distribution log N - log P de BATSE. 74

2.29 Graphes obtenus à partir des données de la table SWIFT : En haut à gauche : Le nombre de photons en fonction de la fluence - En haut à droite : Le nombre de photons/sec en fonction de la fluence - En bas à gauche : Le peak photon flux en fonction de la fluence -En bas à droite : La fluence en fonction du T90. 75

2.30 Carte de 913 sursauts ayant été détectés par l'instrument BAT de *SWIFT* (vert) – En rouge sont identifiés les sursauts de cette table qui ne seraient pas détectés par l'instrument ECLAIRs de SVOM en considérant un seuil de détection à 7 sigma, en tenant compte d'une surface efficace dépendant d'un angle solide d'arrivée différent pour chaque sursaut. (basé sur un fichier de simulation IRF à 20 keV). 76

3.1 Satellite SVOM en vue d'artiste. Credit CNES 79

3.2 Le modèle STM (Modèle Structurel et Thermique) de la plate-forme SVOM, avec quelques-uns de ses instruments en cours de montage. Credit CNES . . . 80

3.3 Les instruments de SVOM. A bord, le GRM (Spectromètre de champ de vue 2 sr, dans la gamme d'énergie [15 - 5000] keV, constitué de trois « Gamma Ray Detectors »), VT (télescope visible de champ de vue 26' x 26'), MXT (télescope X de champ de vue 64' x 64' travaillant entre 0,2 et 10 keV) et ECLAIRs (décrit dans la section 3.2) / Au sol, les 3 instruments F-GFT (franco-mexicain), GWAC et C-GFT (chinois) / Le satellite pèsera près de 930 kg, dont la moitié sera la masse de la charge utile. Les instruments ECLAIRs, GRM et GWAC observeront les émissions promptes, quand les autres instruments s'occuperont du suivi ([Cordier et al., 2015] [Wei et al., 2016]). 81

3.4 Image de gauche : L'instrument MXT. Sa caméra est composée d'un ensemble de galettes de micro-canaux de 40 µm de côté (optique à « micropores »), d'une roue de calibration, d'un plan focal, qui intègre le détecteur et son électronique de proximité, ainsi qu'un blindage conçu pour protéger le détecteur des radiations spatiales. Un radiateur permet le refroidissement à −65°C nécessaire à la diminution du bruit de lecture du détecteur. / Image de droite : L'instrument ECLAIRs, comprenant un radiateur, un masque codé, un plan de détection, un blindage, une structure mécanique et un coffret métallique à l'intérieur duquel sont montés les électroniques « ELS », et un calculateur de bord appelé « UGTS » (boîtier noir), pour Unité de Gestion - des détecteurs XRDPIX - et de Traitement Scientifique. 82

3.5 Structure du télescope ECLAIRs en vue éclatée : il est constitué d'un masque codé, d'un blindage passif, d'un plan de détection refroidi à −20°C au moyen d'un radiateur, et d'une électronique Front-End ELS. 85

3.6 Caméra DPIX et ses caloducs, intégrés autour de la ceinture d'interface, réalisant la régulation thermique. En haut à gauche : Plan de détection de la caméra DPIX équipée de ses caloducs vue de face supérieure / En haut à droite : ELS Box de l'instrument ECLAIRs. 86

3.7 Première image de la caméra pixélisée du télescope ECLAIRs, avec ses 6400 détecteurs CdTe fonctionnant dans les conditions de vol (à basse température et sous vide secondaire) éclairés par des sources de ^{55}Fe et ^{241}Am. 87

3.8 Plan et image du système de caloducs utilisés pour le contrôle thermique du plan de détection. Credit IRAP et CNES 88

3.9 Image en haut à gauche : Une des premières versions du motif du masque ECLAIRs (la version finale a un renforcement en forme de croix à l'intérieur du carré) / Image en haut à droite : Prototype de masque codé ECLAIRs / Image au centre à gauche : Repères du masque sur la version finale du motif / Image au centre à droite : Mesures du masque assemblé à la machine à mesurer tridimensionnelle / Image en bas à gauche : Modèle structural et thermique du masque (à partir de la dernière version de motif) / Image en bas à droite : STM de la structure mécanique et du masque de l'instrument ECLAIRs. Credit APC : Alain Givaudan et Cyril Lachaud 89

3.10 Absorption estimée de 3 couches de MLI avec la couche de platine. 90

3.11 Impact de la fraction d'ouverture du masque codé sur le taux de détection des sursauts gamma, avec différentes courbes selon la durée du sursaut : cette figure montre la perte de sensibilité en fonction de l'ouverture du masque codé (entre 0,3 et 0,5). Les courbes au dessus de 100 % indiquent une perte de sensibilité. En augmentant l'ouverture du masque, nous améliorons la détection des sursauts courts. 91

3.12 Gauche : Spectre d'une voie bruyante dans le cas où son seuil numérique est programmé à une trop faible valeur / Droite : Courbe de lumière de 2 voies ProtoDPIX : la courbe bleue est une voie normale et la courbe orange montre une voie instable. 93

3.13 Spectre en énergie d'une source calibrée d'^{241}Am, obtenu sur une voie (P10) d'un XRDPIX FM (module XR105) de l'instrument ECLAIRs. Le module est refroidi à −20°C, testé sur le banc BC1 et configuré à (HT = −400 V ; tp = 4,4 µs) à un seuil numérique programmé de façon automatique tel qu'il fait apparaître le pic de bruit spectral de la voie (tables de configuration 5.2 et 5.3). 94
3.14 Comparaison des courbes d'efficacité du télescope ECLAIRs, avec masque et couche de MLI (courbe rouge) et sans masque ni MLI (courbe noire). 95
3.15 Simulation des comptages du bruit de fond dans la gamme d'énergie [4 - 150] keV, sur l'ensemble du plan de détection [Mate et al., 2019]. 96
3.16 Simulation du spectre du bruit de fond dans la gamme d'énergie [4 - 200] keV en fonction de la position de la Terre dans le champ de vue d'ECLAIRs - En dessous de 80 keV, le bruit de fond est dominé par le CXB si l'instrument ne voit pas la Terre ; quand le satellite est dirigé vers la Terre, ECLAIRs ne voit pas un spectre de CXB très élevé à plus basse énergie (E < 40 keV), mais peut détecter des raies de fluorescence provenant de plusieurs matériaux : cuivre (blindage) à 8 keV, CdTe (détecteur) autour de 26 keV, raie X de tantale (masque) à 57 keV. 97
3.17 Illustration des deux contours de la SAA définis pour l'instrument ECLAIRs : Contour de la SAA étendue (vert) et contour de la SAA profonde (rouge). . . 98
3.18 Sensibilité de l'instrument ECLAIRs (en noir) à un sursaut d'une durée de 1 s en fonction de l'énergie maximale E_{peak}, caractéristique du sursaut. La sensibilité est mesurée dans la gamme d'énergie [1 - 1000] keV. L'instrument est plus sensible que *SWIFT* / BAT pour la détection des sursauts mous ayant une énergie E_{peak} inférieure à 30 keV [Mandrou et al., 2008]. 99
3.19 Perte de sensibilité de l'instrument ECLAIRs (%) à la détection de sursauts gamma dans la gamme d'énergie [4 - 120] keV, en fonction de la direction de son pointage [Gros, 2017]. 100
3.20 Comparaison de plusieurs masques codés ayant des rapports m/d différents, compris entre 1,2 et 3,3. La figure montre la précision de localisation en fonction de la sensibilité. Credit C. Lachaud 101
3.21 Simulation montrant la précision de localisation d'une population de sursauts gamma selon différents SNR, distribués aléatoirement dans le champ de vue - Cela permet de voir que 90 % des sursauts avec un SNR de 8,5 sont correctement localisés dans un rayon de 10 arcmin (courbe rouge). 102
3.22 Impact de l'occultation de la Terre sur l'efficacité du trigger. La figure montre l'efficacité du trigger en fonction de l'angle entre la direction de pointage et la Terre [Gros A., 2016]. 103
3.23 Diagramme des modes de fonctionnement de l'instrument ECLAIRs. 106
3.24 Cette carte illustre les temps d'exposition longs vers les pôles galactiques, ce qui permet de surveiller l'activité à long terme des sources de rayons X durs situées dans ces régions (comme les noyaux actifs de galaxies), en se basant sur une annnée d'observation du ciel. Credit SVOM Consortium / Livre Blanc [Wei et al., 2016] 110

4.1 Photo d'un module XRDPIX en version modèle de vol. 112

4.2 Schéma d'un détecteur montrant les matériaux le constituant : un semiconducteur en tellurure de cadmium, des électrodes en platine et indium, une couche très fine de titane. 114

4.3 Haut : Vue du CdTe sous binoculaire - Gauche : face Platine correspondant à la cathode (Une tâche d'encre noire permet de la différencier de l'autre face.) / Centre : face Indium correspondant à l'anode (sortie du signal détecteur) / Droite : Tranche du CdTe - Bas : Imagerie FIB - Gauche : diffusion du contact ohmique (platine) dans le cristal de CdTe / Droite : Zoom sur l'anode : fine épaisseur de titane et flash d'indium (plus blanc car plus émissif). 115

4.5 Graphe de gauche : Courbes d'absorption à 100 keV en fonction de l'épaisseur du matériau semiconducteur - Silicium, Germanium et Tellure de Cadmium - Credit ACRORAD / Graphe de droite : Principe de fonctionnement d'un détecteur CdTe Schottky utilisé sur ECLAIRs. 115

