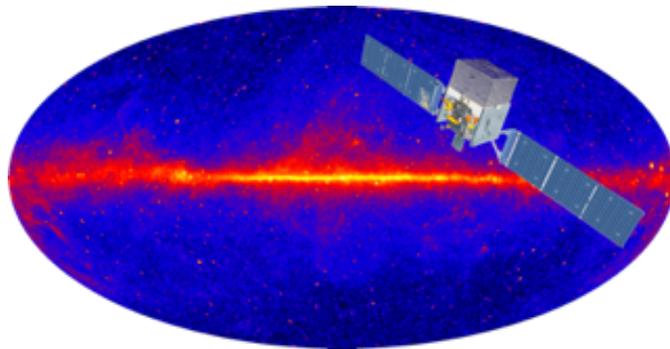


Document Fermi-LAT pour le Conseil Scientifique de l'IN2P3 du 30/06/2020

Ce document a été préparé par les chercheur.e.s permanents de l'IN2P3 travaillant actuellement sur Fermi-LAT.
CENBG : Denis Dumora, Marie-Hélène Grondin, Marianne Lemoine-Goumard, Benoît Lott, Thierry Reposeur, David Smith
LLR : Denis Bernard, Philippe Bruel, Stephen Fegan, Deirdre Horan
LUPM : Johann Cohen-Tanugi, Eric Nuss, Frédéric Piron, Mathieu Renaud



1. Introduction

Le télescope spatial d'astronomie gamma Fermi¹ est en fonctionnement depuis juin 2008. C'est une mission NASA de taille moyenne (<1 Mrd\$) en orbite basse. Il comprend deux instruments : le *Gamma-ray Burst Monitor* (GBM) et le *Large Area Telescope* (LAT). Le GBM couvre la gamme en énergie de 8 keV à 40 MeV. Le LAT, dans lequel l'IN2P3 est impliqué, est l'instrument principal de Fermi et couvre tout le ciel de 30 MeV à 1 TeV. Ses données sont publiques, ainsi que les outils pour les analyser.

La science du LAT couvre quasiment toute l'astronomie gamma : les sources galactiques (pulsars, vestiges de supernovae, nébuleuses de pulsars,...), les sources extragalactiques (noyaux actifs de galaxie, sursauts gamma), l'émission diffuse (galactique et extragalactique), la recherche de matière noire, ainsi que les sources dans le système solaire (soleil, lune). D'une façon générale, le but du LAT est de réaliser la cartographie du ciel gamma la plus complète possible et de caractériser les sources et leur émission afin de comprendre les mécanismes physiques sous-jacents. Cette compréhension nécessite très souvent une couverture multi-longueurs d'onde allant de la radio jusqu'au TeV. De plus, une grande fraction des sources gamma étant variables, il faut pouvoir surveiller l'activité du ciel en permanence. À travers ces deux aspects, Fermi a augmenté fortement les connexions et la réciprocité entre l'astronomie gamma et les autres domaines de l'astrophysique.

¹ <https://fermi.gsfc.nasa.gov/ssc/>

Initialement, la durée de la mission Fermi était de cinq ans garantis suivis d'une phase étendue de cinq ans. N'ayant pas de consommables, le LAT peut en réalité fonctionner bien plus longtemps. Le seul problème technique qu'a rencontré le satellite depuis le lancement a été en mars 2018 la panne d'un des deux panneaux solaires qu'il n'est plus possible de tourner autour de son axe. Il a été trouvé un nouveau mode d'observation qui garantit une couverture complète du ciel mais ne permet plus les pointés automatiques.

Comme pour toute autre mission de la NASA, depuis que la mission Fermi est entrée dans la phase étendue, elle est auditionnée par la *Senior Review* régulièrement (tous les deux ans initialement, tous les trois ans depuis 2016) afin d'aider la NASA dans sa décision de prolonger ou non la mission. La décision du prolongement de Fermi a été prise en 2014, 2016, et 2019. La mission a été invitée à participer à la prochaine revue (2022), ce qui implique que la NASA envisage officiellement que Fermi puisse continuer à prendre des données jusqu'en 2025. Il n'y a actuellement aucun instrument équivalent en fonctionnement, ni en préparation.

La participation de l'IN2P3 au projet GLAST (*Gamma-ray Large Area Space Telescope*, nom initial de Fermi) débute en 1994, sous l'impulsion d'Eric Paré et de Patrick Fleury, en même temps que la participation du CEA. Un partenariat français (IN2P3-CEA) se fait avec le financement du CNES qui encadre les activités et supervise l'avancement du projet. La contribution technique de l'IN2P3 (LLR, PCC-Collège de France) se concentre sur le calorimètre. Suite à une réorganisation des tâches entre IN2P3 et CEA imposée par le CNES, il est décidé fin 2001 que le CEA devienne responsable d'une partie initialement prise en charge par le PCC, ce qui entraîne le départ de ce dernier.

En 2003, afin d'assainir la situation financière du CNES, son président décide le gel ou l'arrêt de nombreux programmes, dont GLAST. L'arrêt du financement du CNES remet très fortement en cause la participation de l'IN2P3 au projet. Grâce, entre autres, à l'action d'Henri Videau et au soutien de la direction de l'IN2P3, il est finalement décidé que le LLR prenne la responsabilité de produire les structures de vol du calorimètre et l'IN2P3 reste dans le projet. Les équipes de l'IN2P3 ont été renforcées en 2004/2005, à la fermeture du site de Thémis, par les chercheurs des expériences CAT et CELESTE. Trois laboratoires de l'IN2P3 sont actuellement impliqués : CENBG, LLR, LUPM. Cela représente une vingtaine de personnes (dont 15 permanents), avec un total d'environ 10 ETP.

Ce document fait le point sur l'expérience spatiale que constitue Fermi pour l'IN2P3. La seconde partie présente la collaboration LAT dans laquelle s'inscrit la participation des équipes de l'IN2P3. L'instrument et les activités associées sont décrites dans la troisième partie, suivie par une partie présentant nos contributions à l'exploitation des données scientifiques. Après un historique succinct, depuis le lancement, du nombre de chercheurs de l'IN2P3 dans Fermi ainsi que du financement, la dernière partie propose un bilan.