4.4 Analyse par EDX (« Energy Dispersive X-ray Spectroscopy », technique permettant la détermination de la composition chimique de la surface examinée, par analyse spectrale de rayons X) des matériaux constituant un détecteur CdTe utilisé pour ECLAIRs - Haut : analyse EDX face Platine sur CdTe / Bas : analyse EDX face Titane et Indium (par exemple, nous pouvons voir les pics caractéristiques, ici majoritaires, de Cadmium (Cd) et de Tellure (Te) autour de 3 et 4 keV). 116

4.6 Synthèse des mesures de capacités effectuées sur différents types de substrats céramique (couche épaisse CE et cofrittée HTCC), avec l'exemple de mesures par rapport à la masse, de mesures inter-pistes et de calcul de l'angle de perte. Nous pouvons constater que la capacité maximale de la céramique HTCC contre-collée est de 1,75 pF et de 3,25 pF pour la céramique Couche épaisse contre-collée (toutes deux sont contre-collées à des céramiques CE pour les détecteurs). Pour ce qui est de la moyenne des 32 valeurs de capacités par rapport à la masse, la HTCC évolue autour de 1,24 ±0,31 pF tandis que la CE se trouve à 2,34 ±0,60 pF, soit approximativement le double, et traduisant une plus grande homogénéité pour le substrat HTCC ; dans les deux cas, l'angle de perte est très faible ce qui garantit de faibles pertes diélectriques. 118

4.7 Images de différentes Céramiques Détecteurs avec trottoirs, soit avant leur contre-collage avec une Céramique ASIC - Ces photos mettent en évidence la grille de polarisation en Kovar (initialement en Constantan) amenant la haute tension : elle comprend 8 pastilles reliées les unes aux autres, chacune polarisant quatre détecteurs CdTe, et un plot étamé (positionnée sur la droite) faisant le lien avec l'autre céramique (Céramique ASIC) par un fil traversant. Credit IRAP 119

4.8 Architecture électrique de la puce ASIC Idef-X. Credit CEA 120

4.9 Image d'une Céramique ASIC 121

4.10 Gauche : Vue éclatée d'un module XRDPIX / Droite : Séquence de développement d'un XRDPIX. 122

4.11 Graphe de gauche : Valeurs des seuils numériques pour lesquels une voie ASIC déclenche à un même taux de coups injectés en entrée (correspondant à un niveau nominal spécifié par la mission), en fonction de la position des voies ASIC d'une Céramique ASIC version 1 (prototype). Nous voyons que certaines voies déclenchent à la valeur maximale de 62 (soit environ 17 keV) ce qui illustre les problèmes de déclenchements intempestifs sur une partie des voies que nous avons rencontrés sur les premiers modèles de Céramique ASIC ; la seule solution était alors de désactiver la voie bruyante, ce qui n'était pas acceptable étant donné la forte proportion de voies mauvaises sur une même Céramique ASIC (plus d'un tiers selon la valeur du registre RSM). / Image de droite : Étapes de corrections sur le nouveau design pour corriger le phénomène perturbateur « d'auto-déclenchements » observé sur l'ensemble des Céramiques ASICs version 1, étant donné le caractère « hardware » du problème. 125
4.12 Electronique ELS de la caméra de l'instrument ECLAIRs. Figure du haut : Vue mécanique 3D d'un module ELS comprenant les ceintures mécaniques de maintien des différentes cartes électroniques (carte ADC et multiplexage, carte haute tension « HVPS », carte basses tensions « LV », carte pré-processeur contenant le FPGA) / Figures du bas : à gauche, image d'un module ELS modèle EQM ; à droite, image d'une carte pré-processeur dont nous pouvons voir le composant FPGA au centre. 127
4.13 Schéma et timing de commande et lecture d'un ASIC/XRDPIX : lorsqu'un déclenchement survient (une voie détecteur est touchée), l'information est donnée par la montée du signal TRIG au niveau haut (ici « TRIGGER »). Suite à un délai de gel de la lecture (Time2Freeze), le contrôleur FPGA fait passer le signal READ (ici « RD ») à '1' pour débuter la lecture de l'ASIC puis envoie 32 impulsions du signal STROBE. A chacun de ses fronts descendants, le signal D_{OUT} indiquera le contenu du registre d'événement, pour connaître la (les) voie(s) qui a (ont) déclenché. 127
4.14 Séquence de codage d'une énergie : l'ELS échantillonne deux niveaux d'énergie : la ligne de base et le niveau d'énergie de l'impulsion photon. L'énergie brute s'obtient en effectuant la différence entre l'énergie du photon et la ligne de base. 128
4.15 Oscillogramme (AC) en sortie d'un module XRDPIX lors d'une acquisition spectrale de ^{57}Co : les signaux correspondent au niveau d'énergie déposés par le photon (pas de visualisation de ligne de base dans cet exemple). Nous mesurons le signal analogique A_{out+} en jaune (voie 1) et A_{out-} en bleu (voie 2). La voie en rouge, obtenue par calcul, effectue la différence des signaux (A_{out+} - A_{out-}). 129
4.16 Figure du haut : Chronogrammes de commande d'un ASIC / XRDPIX - Ecriture puis Lecture d'un registre. / Figure du bas : Schéma des entrées/sorties d'un ASIC / XRDPIX permettant le dialogue avec son contrôleur FPGA contenu dans l'électronique ELS : l'ASIC comprend deux signaux de sortie, cruciaux pour connaître l'état d'une voie détecteur (le signal TRIG informe sur le déclenchement des voies) et s'il y a lieu, le nombre et l'identification des voies touchées (rôle du signal D_{OUT}). 131
4.17 Exemple d'un chronogramme quand deux voies d'un même XRDPIX sont actives (ici voies détecteurs P21 et P13, correspondant aux voies ASIC n°VE1 et VE6 soit le 1er front descendant et le 6ème front descendant du signal STROBE qui a une fréquence de 5 MHz). 132

5.1 Vue 3D d'un module XRDPIX. 133

5.2 Constitution d'un atome d'Americium 241. 133

5.3 Spectre de ^{241}Am obtenu par simulation MCNPX pour un détecteur CdTe sans couches d'indium, de platine et de titane, de façon à identifier les pics spécifiques du cadmium (33,4 keV et 36,55 keV - courbe jaune) et du tellure (28,56 keV et 32,2 keV - courbe verte). 134

5.4 Spectres de ^{241}Am dans la gamme d'énergie [10 - 23] keV, obtenus à partir d'un détecteur HPGe. 135

5.5 Exemple de spectre avec un pic de bruit - Polarisation à −300 V - peaking time à 2,6 µs - Seuil numérique à 8 - Source ^{241}Am. Le pic de plus basse énergie est le pic de bruit, les autres pics sont les raies X et gamma de la source de ^{241}Am. 138

5.6 Graphe de gauche : la FWHM estimée pour la raie à 59,5 keV en fonction de la FWHM estimée pour la raie de 13,9 keV à la configuration (−400 V ; 4,4 µs) / Graphe de droite : la FWHM estimée pour la raie à 59,5 keV en fonction de la FWHM estimée pour la raie de 13,9 keV à la configuration (−300 V ; 2,6 µs). Ces figures peuvent être directement comparées aux courbes mesurées, présentées ci-après dans ce chapitre (Fig. 5.25). 141

5.7 Images du banc de test permettant les mesures de courant de fuite - Photo du haut : Enceintes thermiques pour la régulation des basses températures dans lesquelles sont montés les circuits de test des « Céramiques Détecteurs » 32 voies, mesurées au moyen d'un ampèremètre à faible signal, pour des courants de l'ordre du pico-ampère, placé en sortie d'un multiplexeur 32 voies / Photo du bas : Circuit de test des « Céramiques Détecteurs » comprenant un substrat céramique à pointes. 143

5.8 Courants de fuite de 51 Céramiques Détecteurs FM polarisées à −300 V (abscisse) et à −500 V (ordonnée) - Mesures effectuées avant la phase de dégazage sur 1632 voies - Les points en rouge sont hors cadre défini pour un courant de 100 pA 144

5.9 Courant de fuite moyen selon la position des 32 voies de 51 Céramiques Détecteurs modèles de vol (soit 1632 détecteurs) polarisées à $-300V$ (graphe du haut), $-400V$ (graphe du milieu) et $-500V$ (graphe du bas). 145

5.10 Courant de fuite en fonction de la température (+23°C, +5°C, −10°C, −20°C) mesuré sur des détecteurs (96) de 3 Céramiques Détecteurs (modèle de qualification)polarisées à −300 V - Graphe du haut : Mesures avant la phase de dégazage / Graphe du bas : Mesures après la phase de dégazage. 146

5.11 Graphe du haut : Courant de fuite des 32 détecteurs d'une Céramique Détecteurs en fonction du flux lumineux / Graphe du bas : Courant de fuite moyen d'une Céramique Détecteurs en fonction du temps de repos après une exposition lumineuse. Les 32 détecteurs ont été polarisés à −600 V et testés à température ambiante. 149

5.12 Images du banc de test permettant les mesures de gain et de bruit ENC des Céramiques ASIC - Gauche : Enceinte thermique pour la régulation à −20°C dans laquelle est montée le circuit de test d'une « Céramique ASIC » 32 voies / En haut à droite : banc de test électronique connecté à un générateur de signal arbitraire / En bas à droite : Céramique ASIC montée sur son circuit de test comprenant un support mécanique avec maintien par visserie sur tige filetée et câble spécifique pour effectuer l'alimentation, le contrôle et la commande des puces ASIC. 150

5.13 Signaux en entrée d'un ASIC, envoyés sur chacune de ses 32 voies, par le biais du signal V_{TEST} : ils sont créés « sur mesure » au moyen d'un générateur arbitraire bas bruit, pour représenter des impulsions en sortie d'un détecteur CdTe. Les pics en sortie de chaîne électronique (après les différents étages électroniques ASIC + amplification externe + conversion analogique-numérique) sont illustrés ici par deux pics idéaux de même fréquence, et de niveaux d'amplitude doublés l'un par rapport à l'autre. 151