2. La collaboration LAT

2.a Fonctionnement

La collaboration a pris son essor en 1998 après la sélection par la NASA et la DOE du projet GLAST de P. Michelson (Principal Investigator, Stanford University) et W. Atwood (SLAC) concernant la réalisation d'un télescope spatial couvrant le domaine d'énergie de 30 MeV à 300 GeV. Avec les Etats-Unis, les autres pays ayant participé à la construction sont l'Italie, la France, le Japon et la Suède. La collaboration compte aujourd'hui 151 membres, qui sont tous chercheurs permanents (*full members*). La grande majorité appartient aux pays fondateurs et sont issus des communautés de physique des particules et d'astrophysique des hautes énergies. Ces membres ont tous montré une forte implication à différents stades du projet mais plus de 50% n'ont plus de participation active (tout en conservant leurs droits à signer certains articles). Une autre catégorie de chercheurs concerne les membres affiliés (*affiliated members*), qui ne peuvent signer que les articles auxquels ils ont contribué. Ces membres peuvent participer à toutes les réunions et ont accès à toutes les informations internes. D'une façon générale, les étudiants et post-doctorants jouissent des mêmes droits de signature que leurs encadrants.

Un "comité des sages" (*Senior Science Advisory Committee*) conseille le PI sur les décisions concernant la collaboration, en particulier la politique de publication et les candidatures de nouveaux membres. Les contributions au coût de fonctionnement de la collaboration (*common funds*, incluant informatique, publications, tâches de support) sont discutées par un comité incluant les pays fondateurs (*International Finance Committee*).

La collaboration du LAT est articulée en huit groupes de travail. Le groupe *Calibration & Analysis* a la responsabilité de la calibration de l'instrument, l'analyse des données de bas niveau (reconstruction, rejet du bruit de fond), ainsi que de la production des fonctions de réponse et des outils d'analyse des données de haut niveau. Les autres groupes de travail se répartissent suivant les différentes thématiques scientifiques (catalogue, émission diffuse, matière noire et nouvelle physique, sources galactiques, noyaux actifs de galaxie, système solaire, sursauts gamma - ce dernier étant commun avec la collaboration GBM). La coordination de chaque groupe est assurée par deux coordinateurs, avec des rotations tous les un ou deux ans (exceptionnellement quatre ans). Ces groupes de travail se réunissent via zoom toutes les une-deux semaines ou en présentiel lors des deux réunions de collaboration annuelles et échangent sur un espace virtuel commun (confluence). Afin de coordonner l'ensemble de l'activité de la collaboration, un coordinateur de l'analyse et un coordinateur adjoint sont nommés pour 12 mois.

Différentes classes de publications existent dans la collaboration. Les publications de Catégorie 1 présentent des résultats ou des découvertes majeurs. L'ensemble des membres sont éligibles à leur signature. L'ordre des auteurs est alphabétique, les auteurs principaux étant dits "auteurs de contact" (5 maximum). Les publications de catégorie 2 concernent les autres résultats

impliquant une analyse des données du LAT. Leur signature est limitée aux seuls contributeurs réels et l'ordre des auteurs est libre. Les publications de catégorie 3 concernent des travaux sans analyse originale des données du LAT, par exemple des interprétations de résultats déjà publiés. Une nouvelle catégorie (Catégorie 2.5) vient d'être introduite et concerne des publications (qui auraient été précédemment de catégorie 2) menés par des collaborateurs extérieurs, pour lesquels le processus de revue interne est allégé. Le choix de la catégorie d'une publication est laissé à l'appréciation des coordinateurs du groupe de travail dont cette publication est issu.

En mars 2020, le bilan des publications de la collaboration était de 215 articles de Catégorie 1 et 377 articles de Catégorie 2. Depuis 2009, le taux est stable autour de 60 articles/an.

Aujourd'hui, les tâches de support assurées par la Collaboration sont minimales, avec un quota de *shifts* hebdomadaires de monitoring des données brutes attribué annuellement aux différents pays. D'autre part, le ciel est surveillé continûment par des observateurs de la collaboration pour produire des alertes sur des éruptions de blazars (*Flare Advocate*) ou des sursauts gamma / sources d'ondes gravitationnelles (*Burst Advocate*) via *Astronomer's Telegrams (ATels)*² ou circulaires GCN.

Après 12 ans d'opérations et le retrait partiel du soutien de la DOE, l'activité de l'équipe du SLAC, siège historique de la collaboration, a graduellement été réorientée vers d'autres projets, en particulier le Vera C. Rubin Observatory (précédemment LSST). D'autres membres historiques se tournent vers la préparation de CTA ou SVOM. Malgré cela, le taux de publication ne fléchit pas. Un noyau dur compte travailler sur l'exploitation scientifique jusqu'à la fin de la prise de données et au-delà. Les travaux concernant l'héritage (*legacy*) sont déjà activement discutés.

2.b Interaction avec la NASA

La convention entre la mission et la collaboration LAT stipule que cette dernière est responsable de la production des données et du développement des outils permettant de les analyser, ainsi que de tous les autres éléments nécessaires à cette analyse. Cela comprend :

- Les fonctions de réponse de l'instrument (IRFs) décrivant la surface effective de détection, la fonction d'étalement du point (résolution angulaire) et la fonction de redistribution en énergie (résolution en énergie), ainsi que les erreurs systématiques associées ;
- Le modèle d'émission diffuse galactique et une description d'une composante isotrope (correspondant à la somme de l'émission diffuse extragalactique et du bruit de fond dû au rayons cosmiques chargés) ;
- Le catalogue général de sources ;
- La documentation (hébergée sur le site internet du *Fermi Science Support Center*³ de la NASA).

² <http://www.astronomerstelegam.org/>

³ <https://fermi.gsfc.nasa.gov/ssc/>

Il est essentiel de souligner que, dès le début de la conception de la mission, la NASA a imposé que les données soient rendues publiques immédiatement, sauf la première année pendant laquelle la collaboration en avait l'exclusivité (ces données ont été rendues publiques dès la fin de la première année).

Cette obligation de rendre les données publiques s'applique aussi à toutes les améliorations que la collaboration a apportées aux données et aux outils d'analyse. L'accord tacite entre la NASA et la collaboration est que ces améliorations doivent devenir publiques dès qu'elles sont utilisées dans une publication signée par des membres de la collaboration.

La NASA a mis en place un comité d'utilisateurs des données de Fermi (*Fermi Users' Group*). Ce comité, qui se réunit environ deux fois par an, a pour mission de faire remonter à la NASA les impressions et les requêtes des utilisateurs externes à la collaboration. Des membres de la collaboration sont régulièrement invités à présenter à ce comité certains aspects concernant les données et leur utilisation. En ce qui concerne la *Senior Review*, la collaboration participe activement à la préparation de l'audition (document+présentation).

L'équipe du LAT de la NASA organise régulièrement des écoles d'été dédiées à l'analyse des données de Fermi et ouvertes à l'ensemble de la communauté. Plusieurs membres de l'IN2P3 ont été invités à y donner des cours.

3. L'instrument et les activités associées

3.a Description de l'instrument

Le LAT⁴ est le successeur de l'instrument EGRET, embarqué sur le *Compton Gamma Ray Observatory* (CGRO), qui a fonctionné entre 1991 et 2000. Grâce à de nombreuses améliorations (en particulier l'utilisation de détecteurs en silicium à micro-pistes, SSD), le LAT a permis de gagner un facteur ~20 en sensibilité par rapport à EGRET.

Avec une gamme en énergie de ~30 MeV à plus de 300 GeV, le LAT détecte les photons gamma par conversion de paires. Il est constitué d'une matrice de 4x4 tours identiques, chacune comprenant un module trajectographe (TKR) et un module calorimètre (CAL). L'ensemble des 16 tours est entouré par un détecteur d'anticoïncidence (ACD). Les modules du TKR sont constitués de 18 couches (x,y) de SSD et de couches de convertisseurs en tungstène intercalées. Chaque module du CAL comprend 8 couches de 12 cristaux de CsI lus par des photodiodes, la direction (x ou y) des cristaux alternant d'une couche à l'autre. Le TKR permet la conversion des photons gamma et la mesure de leur direction alors que le CAL mesure leur énergie. Le rejet du bruit de fond cosmique (protons, ions et électrons) est fait au premier ordre par l'ACD mais le TKR et le CAL permettent de l'améliorer.

Les performances⁵ du LAT sont conformes à celles attendues. La résolution angulaire est d'environ 5° à 100 MeV et diminue avec l'énergie jusqu'à atteindre une valeur constante de 0.1°

⁴ <https://arxiv.org/abs/0902.1089>

⁵ https://www.slac.stanford.edu/exp/glast/groups/canda/lat_Performance.htm

à 10 GeV. La surface effective est d'environ 0.35 m^2 à 100 MeV et augmente avec l'énergie pour atteindre un plateau autour de $\sim 1 \text{ m}^2$ à 1 GeV. Le champ de vue effectif est de 2.4 sr, c'est-à-dire 20% du ciel. Fermi vole à une altitude d'environ 530 km avec une période de 95 min. Le mode d'observation prédominant de Fermi est de changer d'hémisphère à chaque période, ce qui permet de couvrir tout le ciel en 3 h, chaque direction étant vue pendant environ 30 min. Ces caractéristiques font de Fermi un excellent instrument pour surveiller l'activité du ciel gamma. A ce jour, le LAT a déclenché sur 710 milliards d'événements, dont 142 milliards ont été transférés sur terre et 3.46 milliards ont été sélectionnés comme photons et sont disponibles sur le serveur de données de la NASA.

Certaines différences entre Fermi et EGRET ont une importance fondamentale : pas de consommable (la durée de vie d'EGRET était limitée par la dégradation du gaz de la chambre à étincelle), segmentation de l'ACD (le dôme anti-coïncidence d'EGRET était d'une seule pièce et rejetait les photons de plus de 10 GeV à cause du *backsplash* dans le calorimètre), rapport largeur/hauteur plus grand (le système de temps de vol d'EGRET imposait un rapport de forme plus petit et donc un champ de vue plus petit), un système de lecture très rapide (le temps mort d'EGRET de $\sim 0.1 \text{ s}$ ne permettait pas une bonne mesure des sources très rapidement variables comme les GRBs). Il n'existe pas de récente avancée technologique qui permettrait de gagner un facteur important par rapport à la sensibilité de Fermi dans sa gamme en énergie. A l'heure actuelle, aucun successeur à Fermi n'est en préparation.

3.b Conception et construction de l'instrument

Les équipes de l'IN2P3 ont contribué à la conception et à la construction du calorimètre, détecteur dont était responsable le *Naval Research Laboratory* (NRL, Washington). Le travail s'est porté sur la structure du calorimètre, l'enrobage des cristaux, le dimensionnement et le collage des photodiodes (LLR, PCC). Après le retrait du CNES en 2003, la contribution de l'IN2P3 s'est limitée à la construction de la structure, prise en charge par le LLR (O. Ferreira). Il est important de noter que les solutions techniques qui ont été retenues pour l'enrobage des cristaux (G. Bogaert, LLR) et le collage des photodiodes (A. Djannati-Atai, P. Charon, PCC) ont été développées à l'IN2P3 (une discussion avec une entreprise avait d'ailleurs commencé en vue de la sous-traitance du collage).

Le choix de travailler sur la structure du calorimètre provient de l'expérience acquise par le groupe mécanique du LLR lors d'un travail précédent de conception d'une structure en fibre de carbone pour le calorimètre de CMS. Les premiers prototypes pour GLAST ont été produits en étuve avec compression mécanique. Il est apparu que des bulles d'air pouvaient être piégées entre les couches de composites pendant la cuisson, ce qui pouvait affecter la qualité des structures. Il a donc été choisi d'acquérir un autoclave, ce qui permettait de faire varier la température et la pression de façon optimale, tout en évacuant les bulles d'air grâce à des poches à vide. Ce choix a permis d'améliorer la polymérisation et d'obtenir au final une

meilleure performance mécanique. Il est à noter qu'une salle blanche a été construite pour cette production.