5.14 Figure de gauche : Comparaison des mesures de gain obtenues pour deux valeurs de température +23°C et −20°C / Figure de droite : Comparaison des mesures du bruit ENC obtenues à ces deux valeurs de température - 160 voies de 5 Céramiques ASIC Présérie (modèles de qualification). 152

5.15 Histogramme des bruits ENC de 67 Céramiques ASIC modèles de vol (soit 2144 voies) aux valeurs de peaking time de l'ASIC 2,6 µs (gris) et 4,4 µs (magenta). 153

5.16 Histogrammes des gains aux valeurs de peaking time de l'ASIC 2,6 µs (cyan) et 4,4 µs (bleu) pour une partie des Céramiques ASIC FM de la série 2 (3616 voies mesurées). Les histogrammes ont été normalisés selon une fonction de densité de probabilité ; la hauteur de chaque barre est donnée par le produit de la largeur de l'intervalle (barre) par le rapport du nombre de gains dans l'intervalle sur le nombre total des gains. L'addition des aires des barres de l'histogramme est égale à 1. 153

5.17 Bruit ENC de 3 Céramiques ASICs, avec la moyenne arithmétique de 96 valeurs (marqueurs magenta) en fonction du peaking time (8 valeurs). 154

5.18 Bruit ENC pour les 32 voies de 67 pièces Céramiques ASICs à 2 valeurs de peaking time - Figure du haut : tp = 4,4 µs / Figure du milieu : tp = 2,6 µs / Figure du bas : capacité par voie d'un substrat céramique nu. 155

5.19 Bruit ENC en fonction du gain - Graphe du haut : 7232 voies mesurées au peaking time 4,4 µs à $-20°C$ (226 Céramiques ASIC série 2) / Graphe du bas : 3616 voies mesurées au peaking time 2,6 µs à $-20°C$ (113 Céramiques ASIC série 2). 156

5.20 Images du haut : matrice des courants de fuite d'une Céramique Détecteurs polarisée à −500 V (à gauche) et matrice des valeurs ENC d'une Céramique ASIC programmée à 4,4 µs (mesures effectuées avant le couplage, c'est à dire avant le collage d'une Céramique Détecteurs avec une Céramique ASIC) / Images du bas : matrices de 32 valeurs de FWHM du pic à 59,5 keV (à gauche) et 32 valeurs de seuils bas en énergie (à droite) du module XRDPIX obtenu après couplage, dans la configuration (−500 V ; 4,4 µs). 158

5.21 Vue matricielle d'un module XRDPIX FM (XR133), montrant 4 mesures de performance - Image en haut à gauche : matrice des courants de fuite à HT = −300 V de la Céramique Détecteurs avant contre-collage / Image en haut à droite : matrice des valeurs ENC mesurées au tp = 2,6 µs de la Céramique ASIC avant contre-collage / Images en bas à gauche : matrice de 32 valeurs de FWHM du pic à 59,5 keV / Images en bas à droite : matrice de 32 valeurs de seuils bas en énergie en configuration (−300 V ; 2,6 µs) du module XRDPIX final correspondant aux CD/CA contre-collées. 159

5.22 Exemple des performances des 32 voies d'un module XRDPIX en version prototype (XR3N005) - Courants de fuite à HT = −400 V de la Céramique Détecteurs avant contre-collage (marqueurs carrés bleus) / Valeurs ENC mesurées au tp = 4,4 µs de la Céramique ASIC avant contre-collage (marqueurs triangles bleus) / Valeurs de FWHM du pic à 60 keV (marqueurs carrés roses) / Valeurs de seuils bas en énergie (marqueurs ronds roses) en configuration (−400 V ; 4,4 µs) du module XRDPIX final correspondant aux CD/CA contre-collées. . 160

5.23 Figure du haut : Bancs d'essais pour les mesures spectrales unitaires permettant de travailler à −20°C sous vide secondaire. / Figure du bas : Schéma de conception mécanique et géométrie du support de la source et de la cuve à vide. La source radioactive est située dans une petite chambre placée à 81,6 mm au-dessus du module XRDPIX dans le cas du banc n°2. 166

5.24 Spectres calibrés de la voie « P10 » du module XR105 - Haute tension (HT) à −300 V - Peaking time (tp) à 2,6 µs - Calibration 16 bits avec un filtrage Savitzky-Golay (courbe magenta). En haut à gauche : source ^{241}Am - Seuil numérique programmé à 30 / En haut à droite : source ^{241}Am - Seuil numérique automatique permettant de voir le pic de bruit à basse énergie (soit une valeur entre [1,5 - 2,3] keV pour les voies fonctionnant normalement) / En bas à gauche : Test sans source - Seuil numérique automatique / En bas à droite : source ^{241}Am - Seuil numérique fixé à 16 (≈ 4 keV). 168

5.25 Graphes de gauche : Mesure de la FWHM du pic à 60 keV en fonction de la FWHM du pic à 14 keV, dans la configuration (−400 V ; 4,4 µs), avec suppression de 11 valeurs FWHM au graphe du haut et 27 à celui du bas parmi 1440 voies détecteurs. / Graphes de droite : Mesure de la FWHM du pic à 60 keV en fonction de la FWHM du pic à 14 keV, dans la configuration nominale (−300 V ; 2,6 µs), avec suppression de 3 valeurs FWHM au graphe du haut et 17 à celui du bas parmi 1440 voies détecteurs. Nous noterons la similitude des coefficients entre la droite d'ajustement des mesures et la simulation, dans le cas où le nombre de données supprimées est plus élevé (graphes du bas). . . . 169

5.26 Graphe de gauche : FWHM du pic à 60 keV en fonction de la FWHM du pic à 14 keV, dans la configuration (−200 V ; 4,4 µs) / Graphe de droite : FWHM du pic à 60 keV en fonction de la FWHM du pic à 14 keV, dans la configuration (−300 V ; 1,8 µs) - Six modules XRDPIX mesurés à −20°C. 170

5.27 A gauche : Histogramme des résolutions du pic à basse énergie, à une même polarisation (−400 V) et à 3 valeurs de peaking time 1, 77 µs (jaune), 2, 6 µs (gris) et 4, 4 µs (magenta) - A droite : Histogramme des résolutions du pic à haute énergie, à une même polarisation (−200 V) et à 3 peaking time 1, 77 µs (jaune), 2, 6 µs (bleu) et 4,4 µs (cyan). 171

5.28 Graphe du haut : Histogramme des gains de calibration en énergie des spectres de ^{241}Am de 45 modules (série 1) / Graphe du bas : Moyenne des 32 gains (mesurés sur 16 bit) pour chaque module XRDPIX - Les seuils numériques sont programmés à 30 - En magenta, la configuration (−400 V ; 4,4 µs) et en bleu, la configuration (−300 V ; 2,6 µs). 173

5.29 Seuil bas en énergie de modules XRDPIX FM de la série 1 (1440 voies détecteurs) : Configuration (−400 V ; 4,4 µs) versus configuration (−300 V ; 2,6 µs) - Plus de 95 % des seuils bas en énergie, calculés à partir de spectres de ^{241}Am acquis dans la configuration (−300 V ; 2,6 µs), sont inférieurs à 4 keV. 175

5.30 Seuil bas en énergie de modules XRDPIX FM de la série 2 (5216 voies détecteurs) : Configuration (−400 V ; 4,4 µs) versus configuration (−300 V ; 2,6 µs) - Graphe de gauche : seuils bas calculés à partir de spectres de ^{241}Am / Graphe de droite : seuils bas calculés à partir de spectres de bruit (sans source radioactive). 176

5.31 Histogrammes des seuils bas en énergie de modules XRDPIXs selon 2 configurations (HT ; tp) avec une loi gaussienne appliquée à chaque histogramme normalisé - Courbe magenta pour (−400 V ; 4,4 µs) et courbe bleue pour (−300 V ; 2,6 µs). 176

5.32 Seuil bas en énergie calculé à 6 sigma pour chacune des 32 voies de 45 modules testés dans la configuration (−300 V ; 2,6 µs) - Graphe du haut : test avec photons / Graphe du bas : test sans source radioactive. 177

5.33 Seuil bas en énergie (à 6 sigma) en fonction de la FWHM du pic à 60 keV. Ces performances ont été obtenues à partir de 5216 spectres de ^{241}Am (soit 163 modules XRDPIX FM de la série 2) - Graphe du haut : Configuration (−400 V ; 4,4 µs), avec près de 10% des voies écartées de l'analyse / Graphe du bas : Configuration (−300 V ; 2,6 µs), avec près de 2% des voies écartées de l'analyse. 179

5.34 Modélisation du seuil bas en énergie (calculé à 6 sigma) en fonction de la FWHM à 60 keV (calculée à 60 keV). Graphe de gauche : Configuration (−400 V ; 4,4 µs) / Graphe de droite : Configuration (−300 V ; 2,6 µs) - Modèle obtenu à partir de 8288 mesures de courants de fuite (soit 259 Céramiques Détecteurs). 180

5.35 Graphe du haut : Taux de comptage des 32 voies de 80 modules XRDPIX (pour chaque voie détecteur de même numéro P#, j'ai calculé la médiane de 80 taux de comptage correspondant aux 80 modules testés sur le même banc d'essais à savoir BC2 dans cet exemple) dans le cas de la configuration (−400 V ; 4,4 µs) - cercles magentas - et de la configuration (−300 V ; 2,6 µs) - carrés bleus - à partir de spectres acquis avec des seuils numériques à 30 / Graphe du bas : courbe théorique de comptage (en pointillés) d'une fonction en $\cos^3$ en fonction de l'angle des détecteurs (par exemple un détecteur situé au centre du module XRDPIX a un angle de 2,2°). 181