Le LLR a produit et livré 24 structures au NRL. La production s'est effectuée à un rythme d'environ deux structures par mois et s'est terminée en 2004. Avant d'être livrée, chaque structure passait un test de métrologie au LLR puis un test de vibration (avec cristaux factices) qui était sous-traité. En plus des structures, le LLR a également développé et transféré au NRL les méthodes et outillages pour le montage des cristaux.

Le travail de conception du calorimètre et la production des structures a impliqué d'adopter une approche système et un suivi qualité, ce qui n'était pas courant à l'époque à l'IN2P3. Le PCC a recruté un ingénieur système et le LLR a recruté une ingénieure qualité. L'approche qualité a été reconnue comme indispensable et bénéfique pour le bon déroulement de cette production. Il est à noter que, d'une façon générale, l'IN2P3 a bénéficié d'un soutien complet et bienveillant de la part de l'équipe du NRL. Au début de l'engagement de l'IN2P3 dans GLAST, il était plus ou moins tacitement convenu que le CEA jouerait le rôle de garant spatial pour les activités de construction à l'IN2P3. C'est finalement le NRL qui a joué ce rôle et les équipes IN2P3 en ont profité pleinement.

3.c Activités associées

3.c.1. Test sous faisceaux - Calibration

Dès le début de leur engagement dans GLAST, les équipes de l'IN2P3 (LLR, PCC) ont effectué ou participé à des tests sous faisceau (SLAC, CERN) qui ont permis de finaliser le design de l'instrument et de valider les solutions techniques.

D'autres tests sous faisceau ont suivi, portant sur la calibration de l'instrument. L'intérêt de tels tests était d'autant plus important que la calibration du LAT au sol ne se ferait qu'avec des muons atmosphériques, dans une gamme d'énergie déposée très inférieure à celle explorée en mode opérationnel. Le NRL, responsable de la calibration du calorimètre, pensait initialement utiliser le dépôt d'énergie des ions lourds du rayonnement cosmique pour réaliser cette calibration. Les ions étant au minimum d'ionisation, le dépôt d'énergie présente des pics caractéristiques des différents éléments. A basse énergie, la réponse des cristaux de CsI aux ions lourds est connue pour être non-linéaire ("*quenching*"), mais cette réponse était indéterminée dans le domaine relativiste. Une série d'expériences au GANIL et GSI sous la responsabilité du CENBG, impliquant également des collègues physiciens nucléaires, ont permis de mesurer cette réponse en fonction de l'énergie des ions. Elles ont mis en évidence un phénomène inattendu, où la quantité de lumière produite par MeV déposé est supérieure pour des ions légers (α , C, O) à celle produite pour des protons (phénomène baptisé

“*anti-quenching*”). En orbite, la position des pics d'énergie déposée reflète bien cet effet, qui aurait semé le trouble sur la calibration sans la connaissance acquise par ces expériences.

Développé au LUPM, l'algorithme qui sélectionne les ions sans interaction nucléaire dans le calorimètre et identifie les cristaux touchés, est donc utilisé depuis le lancement non pas pour la calibration absolue de la mesure d'énergie, mais pour l'inter-calibration de la réponse aux deux extrémités de chaque cristal entrant dans cette mesure. Il permet également de suivre la lente dégradation (-0.5% / an en moyenne) du rendement lumineux des cristaux sur toute leur dynamique, causée par leur irradiation prolongée en orbite. Le pic du carbone, le plus intense et d'une largeur relative de 5% seulement, permet notamment de détecter des variations de réponse de quelques pourcents en une semaine typiquement (suivant la position du cristal).

D'autres expériences ont été réalisées au CERN, où Fermi-GLAST a le statut de *recognized experiment*. Différents tests de barreaux ont été menés au SPS à partir de 2003 sous la responsabilité du CENBG. Initialement prévus au SLAC, les tests avec des photons et des électrons du prototype *Calibration Unit*, composé de deux tours complètes, ont été réalisés au CERN en 2006. Les Italiens de l'INFN ont assuré la coordination de la partie à basse énergie au PS et les Français de l'IN2P3 celle de la partie haute énergie au SPS.

Durant la phase d'assemblage et d'intégration des seize modules de vol du calorimètre entre 2004 et 2008, puis lors des premiers mois en orbite, les équipes de l'IN2P3 ont suivi les performances de chacun des 1536 cristaux, de son insertion dans la structure mécanique alvéolaire de son module jusqu'à l'intégration de celui-ci et des suivants dans la matrice du LAT. Les propriétés mécaniques et physiques (tenue du collage des photodiodes et qualité de la réponse optique) des cristaux et les fonctionnalités des circuits intégrés de leur électronique analogique frontale ont été suivies lors des cycles thermiques sous vide, des tests en vibration ainsi que des tests de compatibilité et d'interférence électromagnétique. La réponse en énergie des cristaux (calibration et résolution en énergie, localisation des dépôts d'énergie le long du cristal) a fait l'objet d'études dédiés par l'analyse des données de tests acquises avec des muons atmosphériques (proches du minimum d'ionisation), dont la trajectoire était mesurée en amont par le TKR. Cette méthode d'imagerie en entrée des cristaux a montré l'excellente homogénéité spatiale de la réponse en énergie de chacun d'entre eux.

3.c.2. Timing du GPS

Un atout de valeur des expérimentateurs de l'IN2P3 est d'ajouter leurs compétences instrumentales à une culture de tests et d'étalonnages rigoureux. Nous nous sommes rendus compte qu'une validation sérieuse de la datation absolue des arrivées de photons gamma dans le LAT n'était pas prévue, alors qu'essentielle pour l'étude des pulsars. Nous étions conscients qu'avant Fermi aucune mission spatiale astrophysique n'avait évité les dysfonctionnements de datation. Nous avons conçu un test simple : des muons atmosphériques déclenchaient en

même temps un dispositif simple récupéré d'une de nos expériences Tcherenkov et le LAT intégré avec le satellite. Faire accepter les tests par la NASA et par General Dynamics, le fabricant du satellite, a nécessité de naviguer dans une culture très différente de la nôtre. Les tests, réalisés chez le fabricant dans l'Arizona, ont mis en lumière un *bug* qui aurait empêché la découverte de la population de pulsars milliseconde. L'erreur a été corrigée au sol. Nous en avons profité pour valider la datation du GBM, assurant la confiance dans les temps d'arrivée des sursauts gamma, utile pour comparer avec les autres énergies (autres instruments) et notamment avec les ondes gravitationnelles. Récemment, notre étude de dix ans de données pulsar sur orbite a confirmé que la précision en temps du LAT est d'une fraction de microseconde, et est stable dans le temps.

3.c.3. De la reconstruction des données aux outils d'analyse

La version de la reconstruction et de la sélection des événements au moment du lancement (appelée *Pass 6*) était le fruit de nombreuses années de travail du groupe *Calibration & Analysis* et permettait de remplir le cahier des charges en termes de performances imposé par la NASA. Ce cahier des charges portait sur les résolutions angulaire et en énergie et sur la surface effective. Le facteur de rejet nécessaire pour éliminer l'intense bruit de fond de rayons cosmiques chargés est de l'ordre de 10^6 . Il est à noter que le principal défi est d'obtenir de bonnes performances sur un espace de phase très vaste (en énergie, en angle d'incidence et en position). La simulation de l'instrument avec GEANT4 a été essentielle pour ce travail, en particulier pour l'optimisation de la sélection réalisée grâce à des techniques d'arbres de classification. Il est à noter que plusieurs sélections sont mises au point, chacune correspondant à un certain niveau de bruit de fond résiduel et donc à un certain type d'analyse (source ponctuelle vs émission diffuse).

L'IN2P3 a joué un rôle important, notamment pour la reconstruction en énergie qui était une suite logique de notre implication dans le calorimètre. Initié au PCC, ce travail a été repris par le LLR. Sur axe, le LAT a une profondeur d'environ 10 longueurs de radiation (dont 8.6 pour le CAL), ce qui entraîne qu'au dessus de la dizaine de GeV une partie importante de la gerbe électromagnétique n'est pas contenue dans le calorimètre. La segmentation en 8 couches du calorimètre permet la mesure du profil longitudinal de la gerbe et, en ajustant ce profil, il a été possible d'obtenir une résolution en énergie meilleure que 10% à 300 GeV. Chaque couche étant faite de 12 cristaux, il est aussi possible de mesurer le profil radial de la gerbe, qui est une information importante pour rejeter le bruit de fond hadronique.

Le lancement de Fermi a été suivi de deux mois de vérification des données (de la calibration des sous-systèmes aux premières images astrophysiques). Les équipes de l'IN2P3 ont fortement contribué à cette période de *commissioning* (avec des séjours longs à SLAC, centre de la production des données), en particulier sur la validation des performances de l'instrument à partir des données elles-mêmes. La coordination de cette vérification a été assurée par P.

Bruel. La gamme en énergie recommandée pour les analyses astrophysiques était de 100 MeV à 300 GeV.

Le seul problème découvert avec ces premières données était qu'une fraction importante des événements (de 10% à 30%) contenait, en plus de l'événement responsable du déclenchement, les signaux dûs au passage hors-coïncidence d'un rayon cosmique (empilement). Cela faussait la reconstruction et diminuait la surface effective, l'ampleur de cette diminution étant dépendante du taux de rayons cosmiques et donc de la position du satellite. Afin de prendre en compte ce problème, l'effet de ces empilements a été implémenté dans la simulation. Cela a permis de rendre public dès 2009 des IRFs réalistes.

Ensuite, deux stratégies pour régler le problème ont été suivies en parallèle. La première, plus rapide, consistait uniquement à réoptimiser la sélection à partir de simulations incluant l'effet d'empilement, et a abouti aux données *Pass 7* (2011) puis *Pass 7 reprocessed* (2013). La seconde consistait en une refonte complète de la reconstruction et a permis d'obtenir avec les données *Pass 8* (2015) de nombreuses améliorations : augmentation supérieure à 25% de la surface effective, gamme en énergie agrandie de 30 MeV à 1 TeV (résolution en énergie de 12% à 1 TeV), partition en sous-classes d'événements selon la qualité de la résolution angulaire, diminution des erreurs systématiques. Une sélection des données rejetant un bruit de fond résiduel d'électrons cosmiques, sans perte de surface effective, a été rendue publique en 2018.

Les équipes de l'IN2P3 ont eu un rôle majeur dans tous ces développements, que ce soit dans l'écriture des algorithmes de reconstruction, la mise au point et la production des simulations, l'optimisation de la sélection et la validation des performances. En parallèle, nous avons aussi contribué à la production des IRFs et la mise au point des outils publics d'analyse (*Science Tools*).

La coordination du groupe *Calibration & Analysis* a été assurée par P. Bruel (LLR, 2007-2009) et J. Brégeon (LUPM, 2012-2013).

3.c.4. Simulations du LAT au CC-IN2P3

Les simulations avec GEANT4 de l'interaction des particules cosmiques (photons, électrons, protons et ions) avec le LAT sont indispensables pour optimiser les algorithmes de traitement des données, pour caractériser les IRFs à différentes énergies et angles d'incidence, et pour estimer les niveaux de fonds instrumentaux comme les protons résiduels après sélection des événements. Avant le lancement et à la demande de R. Dubois (SLAC), le LUPM a étendu le pipeline du LAT (ensemble d'outils et application de type client / serveur pour la gestion du calcul scientifique de la collaboration) au centre de calcul de l'IN2P3 (CC-IN2P3) pour y réaliser la totalité de ces productions Monte-Carlo. Depuis 2008, le LUPM a assuré la maintenance et

l'exploitation de cette branche de calcul, comprenant entre 1300 et 1600 cœurs disponibles à tout moment. En pratique, ce travail a été essentiellement réalisé par quatre ingénieurs en informatique en contrats CDD financés par le CNES au LUPM, pour une durée totale de 8.5 ans. En 2017 et 2018, l'environnement d'exécution du pipeline a été virtualisé dans des conteneurs *Singularity*, rendant le système plus stable et pérenne car en grande partie indépendant des évolutions futures des ressources du CC-IN2P3.