5.36 Rapport des coups du pic à 14 keV sur le pic à 60 keV dans la configuration (−400V ; 4,4 µs). 182

5.37 Comptage de 91 modules XRDPIX de la série 2 (modèles de vol) en fonction de leurs 32 détecteurs, configurés à (−300 V ; 2,6 µs) et mesurés sur un même banc de test (BC2) / 2912 voies analysées avec un taux de comptage moyen de 25 c/s. 183

5.38 Taux de comptage en fonction de la FWHM de la raie à 14 keV (cercles gris) et de la raie à 60 keV (croix noires) de 80 modules XRDPIX (soit 2560 voies détecteurs) testés dans la configuration (−300 V ; 2,6 µs) à −20°C. 185

5.39 FWHM des pics à 14 keV (graphes de gauche) et à 60 keV (graphes de droite) de 80 XRDPIX FM testés en configuration (−300 V ; 2,6 µs) et (−400 V ; 4,4 µs), en fonction du courant de fuite des détecteurs CdTe polarisés à −300 V (graphes du haut) puis à −400 V (graphes du haut). 186

5.40 Quatre courbes de paramètres de performance selon la position des voies détecteurs : FWHM à 14 keV (étoiles noires) / FWHM à 60 keV (cercles noirs) / Courants de fuite (croix grises) / Capacités (carrés rouges). 187

5.41 Spectres en énergie calibrés d'une source de la source ^{241}Am d'une voie CdTe d'un module de détection XRDPIX, à partir d'une chaîne d'acquisition de 65536 canaux reconstruite sur 8192 canaux avant calibration. 188

5.42 Quatre paramètres de performance en fonction de la température - En haut à gauche : Gain après calibration 16 bits / En haut à droite : Offset après calibration 16 bits / En bas à gauche : FWHM du pic à 14 keV / En bas à droite : FWHM du pic à 60 keV - Tous les graphes sont obtenus à partir de 96 spectres détecteurs (soit 3 modules XRDPIX) paramétrés à la configuration (−300 V ; 2,6 µs). 190

5.43 Graphe du haut : Taux de comptage en fonction de temps de polarisation (30 min - cas nominal - 300 min - 600 min - 1440 min) / Graphe du bas : FWHM des raies à 14 keV et 60 keV en fonction de temps de polarisation - Configuration (−300 V ; $2,6\mu$s) - 2 modules XRDPIX 'XR10' et 'XR153' (soit 64 voies mesurées) refroidis à $-20°C$. 191

5.44 Images du ProtoDPIX : un secteur complet représentant 1/8 de la caméra ECLAIRs, et un secteur dépeuplé avec 7 modules. 192

5.45 Banc de test pour valider le protoDPIX représentant 1/8 de la caméra de l'instrument ECLAIRs. L'électronique est située sous le plan de détection. La source radioactive est contenue dans le boîtier rouge. La température mission est assurée par un liquide caloporteur circulant à l'intérieur de flexibles inox (sur la droite de la photo du bas). 194

5.46 Histogrammes des valeurs de FWHM des pics à 14 keV (graphes de gauche) et 60 keV (graphes de droite) de la source de ^{241}Am en fonction de 6 configurations (Haute tension ; Peaking time) : (−400 V ; $4,4$µs) en magenta / (−300 V ; $2,6$µs) en bleu / (−300 V ; $6,8$µs) en cyan / (−250 V ; $4,4$µs), (−450 V ; $2,6$µs) et (−450 V ; $6,8$µs) en gris. 195

5.47 Seuil bas en énergie de 25 modules XRDPIX d'un secteur ELS (soit 800 voies du ProtoDPIX). Graphe de gauche : mesures en configuration (−450 V ; $2,6\mu$s) en fonction des mesures effectuées à (−300 V ; $2,6\mu$s). La médiane des seuils bas (calculés à 6 σ) est, respectivement, de 3,02 keV dans la première configuration contre 2,91 keV dans la deuxième. / Graphe de droite : mesures en configuration (−250 V ; $4,4$µs) en fonction des mesures effectuées à (−300 V ; $2,6\mu$s). La médiane des seuils bas est de 2,69 keV dans la configuration à peaking time plus élevé. 197

5.48 Évolution de la moyenne des 800 valeurs des FWHM aux pics à 14 keV (graphe du haut) et 60 keV (graphe du bas) en fonction de la durée de la haute tension de −300 V appliquée aux détecteurs pendant 24 h. Le ProtoDPIX est refroidi à −20±1°C. 197
5.49 Évolution du comptage en fonction de la durée de la haute tension de −300 V appliquée aux détecteurs pendant 24 h. Graphe du haut : 800 valeurs de taux de comptage / Graphe du bas : moyenne des 800 valeurs de taux de comptage. Le comptage intégral est effectué sur chaque spectre dans la gamme d'énergie [8 - 65] keV dans le mode single, c'est à dire que tous les événements multiples ne sont pas intégrés au calcul. Le ProtoDPIX est refroidi à −20±1 °C. 199

6.1 Graphe du haut : FWHM du pic à 14 keV (≈ 5000 valeurs) en fonction des 32 voies de chaque module XRDPIX de la série 2 (soit 163 XRDPIX) paramétré en configuration (−300V ; 2,6 µs) - En violet, tracé de la médiane de chaque module. / Graphe du bas : Capacités mesurées sur chaque voie d'une même céramique. 209
6.2 Sursauts gamma que pourrait détecter un instrument de conception similaire à ECLAIRs, dans la gamme d'énergie [4 - 80] keV, mais avec une surface efficace plus petite (en vert : les sursauts détectés / en rouge : les sursauts non détectés). Graphes du haut : un mini ECLAIRs deux fois plus petit (surface efficace ≈ 200 cm^2)/ Graphes du bas : Instrument ECLAIRs - Simulation effectuée à partir de la table des sursauts gamma détectés par BAT/*SWIFT* dans [15 - 150] keV (liste du 05/03/2015) - Hypothèse : S/B = 7 pour les graphes de gauche et S/B = 14 pour les graphes de droite. 211
6.3 Sursauts gamma que pourraient détecter deux instruments de conception similaire à ECLAIRs, dans la gamme d'énergie [4 - 80] keV, mais avec une surface efficace plus grande (en vert : les sursauts détectés / en rouge : les sursauts non détectés). Graphes du haut : un SUPER ECLAIRs cinq fois plus grand (≈ 2000 cm^2)/ Graphes du bas : un SUPER ECLAIRs dix fois plus grand (≈ 4000 cm^2) - Simulation effectuée à partir de la table des sursauts gamma détectés par BAT/*SWIFT* dans [15 - 150] keV (liste du 05/03/2015) - Hypothèse : S/B = 7 pour les graphes de gauche et S/B = 14 pour les graphes de droite. . 212
6.4 Graphe du haut : Évolution du taux de détection par l'instrument ECLAIRs des sursauts de BAT en fonction de la longueur du côté du plan de détection supposé carré (dans la gamme d'énergie [4 - 80] keV / Graphe du bas : Évolution du taux de détection par l'instrument ECLAIRs des sursauts de BAT en fonction de la gamme d'énergie (pour une surface efficace d'environ 410 cm^2). 213
6.5 Exemple de concept d'imageur. 214
6.6 Graphe du haut : Histogramme des médianes (163) des 32 FHWM de chaque XRDPIX (163 modules de la série 2 soit 5216 voies) / Bas : Tableau récapitulatif sur le nombre de modules XRDPIX pouvant être montés sur la caméra de vol (en vert) parmi les séries 1 et 2 (Seule la série 2 complémentaire, d'une quarantaine de modules, ne figure pas dans le tableau). 219
6.7 L'évolution des missions spatiales au cours des dernières décennies, dédiées à l'exploration du ciel, avec en particulier l'observation des sources transitoires de rayonnement gamma. 226

6.8 Figure de mérite de six instruments, dont trois en opération (en bleu) et trois à venir (en rouge), destinés à détecter des sources transitoires pour l'astronomie gamma [Lacombe et al., 2019]. 227
A.1.1 Courbe d'atténuation dans l'aluminium pour des photons d'énergies comprises entre 1 keV et 1 MeV, obtenue à partir du calculateur de NIST. 245
A.8.1 Puissance moyenne de 45 modules XRDPIX de la série 1 en fonction des seuils numériques préalablement réglés. Quatre cas : '63' en vert, soit la caméra entière désactivée, '62' en magenta, soit la caméra au seuil maximal programmable ($\approx$ 17 keV), '12' en noir, soit la caméra au seuil minimal à programmer pour faire disparaître le pic de bruit d'un pixel normal, et en bleu, un cas particulier où 200 pixels de la caméra sur 6400 seraient désactivés. 254

Liste des tableaux

2.1 Interactions physiques. 45
2.2 Caractéristiques de détecteurs à semi-conducteurs utilisés sur des télescopes spatiaux dédiés à l'astronomie gamma. [a]Pour des matériaux les plus purs. . . 61
2.3 Missions spatiales en orbite 70
2.4 Futures missions spatiales Hautes Energies 70
2.5 Table des caractéristiques physiques définissant un sursaut gamma. 72

3.1 Caractéristiques et performances de l'instrument ECLAIRs. 84

5.1 Tableau des termes et indices utilisés dans la formule (F4.1) 139
5.2 Table des sources radioactives utilisées par le projet ECLAIRs pour étalonner les modules XRDPIX 161
5.3 Table de configurations des essais unitaires de validation menés sur les XRDPIX 163
5.4 Plan de tests que chaque module XRDPIX des phases de présérie et de série (près de 250 XRDPIX soit 8000 voies détecteurs testées) a suivi pour la caractérisation et la validation de ses performances. 164
5.5 Table des caractéristiques mesurées sur les modules XRDPIX - Essais unitaires en configuration (-400 V ; $4,4$ μs) 165
5.6 Statistiques de 32 voies d'un module XRDPIX QM (XR3N010) en fonction de la température de test, en configuration (-300 V ; $2,6$ μs). 189
5.7 Table des étapes de mise en route et de vérification précédents une acquisition spectrale du ProtoDPIX 193
5.8 Statistiques du ProtoDPIX : FWHM 196

6.1 Missions à la découverte des sources transitoires X durs 202
6.2 Tables regroupant des données de performance des modules XRDPIX : Tableau du haut : Statistiques selon la série analysée 1 ou 2 / Tableau du bas : Statistiques sur 208 modules XRDPIX des séries 1 et 2, testés aux configurations (-400 V ; 4,4 µs) et (-300 V ; 2,6 µs). 216
6.3 Observables utilisées comme critères de sélection des modèles de vol pour chaque module XRDPIX (dans cet exemple, 46 modules de la série 1) avant l'application des notes de pondération, pour l'obtention d'une note finale. . . 221
6.4 Valeurs de pondération utilisées pour donner un poids différent aux critères de sélection des XRDPIX FM vus dans le tableau 6.3. 222
6.5 Classement XRDPIX à partir des critères de performance de la table 6.3 et des notes pondérées du tableau 6.4. 223
A.2.1 Procédure de mise à « ON » de la caméra d'ECLAIRs, avant toute acquisition spectrale. 246

A.3.1 Table des critères pris en compte pour le classement des XRDPIX 247
A.4.1 Résultats BIPM du radionucléide ^{241}Am. 248
A.5.1 Extrait du tableau combinant les quatre sélections des différents traitements. 249
A.6.1 Exemple de tableau donnant les modules XRDPIX à placer sur l'ELS01 de la caméra de vol et leur position. 250
A.7.1 Paramètres du point de fonctionnement nominal d'un XRDPIX en fonctionnement unitaire. 251
A.7.2 Point de fonctionnement nominal : ProtoDPIX. Ici, nous codons au plus deux événements multiples MEC (ASICLimit = 2, soit deux voies au maximum qui déclenchent dans la même fenêtre temporelle définie ici par $t_{TimeToFreeze}$), et SectorLimit = 1, ce qui signifie que nous ne codons que des événements simples (SE). Les autres événements par secteur seront classés multiples non codés (MEE). La durée est fixée à 5 µs (ACDuration = 50). 252
A.7.3 Point de fonctionnement nominal : PFM. 253

Annexes

A.1 Exemple d'utilisation des tables du NIST

Il existe des tables fournies par le NIST (The National Institute of Standards and Technology) qui permettent d'obtenir des courbes d'atténuation d'un matériau et dans une gamme d'énergie donnée. Par exemple, dans le cas de l'aluminium (matériau très présent dans nos systèmes de tests et dans les sous-systèmes du télescope), nous souhaitons connaître l'évolution de l'atténuation dans la gamme [1 keV - 1 MeV]. Pour ce faire, il faut donner le symbole de l'élément ou son nombre de protons (dans notre cas, soit *Al* soit *13*) ; ensuite il faut préciser l'hypothèse du(des) processus que l'on souhaite observer sur le graphe (ici, *Total Attenuation with Coherent Scattering* μ), et l'unité utilisée (cm^2/g).

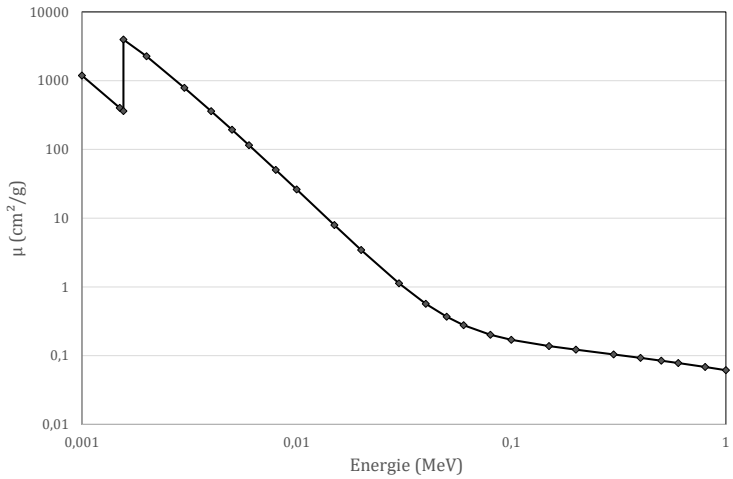


FIGURE A.1.1 – Courbe d'atténuation dans l'aluminium pour des photons d'énergies comprises entre 1 keV et 1 MeV, obtenue à partir du calculateur de NIST.

Une fois l'ensemble de ces configurations complétées, nous pouvons recueillir les données sous forme d'un tableau par exemple, et ainsi créer un graphe (Fig. A.1.1). De plus, nous trouverons le plus souvent le coefficient d'atténuation en unités (cm^2/g), donc pour obtenir sa valeur en unités (cm^{-1}), il suffira de multiplier le coefficient par la densité de matière étudiée ρ (en g/cm^3). Au final, l'atténuation pour un matériau d'épaisseur x (cm) sera donnée par la relation :

$$A = 1 - \exp(-\mu\rho x) \qquad \text{(ou encore la transmission par } T = \exp(-\mu\rho x))$$

A.2 Procédure de mise en route de la caméra d'ECLAIRs

Table A.2.1 – Procédure de mise à « ON » de la caméra d'ECLAIRs, avant toute acquisition spectrale.

1. Mise sous tension d'un module ELS : les tensions ±7,5V et +5V fournies par l'UGTS sont mises à « ON ».
2. Vérification des consommations au niveau UGTS de ces 3 tensions.
3. Envoi par l'UGTS d'un message sur le lien nominal pour vérifier la version du logiciel implanté dans l'EEPROM (mémoire morte) et dans la RAM (mémoire vive) du FPGA ELS.
4. Envoi par l'UGTS d'un message pour vérifier les tensions au niveau de l'ELS (+/-5VF$_{ELS}$, +/-5VA$_{ELS}$, +3V3N$_{ELS}$ et +5VF$_{ELS}$).
5. Vérification des températures au niveau des cartes de l'ELS (Temp$_{LV/HVPS}$, Temp$_{MUX/ADC}$ et Temp$_{PreProc}$).
6. Test du lien UART.
7. Mise sous tension des ASICs/XRDPIX d'un secteur : la tension +3V fournie par l'UGTS est mise à « ON ».
8. Vérification des consommations au niveau UGTS de cette tension +3V.
9. Comme précédemment, envoi par l'UGTS d'un message pour vérifier l'ensemble des tensions, y compris le +3V$_{ASIC}$ au niveau de l'ELS.
10. Envoi par l'UGTS de messages aux 25 ASICs pour appliquer les valeurs initiales puis les contrôle par une lecture : Vérification des paramètres initiaux des 25 ASICs : ICOMP = 0, SELFILTRE = 0, TEST$_{REG}$ = 0, RSM = 0, IO = 2.
11. Envoi par l'UGTS de messages spécifiques aux 25 ASICs/XRDPIX pour la vérification des seuils bas numériques initiaux (valeur par défaut = 62)
12. Envoi par l'UGTS de messages aux 25 modules sur le lien nominal pour la vérification des paramètres chargés dans les 25 ASICs : ICOMP, SELFILTRE, TEST$_{REG}$, RSM, IO.
13. Envoi par l'UGTS d'un message pour vérifier que tous les paramètres des 5 limites des 4 bandes d'énergie utilisées pour la détection par l'UGTS sont correctement chargés dans un ELS.
14. Envoi par l'UGTS de messages vérifiant que les seuils bas numériques sont correctement chargés dans les 25 XRDPIX.
15. Envoi par l'UGTS d'un message pour la vérification de tous les paramètres chargés dans un ELS : « Time2Freeze, AsicLimit, ACDuration, SectorLimit, et ActiveAsicList ».
16. Envoi par l'UGTS de messages pour la remise à 0 du compteur TFE, puis pour la vérification que l'UGTS reçoit des messages photons, et enfin que toutes les voies ont des comptages.
17. Lancement d'un test de « SlowControl », correspondant à la vérification du bon dialogue (écriture/lecture de registres de programmation) entre l'ELS et les XRDPIX.
18. Une fois la température nominale mission atteinte, et après avoir mis sous tension progressivement les sous-systèmes d'ECLAIRs, les tests peuvent s'effectuer en mettant à « ON » la haute tension.
19. Analyse des données : comptages et spectres en énergie de chaque voie détecteur.

A.3 Table des critères pris en compte pour le classement des XRDPIX

J'ai réalisé un classement des modules XRDPIX selon différents critères de performance qui sont décrits dans le tableau ci-après ; l'étude a suivi une stratégie de sélection « module par module », c'est à dire que j'ai analysé chaque XRDPIX de façon globale sur ses 32 voies, que j'ai ensuite comparé à l'analyse globale de chaque série. Ainsi, chaque module est étudié en fonction de la population générale (soit 1440 voies pour la série 1, et 5216 voies pour la série 2). Une fois les facteurs de pondération appliqués aux neuf critères, on obtient une note sur 5.

Ce classement a été défini en trois catégories : les plus mauvais, qui sont écartés de la caméra de vol, les meilleurs qui sont sélectionnés pour le DPIX FM, et un groupe intermédiaire, grâce auquel on se laisse le choix, ou pas, de les monter sur le plan de détection final.