Année	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	Total
CPU (MHS06.h)	3.4	3.7	19.8	10.0	37.2	71.8	52.5	63.5	38.4	26.5	50.9	377.7
Coût (k€)	17	19	99	50	186	359	263	317	192	132	254	1888

La table ci-dessus donne le nombre annuel d'heures de CPU (en millions HS06) consommées au CC-IN2P3 depuis 2009 et le coût correspondant (pour 5 k€ / MSH06.h). A son maximum en 2014 (développement des algorithmes *Pass 8* de reconstruction / classification), cette consommation équivalait à environ 650 cœurs.an. Le calcul au CC-IN2P3 est reconnu comme une contribution en nature de l'IN2P3 à la collaboration LAT, et son coût estimé exonère notre institut d'une participation aux fonds communs depuis le lancement.

4. Exploitation des données scientifiques

4.a Introduction

Pour mesurer l'apport du Fermi-LAT, il est utile de rappeler l'état des connaissances avant son lancement. Le troisième catalogue d'EGRET comptait 271 sources, dont 67 (+27 candidats) noyaux actifs de galaxie, 6 pulsars, le Grand Nuage de Magellan (LMC) et 170 sources non-identifiés. Seuls quelques spectres de pulsars brillants montraient des signes de courbure, les autres étaient compatibles avec des lois de puissance. EGRET fonctionnant en mode pointé, les courbes de lumière obtenues au bout des 4.5 ans de fonctionnement effectif étaient extrêmement parcellaires. Seul le LMC avait été perçu comme source étendue. En dehors de considérations sur le Centre Galactique, EGRET n'avait conduit à aucun résultat significatif sur la matière noire ou des contraintes sur une nouvelle physique.

4.b Pré-lancement

En parallèle aux développements instrumentaux, la question du traitement et de l'analyse des données a été abordée par des simulations aussi réalistes que possible de la physique et du fonctionnement du télescope.

Pour cela des *Data Challenges* ont été organisés bien avant le lancement et avec un degré de complexité croissant. La présentation à la collaboration des premiers outils d'analyse publics

(*Science Tools*) a été faite lors du DC1 de décembre 2003 à février 2004 avec des données correspondantes à une journée d'observation.

La préparation du deuxième *Data Challenge* (DC2) s'est déroulée courant 2005. La mise à disposition des données et leur analyse s'est étalée entre mars et juin 2006. Un cycle complet d'observations (55 jours) avait été simulé avec 1719 sources astrophysiques ainsi que du bruit de fond résiduel de particules chargées. Les données de haut niveau ont permis de tester en conditions réelles les différents outils d'analyse nécessaires à l'étude des propriétés physiques des sources (histogrammes en phase des pulsars, courbes de lumières des blazars, formes spectrales, analyse conjointe GBM/LAT de quelques sursauts gamma, etc). La disponibilité des données de bas niveau a aussi permis l'étude des coupures sur les variables de reconstruction des événements et leurs effets sur les observables physiques.

De fin 2006 à début 2008 ont eu lieu plusieurs *Service Challenges*. Aux analyses des données de bas et haut niveaux s'ajoutaient les tests de procédure d'accès à ces données (pipeline d'ingestion et de traitement des données, *data server*, etc). Cette période a vu la validation des procédures de détections automatiques de sursauts, d'astreinte des *Flare/Burst Advocates*, d'analyse en ligne (sources particulières, certains pulsars) mais aussi la définition de la stratégie d'observation pour les toutes premières observations (*Launch and Early Operations*).

Les groupes de l'IN2P3 se sont fortement investis dans toutes ces activités et se sont intégrés très tôt dans les différents groupes de travail. L'expérience acquise nous a permis d'être prêts au moment du lancement pour bénéficier de la première année de données réservée à la collaboration.

4.c Post-lancement

4.c.1 Catalogues généraux de sources

Les catalogues généraux de sources détectés par le Fermi-LAT constituent des livrables de la collaboration requis par la NASA. Ce sont de véritables bases de données qui représentent des ressources essentielles pour la communauté de l'astrophysique de haute énergie, comme en témoigne le nombre important de citations dont les articles associés font l'objet. Différentes versions ont été produites depuis le lancement, avec des limites de détection de 100 MeV (catalogues baptisés FGL) ou de 10 GeV, voire 50 GeV (catalogues baptisés FHL). Le dernier catalogue en date⁶ (4FGL, établi avec 8 ans de données, comptant 5064 sources et publié en mars 2020) démontre la richesse du ciel au GeV, avec une grande variété de sources galactiques (pulsars, nébuleuses de pulsars, vestiges de supernovae, binaires X, amas globulaires...) et extragalactiques (galaxies proches, galaxies à sursauts de formation d'étoiles, noyaux actifs de galaxie). Environ 25% des sources restent non-identifiées. Les phénomènes transitoires comme les sursauts gamma ou les éruptions solaires font l'objet d'études et de catalogues dédiés. Le catalogue 3FHL ($E > 10$ GeV), particulièrement précieux pour guider les observations des observatoires Cherenkov au sol, compte 1500 sources, c'est à dire un nombre de *sources* supérieur au nombre de *photons* détectés par EGRET à ces énergies.

⁶ Une version actualisée avec 10 ans de données (4FGL-DR2) vient d'être rendue publique en mai 2020.

La communauté française de la collaboration a assumé des responsabilités essentielles dans la production de ces catalogues. J. Ballet (CEA Irfu) a été en charge de la coordination des catalogues FGL et a réalisé l'essentiel des analyses de données avec un pipeline développé à Saclay. Initialement adaptée par J. Knödelseder (INSU) de l'IRAP Toulouse à partir de celle développée pour EGRET, la procédure d'association des sources gamma avec des contreparties connues à d'autres longueurs d'onde et leur classification a été appliquée pour les catalogues 3FHL et 4FGL par B. Lott (CENBG). En plus de cette responsabilité, il a assuré la co-coordination du groupe de travail sur les catalogues pendant 4 ans. Des figures des différents articles accompagnant les catalogues ainsi que l'analyse de variabilité pour le catalogue 1FHL ont été réalisées au LLR.