Paramètres de performance	Critères de classement (hypothèse de distributions gaussiennes)	Note (si hors critère)	Note (si entre dans le critère)
FWHM à 14 keV	Moyenne 32 voies d'un même XRDPIX $\epsilon(\mu_{total-voies}$+/- $1\sigma)$?	0	0.3
FWHM à 60 keV	Moyenne 32 voies d'un même XRDPIX $\epsilon(\mu_{total-voies}$+/- $1\sigma)$?	0	0.3
Seuil bas en énergie (6σ)	Médiane SB 32 voies d'un même XRD-PIX < Médiane de la totalité des voies ?	0	0.5
Gain de calibration Canal-Energie	Moyenne 32 voies d'un même XRDPIX $\epsilon(\mu_{total-voies}$+/- $1\sigma)$?	0	0.3
Comptage sur [8 - 65] keV	Moyenne 32 voies d'un même XRDPIX $\epsilon(\mu_{total-voies}$+/- $1\sigma)$?	0	0.3
Nbre de voies > 1,6 keV (FWHM à 60 keV)	Nb < 1 (on n'accepte aucune voie mauvaise)	0	0.7
Nbre de voies > 4 keV (Seuil bas à 6σ)	Soit Nb < 2 (on accepte 1 voie mauvaise) Soit Nb < 4 (on accepte jusqu'à 3 voies mauvaises)	0	0.5 ou 1
Nbre de voies non traitées en seuil bas	Nb < 1 (on n'accepte aucune voie non traitée)	0	0.6
Technologie	Anomalie constatée lors des points clés (lors d'une inspection visuelle par ex.)	0	1

Table A.3.1 – Table des critères pris en compte pour le classement des XRDPIX

A.4 BIPM de ^{241}Am

BIPM.RI(II)-K1.Am-241, 2003 CCRI(II)-K2.Am-241, and 2006 COOMET.RI(II)-K2.Am.241

MEASURAND : **Equivalent activity of ^{241}Am**

Key comparison BIPM.RI(II)-K1.Am-241

x_i : **result of measurement carried out in the SIR for the sample submitted by laboratory *i***

u_i : **combined standard uncertainty of x_i**

Lab *i*	x_i / MBq	u_i / MBq	Date of measurement
NPL	2056.9	4.7	2002-10-01
VNIIM	2052.6	7.7	2006-08-03
POLATOM	2060.0	12.0	2009-01-28
MKEH	2038.0	4.3	2009-02-25
LNE-LNHB	2042.7	5.8	2011-05-05

Key comparison CCRI(II)-K2.Am-241

x_i : **result of measurement carried out at laboratory *i* linked to the SIR through the NPL mother solution**

u_i : **combined standard uncertainty of x_i**

Lab *i*	x_i / MBq	u_i / MBq	Year of measurement
BARC	2066.6	7.7	2003
BEV	2073	10	2003
BIPM	2060.0	4.8	2003
CIEMAT	2060.3	5.8	2003
CMI-IIR	2058.1	4.7	2003
CNEA	2049.5	6.0	2003
IFIN-HH	2080.1	8.1	2003
ININ	2061	50	2003
JRC	2058.8	3.3	2003
KRISS	2061.2	6.4	2003
LNMRI/IRD	2075.6	3.9	2003
NIST	2055.0	4.8	2003
NMIJ	2059.5	6.0	2003
NMISA	2066.1	3.6	2003
PTB	2055.2	4.8	2003
SMU	2078	25	2003

Key comparison COOMET.RI(II)-K2.Am-241

x_i : **result of measurement carried out at laboratory *i***
converted to the equivalent activity through the VNIIM

u_i : **combined standard uncertainty of x_i**

Lab *i*	x_i / MBq	u_i / MBq	Year of measurement
BelGIM	2060	24	2006-06-01
CENTIS-DMR	2043	13	2006-06-01

The BIPM key comparison database, November 2017

TABLE A.4.1 – Résultats BIPM du radionucléide ^{241}Am.

A.5 Combinaison des sélections pour la sélection XRDPIX finale

SELECTION	KL / S1	S2	S3	S4					
						OUT	0	E-02	ProtoEQM
XR3N044	OK		OK			OK	1	E-02	FM
XR3N045			POS			OUT	0	E-02	ProtoEQM
XR3N046			OK			OUT	0	E-02	ProtoEQM
XR3N047			NOK			OUT	0	E-02	ProtoEQM
XR3N048			OK			OUT	0	E-02	ProtoEQM
XR3N049			OK			OUT	0	E-02	ProtoEQM
XR3N050			OK			OUT	0	E-02	ProtoDPIX
XR101	POS	OK	OK	OK		OUT	0	F-01	ProtoEQM
XR102	OK	OK	OK	OK		OK	1	F-01	
XR103	OK	NOK	POS	NOK		OUT	0	F-01	ProtoEQM
XR105	OK	OK	OK	OK		OUT	0	F-01	ProtoEQM
XR106	OK	OK	OK	OK		OK	1	F-01	
XR107	POS	OK	OK	NOK		OUT	0	F-01	ProtoEQM
XR108	NOK	NOK	NOK	NOK		OUT	0	F-01	ProtoEQM
XR110	NOK	NOK	NOK	NOK		NOK	1	F-01	
XR114	OK	NOK	NOK	NOK		NOK	1	F-01	Vérif. JP 30
XR116	OK	OK	OK	OK		OK	1	F-01	
XR117	OK	OK	OK	OK		OK	1	F-01	
XR118	OK	OK	OK	OK		OK	1	F-01	
XR121	OK	OK	OK	OK		OK	1	F-01	
XR123	OK	OK	OK	OK		OK	1	F-01	
XR124	OK	OK	OK	OK		OK/REF	1	F-01	
XR125	OK	POS	OK	OK		OUT	0	F-01	ProtoEQM
XR127	OK	OK	OK	POS		OUT	0	F-02	ProtoEQM
XR128	OK	OK	OK	OK		OK	1	F-02	
XR129	NOK	NOK	NOK	NOK		OUT	0	F-02	ProtoEQM
XR131	OK	OK	OK	OK		OK	1	F-02	
XR133	NOK	POS	POS	POS		OUT	0	F-02	ProtoEQM
XR134	POS	POS	OK	NOK		POS	1	F-02	POS+ Vérif. JP 1-7-8
XR135	OK	POS	OK	OK		OK	1	F-02	
XR136	OK	OK	OK	OK		OK	1	F-02	
XR138	OK	OK	POS	OK		OK	1	F-02	
XR141	OK	OK	OK	OK		OK	1	F-02	
XR142	OK	OK	POS	OK		OK	1	F-02	
XR143	OK	OK	OK	OK		OK	1	F-02	
XR145	OK	OK	OK	OK		OK/REF	1	F-02	
XR146	OK	NOK	NOK	NOK		NOK	1	F-02	P16
XR148	OK	OK	OK	OK		OK	1	F-02	
XR150	OK	OK	OK	OK		OK	1	F-02	
XR151	OK	OK	OK	OK		OUT	0	F-03	ProtoEQM
XR152	POS	OK	OK	OK		OK	1	F-03	
XR153	OK	OK	OK	NOK		POS	1	F-03	POS+ Vérif. JP 23-27
XR154	OK	OK	OK	NOK		POS	1	F-03	POS- OG: norm/NOK À vérifier P0 -- JL:C01/00 --> très mauvaise en C01
XR155	OK	OK	OK	OK		OK	1	F-03	
XR156	OK	OK	OK	OK		OK	1	F-03	

TABLE A.5.1 – Extrait du tableau combinant les quatre sélections des différents traitements.

A.6 Liste des 25 modules XRDPIX à positionner sur la caméra de vol - ELS01

E01						
N° ELS	Sélection et position des XRDPIX pour le PFM	N° XRDPIX	CA	CD	Porte XRDPIX	Commentaires
E01	X00	XR203	N392	D203	PX-1	
E01	X01	XR252	N286	D252	PX-1	
E01	X02	XR206	N403	D206	PX-1	POS
E01	X03	XR254	N242	D254	PX-1	
E01	X04	XR207	N328	D207	PX-1	POS
E01	X05	XR256	N241	D256	PX-1	REF
E01	X06	XR257	N229	D257	PX-1	
E01	X07	XR258	N243	D258	PX-1	
E01	X08	XR259	N287	D259	PX-1	
E01	X09	XR209	N216	D209	PX-1	POS
E01	X10	XR211	N270	D211	PX-1	
E01	X11	XR212	N408	D212	PX-1	
E01	X12	XR263	N257	D263	PX-1	
E01	X13	XR264	N288	D264	PX-1	
E01	X14	XR265	N276	D265	PX-1	
E01	X15	XR266	N258	D266	PX-1	
E01	X16	XR267	N238	D267	PX-1	
E01	X17	XR268	N277	D268	PX-1	
E01	X18	XR214	N423	D214	PX-1	
E01	X19	XR215	N271	D215	PX-1	
E01	X20	XR271	N295	D271	PX-1	
E01	X21	XR218	N204	D218	PX-1	POS
E01	X22	XR219	N217	D219	PX-1	
E01	X23	XR220	N218	D220	PX-1	
E01	X24	XR225	N274	D225	PX-1	

vue +X -E01					
Rep.00	Col.05	Col.06	Col.07	Col.08	Col.09
Ligne 00	X00 N392	X01 N286	X02 N403	X03 N242	X04 N328
Ligne 01	X05 N241	X06 N229	X07 N243	X08 N287	X09 N216
Ligne 02	X10 N270	X11 N408	X12 N257	X13 N288	X14 N276
Ligne 03	X15 N258	X16 N238	X17 N277	X18 N423	X19 N271
Ligne 04	X20 N295	X21 N204	X22 N217	X23 N218	X24 N274

TABLE A.6.1 – Exemple de tableau donnant les modules XRDPIX à placer sur l'ELS01 de la caméra de vol et leur position.