4.c.2 Pulsars

Dans le plan de la Galaxie la majorité des sources sont des pulsars. Les pulsars milliseconde (MSP), la moitié des pulsars gamma, s'étalent vers les hautes latitudes. La signature pulsée permet une identification sans ambiguïté même dans les régions denses d'objets. Le nombre de pulsars détectés approche les 300, à une cadence régulière de 24 pulsars par an qui, pour le moment, ne ralentit pas. La mission précédente, CGRO, en a vu au maximum 10, dont certaines détections ne faisaient pas consensus.

Le nombre de pulsars mais surtout la variété de types de pulsars sont grands et dépassent les attentes d'avant le lancement. La grande population de MSPs gamma - une surprise - inclut pour un tiers des "araignées", systèmes binaires où le vent du pulsar détruit l'étoile compagne. Avant Fermi on croyait, à tort, que cela se produisait surtout dans les amas globulaires. Le LAT a aussi découvert des MSPs sans contrepartie radio - inédit en rayons gamma. Parmi les MSPs découverts en radio grâce à la localisation fournie par le LAT, certains contribuent désormais aux campagnes de recherches d'ondes gravitationnelles. La population de pulsars jeunes (non recyclés) est grande et variée elle aussi, avec une contribution non négligeable à l'émission diffuse gamma dans la Voie Lactée. Fermi a révélé le rôle important des étoiles à neutrons parmi les phénomènes cosmiques de haute énergie dans la Voie Lactée.

Les chercheurs de l'IN2P3 ont été au coeur de cette réussite dès la première heure. Quatre ingrédients étaient essentiels: i) une bonne datation des temps d'arrivée (ToA), obtenue par nos bons soins (Section 3.c.2, ci-dessus) ; ii) des éphémérides radio de rotation et iii) des logiciels spécifiques précis. Nous décrivons maintenant ces deux derniers points.

Le LAT découvre des pulsations gamma sans aide extérieure seulement si la source est lumineuse en gamma. En revanche, avec un modèle du ralentissement de la rotation de l'étoile à neutrons construit à partir d'observations avec des radio télescopes, on peut traduire chaque ToA en phase de rotation, et construire des histogrammes de phase où le signal pulsé est évident. L'avantage est qu'on évite le grand nombre d'essais nécessaires dans une recherche en aveugle et on gagne un facteur 8 environ en sensibilité. A partir de 2006, des chercheurs du

CENBG ont contacté la communauté radio et ont organisé un consortium pour fournir des centaines d'éphémérides à la collaboration LAT. Ce consortium prospère encore aujourd'hui.

Pour la traduction de ToA en phase citée dessus, on doit compter des milliards de tours d'étoiles à neutrons pendant une décennie avec une précision de l'ordre du 50ème de tour. Cela demande des logiciels qui préservent la précision des observations radio (par exemple) jusqu'aux phases gamma. Le CENBG a découvert en 2007 que les codes préconisés par la NASA étaient défectueux dans certains cas et s'est attelé à adapter les codes standard utilisés dans la communauté pulsars aux besoins du LAT. Le *plugin* Fermi de *tempo2*, l'outil standard de datation pour les pulsars, est encore aujourd'hui l'outil de référence.

La collaboration étroite avec l'équipe d'Ismaël Cognard (INSU - Orléans) qui exploite le radiotélescope de Nançay a grandement facilité l'apprentissage des arcanes des pulsars par les chercheurs du CENBG.

Un traitement homogène de la grande variété d'observations dans des catalogues, comme discuté dessus, est essentiel pour assurer le retour scientifique. Les premier et second catalogues de pulsars gamma, et bientôt le troisième, ont été préparés pour grande partie par les chercheurs français. Nous nous sommes bien intégrés avec la communauté internationale de spécialistes, et ainsi nous publions régulièrement avec des radio astronomes, des observateurs en rayons X, et des théoriciens, sur des sujets qui vont des mécanismes des pulsars eux-mêmes aux applications des pulsars et leurs impacts sur leurs environnements.

4.c.3 Vestiges de supernovae et nébuleuses de vent de pulsar

Les pulsars sont les sources dominant le ciel galactique vu par le LAT tandis que, à plus haute énergie, ce sont les nébuleuses qu'ils alimentent qui dominent le ciel observé au TeV par les télescopes Tcherenkov. Cette correspondance montre l'excellente complémentarité des études faites par les instruments au sol et dans l'espace. Par ailleurs, grâce à son grand champ de vue et à la détection des gamma dans l'intervalle en énergie comprenant la célèbre cassure spectrale attendue lors de l'interaction proton-proton (appelée *pion bump*), le LAT s'est révélé essentiel dans l'étude des vestiges de supernovae (SNR). Grâce au LAT, l'échantillon des SNR détectés en rayons gamma de haute énergie est devenu beaucoup plus vaste et surtout plus riche: il va des SNR évolués en interaction avec des nuages moléculaires jusqu'aux jeunes SNR en coquille et aux SNR historiques. Les études des SNR sont d'un grand intérêt car ces analyses sont directement liées à la question de l'origine des rayons cosmiques galactiques. Ainsi, Fermi a pu montrer que des protons sont au moins ré-accélérés dans plusieurs vestiges de supernovae en interaction avec des nuages moléculaires.

Les équipes de l'IN2P3 ont pris part dans ces avancées et dans les études concernant l'accélération des particules dans les vestiges plus jeunes où des traces d'accélération commencent à apparaître par exemple pour RX J1713.7-3946. Elles ont également significativement contribué à l'analyse et à l'élaboration d'un catalogue de nébuleuses de pulsars (PWN) qui compliquent souvent l'interprétation de l'émission gamma en provenance des

SNR et pourraient aussi contribuer directement au spectre local de rayons cosmiques, en particulier à sa composante leptonique. N'oublions pas qu'environ 50% des sources galactiques sont toujours non identifiées et qu'une grande partie de ces sources pourraient être des nébuleuses de pulsars. Le catalogue de sources étendues publié en 2017 fut également en majeure partie développé par le CENBG. M. Lemoine-Goumard et M. Renaud ont reçu la médaille de bronze du CNRS pour leurs travaux sur les SNR/PWN, dont une partie a été menée au sein de la collaboration LAT démontrant l'apport notable des chercheurs de l'IN2P3. Enfin, la coordination du groupe Galactique a été assurée par D. Smith puis par M. Lemoine-Goumard qui a également coordonné celui du sous-groupe SNR-PWN avant qu'il ne soit repris par M.H. Grondin.