A.7 Définition du point de fonctionnement

Tout au long du projet, nous avons défini un point de fonctionnement nominal du module XRDPIX, depuis son stade unitaire jusqu'à sa mise en place sur la caméra de vol PFM. Plusieurs configurations et paramètres ont donc été spécifiés puis programmés, suivant le type de modèle mis en œuvre :

— XRDPIX seul pour la campagne de recette,
— ProtoDPIX pour la campagne d'essais du prototype de caméra DPIX,
— PFM pour la validation du modèle de vol.

Le premier tableau montre les valeurs des paramètres du point de fonctionnement nominal d'un module XRDPIX que j'ai pu fixer grâce aux retours d'expérience des nombreux tests et analyses menés sur les modules XRDPIX à différents stades de leur développement.

Le dernier tableau est le résultat d'un compromis de cette expérience, et des contraintes techniques apparues au fur et à mesure de la sophistication et de l'intégration des différents sous-systèmes.

Paramètres environnement					
Paramètre	**Fonction**		**Nb de bits**	**Valeur nominale**	
$T_{détecteurs}$	Température détecteurs			**-20°C**	
F_{FPGA}	Fréquence fonctionnement FPGA			**10MHz**	
ASICLimit	Limite codage évènements ASIC			**0** (que des simples : SE)	
SectorLimit	Limite traitement déclenchements Secteur			**1** (à définir)	
HT	Haute Tension			**-300V**	
T_{Freeze}	TimeToFreeze		8	**36**	**T_{freeze}=3,6 µs**
Paramètres registres ASIC					
Registre	**Fonction**	**Adresse**	**Nb de bits**	**Valeur nominale**	
TEST		0			
ICOMP	Compensation I fuite détecteur	1	2	0	Icomp = 0 pA
SELFILTRE	Sélection du temps de filtrage	2	3	100b	Tp = 2,6 µs
SEUIL	Valeur du Seuil des 32 voies	3	32*6 = 192	010000b	Seuil = 16 (TBC)
TEST_REG	Registre de sélection de voies en test	4	32	0	Non autorisé
RSM	Reset Signe Mode	5	4	0001b	Délai = 36µs Signe – Lect. 32 voies Sortie Filtres
I0	Courant de polarisation du préampli	6	2	2	I0 = 200µA

Table A.7.1 – Paramètres du point de fonctionnement nominal d'un XRDPIX en fonctionnement unitaire.

— Température de fonctionnement au niveau des détecteurs ($T_{détecteurs}$)
— Fréquence de fonctionnement du $FPGA_{ELS}$ qui contrôle le module XRDPIX (F_{FPGA})

=> La fréquence de la STROBE de l'ASIC est F_{FPGA} /2

— Nombre maximum d'événements multiples codés au niveau d'un XRDPIX (ASICLimit)
— Nombre maximum de déclenchements multiples d'un XRDPIX au niveau d'un secteur (SectorLimit)
— Taille de la fenêtre d'anti-coïncidence pour les multiples par secteur (ACDuration)
— Paramètre $t_{TimeToFreeze}$ qui fixe la durée, gérée par F_{FPGA}, entre l'arrivée du signal trigger et le passage de l'ASIC en phase de lecture (gel de l'état interne de l'ASIC) : paramétrable (8 bits : 0...255) entre 0 et 25,5 µs et initialisé à (96) 9,6 µs au démarrage
— Haute tension (HT) qui polarise les détecteurs : programmable entre 0 et −450 V, avec AD9 et AD14 pour le choix de la configuration (HT, tp)

Paramètres environnement					
Paramètre	**Fonction**		**Nb de bits**	**Valeur nominale**	
$T_{détecteurs}$	Température détecteurs		N/A	**-20°C**	
F_{FPGA}	Fréquence fonctionnement FPGA		N/A	**10MHz**	
ASICLimit	Limite codage évènements ASIC		8 (1-32)	**2**	
SectorLimit	Limite traitement déclenchements Secteur		8 (1-25)	**1**	
ACDuration	Taille fenêtre d'Anti Coïncidence pour les multiples par secteur		8 (0-255)	**50**	**5 µs**
HT	Haute Tension		8 (0-255)	**153**	**-300V**
T_{Freeze}	TimeToFreeze		8 (0-255)	**36**	**3,6 µs**
Paramètres registres ASIC					
Registre	**Fonction**	**Adresse**	**Nb de bits**	**Valeur nominale**	
TEST		0			
ICOMP	Compensation I fuite détecteur	1	2	0	0 pA
SELFILTRE	Sélection du temps de filtrage	2	3	100b	2,6 µs
SEUIL	Valeur du Seuil des 32 voies	3	32*6 = 192	010000b	30 puis 8 puis 16 ou 12 (TBC)
TEST_REG	Registre de sélection de voies en test	4	32	0	Non autorisé
RSM	Reset Signe Mode	5	4	0001b	1 ⇔ 36µs Signe – Lect. 32 voies Sortie Filtres
I0	Courant de polarisation du préampli	6	2	2	200µA

Table A.7.2 – Point de fonctionnement nominal : ProtoDPIX. Ici, nous codons au plus deux événements multiples MEC (ASICLimit = 2, soit deux voies au maximum qui déclenchent dans la même fenêtre temporelle définie ici par $t_{TimeToFreeze}$), et SectorLimit = 1, ce qui signifie que nous ne codons que des événements simples (SE). Les autres événements par secteur seront classés multiples non codés (MEE). La durée est fixée à 5 µs (ACDuration = 50).

Paramètres environnement					
Paramètre	**Fonction**		**Nb de bits**	**Valeur nominale**	
$T_{détecteurs}$	Température détecteurs		N/A	**-20°C**	
F_{FPGA}	Fréquence fonctionnement FPGA		N/A	**10MHz**	
ASICLimit	Limite codage évènements ASIC		8 (1-32)	**2**	
SectorLimit	Limite traitement déclenchements Secteur		8 (1-25)	**2**	
ACDuration	Taille fenêtre d'Anti Coïncidence pour les multiples par secteur		8 (0-255)	**10**	**1 µs**
HT	Haute Tension		8 (0-255)	**153**	**-300V**
T_{Freeze}	TimeToFreeze		8 (0-255)	**36**	**3,6 µs**
$G_{pixels_bruyants}$	Gestion des pixels bruyants par l'UGTS		8 (0-255)	**25**	**25 cps/s**

Paramètres registres ASIC					
Registre	**Fonction**	**Adresse**	**Nb de bits**	**Valeur nominale**	
TEST		0			
ICOMP	Compensation I fuite détecteur	1	2	0	0 pA
SELFILTRE	Sélection du temps de filtrage (TimeToPeak)	2	3	100b	2,6 µs
SEUIL	Valeur du Seuil des 32 voies	3	32*6 = 192	XXXXXXb	(TBC)*
TEST_REG	Registre de sélection de voies en test	4	32	0	Non autorisé
RSM	Reset Signe Mode	5	4	0001b	1 ⇔ 36µs Signe – Lect. 32 voies Sortie Filtres
I0	Courant de polarisation du préampli	6	2	2	200µA

* Pour certains tests, les seuils seront individualisés sur le PFM_DPIX et seront chargés via une table (Table SBN) lors de la configuration de l'instrument.

Table A.7.3 – Point de fonctionnement nominal : PFM.

A.8 Consommation des modules XRDPIX

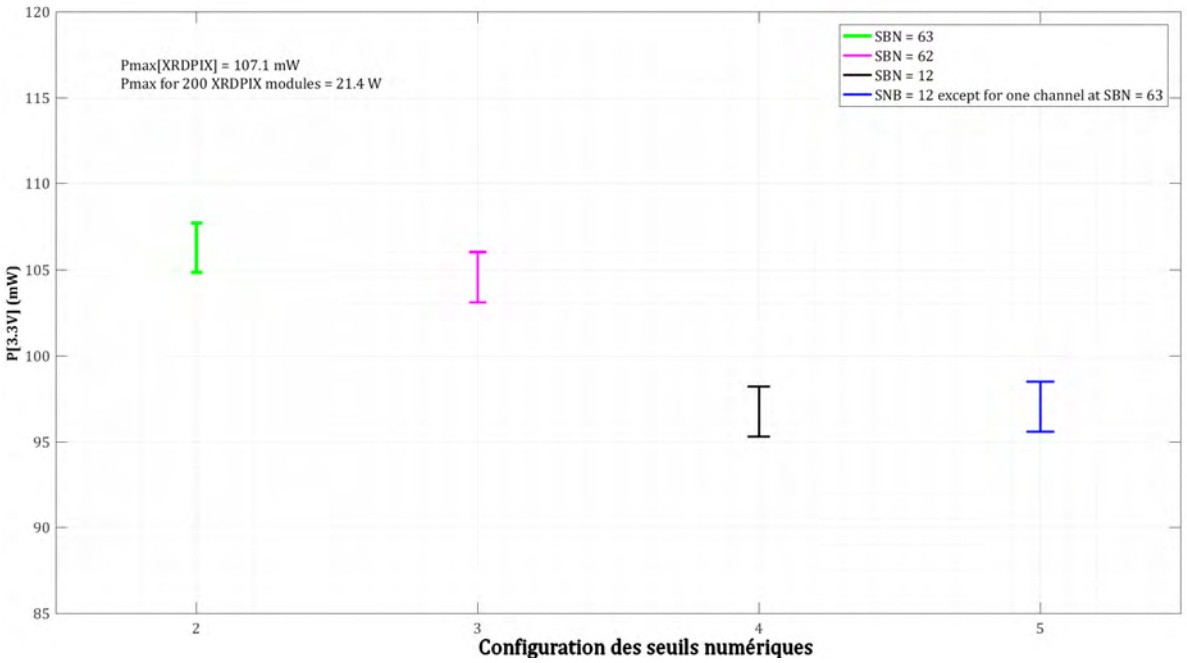


FIGURE A.8.1 – Puissance moyenne de 45 modules XRDPIX de la série 1 en fonction des seuils numériques préalablement réglés. Quatre cas : '63' en vert, soit la caméra entière désactivée, '62' en magenta, soit la caméra au seuil maximal programmable ($\approx$ 17 keV), '12' en noir, soit la caméra au seuil minimal à programmer pour faire disparaître le pic de bruit d'un pixel normal, et en bleu, un cas particulier où 200 pixels de la caméra sur 6400 seraient désactivés.

Bibliographie

Agrawal, P. C. 2004, Progress of Theoretical Physics Supplement, 155, 305

Amati, L., O'Brien, P., Goetz, D., Tenzer, C., & Bozzo, E. 2017, in The X-ray Universe 2017, 250

Amoros, C., Houret, B., Lacombe, K., et al. 2018, in Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series, Vol. 10699, 106995K

Antier, S., Schanne, S., Cordier, B., et al. 2014, in Proceedings of Swift : 10 Years of Discovery (SWIFT 10, 59

Bajat, A., Godet, O., Atteia, J. L., et al. 2018, Experimental Astronomy, 60

Barraud, C., Atteia, J. L., Olive, J. F., et al. 2003, in American Institute of Physics Conference Series, Vol. 662, Gamma-Ray Burst and Afterglow Astronomy 2001 : A Workshop Celebrating the First Year of the HETE Mission, ed. G. R. Ricker & R. K. Vanderspek, 59–62

Barthelmy, S. D., Barbier, L. M., Cummings, J. R., et al. 2005, SSR, 120, 143

Bernardini, M. G., Piron, F., Atteia, J. L., et al. 2016, in Eighth Huntsville Gamma-Ray Burst Symposium, Vol. 1962, 4042

Bhalerao, V., Bhattacharya, D., Vibhute, A., et al. 2017, Journal of Astrophysics and Astronomy, 38, 31

Boella, G., Butler, R. C., Perola, G. C., et al. 1997, AAPS, 122, 299

Campana, R., Fuschino, F., Labanti, C., et al. 2018, ArXiv e-prints, arXiv :1802.01674

Campana, S., Mangano, V., Blustin, A. J., et al. 2006, NAT, 442, 1008

Cordier, B., Wei, J., Atteia, J. L., et al. 2015, arXiv e-prints, arXiv :1512.03323

Costa, E., Frontera, F., Heise, J., et al. 1997, NAT, 387, 783

Delagnes, E., Gevin, O., Huynh, D., Fontignie, J., & Fesquet, M. 2010, Datasheet Puce IDefX ECLAIR$_A n$

Diehl, R., Iyudin, A., Oberlack, U., et al. 1997, Nucl. Phys. A, 621, 79

Fishman, G. J. 2013, in EAS Publications Series, Vol. 61, EAS Publications Series, ed. A. J. Castro-Tirado, J. Gorosabel, & I. H. Park, 5–14

Fox, D. B., Frail, D. A., Price, P. A., et al. 2005, Nature, 437, 845

Frail, D. A., Kulkarni, S. R., Sari, R., et al. 2001, ApJ, 562, L55

Funaki, M., Ando, Y., Jinnai, R., Tachibana, A., & Ohno, R. 2007

Fuschino, F., Campana, R., Labanti, C., et al. 2018, arXiv e-prints, arXiv :1812.02432

Gehrels, N., Chincarini, G., Giommi, P., et al. 2004, ApJ, 611, 1005

Gevin, O., Baron, P., Coppolani, X., et al. 2009, IEEE Transactions on Nuclear Science, 56, 2351

Gevin, O., Lemaire, O., Lugiez, F., et al. 2012, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 695, 415

Godet, O., Nasser, G., Atteia, J.-L., et al. 2014, in PROCSPIE, Vol. 9144, Space Telescopes and Instrumentation 2014 : Ultraviolet to Gamma Ray, 914424

Godet, O., Sizun, P., Barret, D., et al. 2009, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 603, 365

Götz, D. & SVOM Collaboration. 2012, Memorie della Societa Astronomica Italiana Supplementi, 21, 162

Gros, A. 2017, in AGU Fall Meeting Abstracts, Vol. 2017, IN51H–07

Hernanz, M., Brandt, S., Feroci, M., et al. 2018, ArXiv e-prints, arXiv :1807.09330

Horváth, I., Tóth, B. G., Hakkila, J., et al. 2018, Ap&SS, 363, 53

Ishikawa, S.-n., Watanabe, S., Fukuyama, T., et al. 2010, Japanese Journal of Applied Physics, 49, 116702

Katsuragawa, M., Tampo, M., Hamada, K., et al. 2018, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 912, 140, new Developments In Photodetection 2017

Klebesadel, R. W., Strong, I. B., & Olson, R. A. 1973, APJL, 182, L85

Knoll, G. 1989, Radiation detection and measurement (Wiley)

Kouveliotou, C., Meegan, C. A., Fishman, G. J., et al. 1993, APJL, 413, L101

Lacombe, K. 2016, Procedure de test : Recette XRDPIX Serie

Lacombe, K., Amoros, C., Atteia, J.-L., et al. 2019, Experimental Astronomy, 47, 245

Lacombe, K., Dezalay, J. P., Houret, B., et al. 2016a, in Space Telescopes and Instrumentation 2016 : Ultraviolet to Gamma Ray, Vol. 9905, 99050J

Lacombe, K., Dezalay, J. P., Houret, B., et al. 2018, Astroparticle Physics, 103, 131

Lacombe, K., Knödlseder, J., Delaigue, S., et al. 2016b, Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series, Vol. 9968, Silicon photomultipliers detectors for next generation high-energy space telescopes, 99681F

Lacombe, K., Knödlseder, J., Houret, B., et al. 2018, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A : Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 912, 144 , new Developments In Photodetection 2017

Lacombe, K., Nasser, G., Amoros, C., et al. 2013, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 732, 122

Lebrun, F., Leray, J. P., Lavocat, P., et al. 2003, AAP, 411, L141

Lepy, M., Plagnard, J., & Ferreux, L. 2008, ARI, 66, L715

Liang, E., Zhang, B., Virgili, F., & Dai, Z. G. 2007, ApJ, 662, 1111

MacFadyen, A. I., Ramirez-Ruiz, E., & Zhang, W. 2006, in American Institute of Physics Conference Series, Vol. 836, Gamma-Ray Bursts in the Swift Era, ed. S. S. Holt, N. Gehrels, & J. A. Nousek, 48–53

Mandrou, P., Schanne, S., Cordier, B., et al. 2008, in American Institute of Physics Conference Series, Vol. 1065, 2008 Nanjing Gamma-ray Burst Conference, ed. Y.-F. Huang, Z.-G. Dai, & B. Zhang, 338–341

Mate, S., Bouchet, L., Atteia, J.-L., et al. 2019, Experimental Astronomy, 48, 171

Paciesas, W. S., Meegan, C. A., Pendleton, G. N., et al. 1999, APJS, 122, 465

Pian, E., Mazzali, P. A., Masetti, N., et al. 2006, NAT, 442, 1011

Sakamoto, T. 2005, Astronomical Herald, 98, 507

Schanne, S., Le Provost, H., Kestener, P., et al. 2014, arXiv e-prints, arXiv :1411.7810

Singh, K. P., Tandon, S. N., Agrawal, P. C., et al. 2014, in Space Telescopes and Instrumentation 2014 : Ultraviolet to Gamma Ray, Vol. 9144, 91441S

Soderberg, A. M., Kulkarni, S. R., Nakar, E., et al. 2006, NAT, 442, 1014

Stratta, G., Ciolfi, R., Amati, L., et al. 2018, Advances in Space Research, 62, 662

Takahashi, T. & Watanabe, S. 2001, IEEE Transactions on Nuclear Science, 48, 950

Takeda, S., Ichinohe, Y., Hagino, K., et al. 2012, Physics Procedia, 37, 859 , proceedings of the 2nd International Conference on Technology and Instrumentation in Particle Physics (TIPP 2011)

Triou, H. E., Sauvageon, A., Guillemot, P., et al. 2018, in 42nd COSPAR Scientific Assembly, Vol. 42, E1.17–36–18

Vadawale, S. V., Rao, A. R., Bhattacharya, D., et al. 2016, in Proc. SPIE, Vol. 9905, Space Telescopes and Instrumentation 2016 : Ultraviolet to Gamma Ray, 99051G

Vedrenne, G. & Atteia, J.-L. 2009, Gamma-Ray Bursts : The brightest explosions in the Universe (Springer-Verlag Berlin Heidelberg)

Wei, J., Cordier, B., & al. 2016, The Deep and Transient Universe in the SVOM Era : New Challenges and Opportunities - Scientific prospects of the SVOM mission, arXiv :1610.06892v1 [astro-ph.IM]

Willingale, R., O'Brien, P. T., Osborne, J. P., et al. 2007, ApJ, 662, 1093

Winkler, C., Courvoisier, T. J.-L., Di Cocco, G., et al. 2003, AAP, 411, L1

Woosley, S. E., Langer, N., & Weaver, T. A. 1993, ApJ, 411, 823

Woosley, S. E., MacFadyen, A. I., & Heger, A. 1999, arXiv e-prints, astro

Zhang, S. N., Feroci, M., Santangelo, A., et al. 2016, in Proc. SPIE, Vol. 9905, Space Telescopes and Instrumentation 2016 : Ultraviolet to Gamma Ray, 99051Q