4.c.4 Noyaux actifs de galaxie

Les noyaux actifs de galaxie (AGN) dominent le ciel extragalactique en rayons gamma avec plus de 3000 objets détectés par le LAT, représentant plus de 60% des sources du dernier catalogue du Fermi-LAT. Les blazars (AGN dont le jet pointe dans la direction de la Terre) sont largement majoritaires (98% du total, les autres étant essentiellement des radiogalaxies proches). Le plus lointain a un redshift spectral de 4.3. Le LAT a permis de multiplier par un facteur 40 le nombre des blazars connus au GeV, dont les propriétés (formes spectrales et courbes de lumière) ont pu être déterminées avec une précision inégalée à ces énergies. Un éclairage nouveau a été apporté sur la nature des phénomènes responsables des différentes propriétés entre les classes de blazars (*flat-spectrum radio quasars* ou objets de type BL Lac), comme le taux d'accrétion ou le spin du trou noir. L'étude détaillée de ces blazars, à des niveaux quiescents ou lors d'éruptions spectaculaires, par des mesures multi-longueurs d'onde ont fourni des contraintes fortes sur les mécanismes d'accélération et d'émission des particules présentes dans le jet ainsi que sur leur localisation dans l'environnement du trou noir central. Des temps de variabilité inférieurs à l'heure voire de quelques minutes ont été observés. Au-delà de ces variations rapides, la couverture unique du ciel offerte par le LAT a permis de surveiller l'activité de l'ensemble des AGN de manière quasi-continue sur près de 12 ans. Ces données, sans équivalent sur le comportement des sources à toutes les échelles de temps, permettent la détermination des distributions de flux et densités spectrales de puissance ainsi que la recherche de périodicités. La population d'AGN du LAT a ouvert la voie à de nombreuses études connexes sur la densité du fond diffus cosmique infrarouge (*Extragalactic Background Light* ou EBL) et son évolution cosmologique, l'intensité du champ magnétique intergalactique, la recherche de corrélation avec la détection de neutrinos de haute énergie ou de rayons cosmique d'ultra-haute énergie, la contribution des AGN au fond diffus extragalactique en rayons gamma. La synergie avec le domaine du TeV a été fructueuse que ce soit dans l'identification de sources potentielles par le LAT, l'étude multi-longueurs d'onde d'objets individuels ou portant sur l'EBL, ou l'identification de futures cibles pour CTA. Les équipes de l'IN2P3 ont pris toute leur part dans ces avancées. La coordination du groupe de travail dédié de la collaboration a été assurée successivement par B. Lott (CENBG), S. Fegan (LLR) et D. Horan (LLR). La réalisation des cinq catalogues d'AGN produits depuis le lancement a été coordonnée

au CENBG. Les autres études importantes concernent les propriétés spectrales et temporelles de ces AGN (CENBG), l'EBL (LLR), de sources individuelles au GeV uniquement (CENBG) ou conjointement avec des données au TeV (LLR).

4.c.5 Sursauts gamma

Phénomènes explosifs très énergétiques, les sursauts gamma (*Gamma-Ray Bursts* ou GRBs) se caractérisent par une courte émission intense et erratique en rayons X durs et gamma (0.01 s à 100 s typiquement), suivie d'une émission rémanente diminuant rapidement en flux et en fréquence. Le scénario standard suppose la formation d'un trou noir de masse stellaire, par coalescence d'objets compacts (sursauts courts, de durée inférieure à environ 2 s) ou l'effondrement d'une étoile massive en fin de vie (sursauts longs), accompagné d'un écoulement ultra-relativiste collimaté. Alors que l'émission prompte provient des particules accélérées au sein de ce jet (par chocs internes ou reconnexion magnétique), la rémanence résulte du choc hautement relativiste du jet avec le milieu extérieur. Les observations se sont fortement enrichies grâce à Fermi, avec plus de 180 sursauts observés conjointement du keV au GeV par le GBM et le LAT en dix ans. En comparaison, seulement trois sursauts étaient connus au-delà de 100 MeV avant Fermi. L'émission prompte synchrotron des électrons du jet culmine au MeV ou en deçà, et s'accompagne parfois d'une faible émission thermique (<100 keV) de la photosphère de plasma en expansion adiabatique, découverte grâce au GBM. En outre, le LAT a révélé une composante non thermique additionnelle s'étendant de quelques dizaines de MeV jusqu'à 100 GeV dans le cas record de GRB130427A. Débutant peu après l'émission au keV-MeV, cette émission au GeV persiste dans la phase rémanente, pendant presque un jour dans le cas de ce sursaut. Contrairement à l'émission tardive au GeV, certainement issue du choc avant à l'origine de la rémanence, l'émission au GeV durant la phase prompte demeure l'objet de débats (émission Compton inverse d'électrons dans le jet ou synchrotron au choc avant, accélération de protons et processus hadroniques associés). La compréhension de son origine nécessite une modélisation réaliste de la (micro-)physique du jet et des observations multi-longueurs d'onde complémentaires, telles celles que fourniront les observatoires CTA et SVOM dans un futur proche. D'ores et déjà, la découverte par le LAT de photons de plusieurs dizaines de GeV et de la présence occasionnelle d'une cassure spectrale aux plus hautes énergies implique une compacité importante des régions d'émission, confirmant la nature ultra-relativiste ($\Gamma \sim 100-500$) de l'éjection, longtemps présumée. Par ailleurs, l'analyse des temps d'arrivée des photons les plus énergétiques a permis d'établir les meilleures limites sur la violation de l'invariance de Lorentz (LIV) dans l'hypothèse où elle se manifesterait par une dépendance de la vitesse des photons avec leur énergie. Grâce au LAT, les modèles de gravité quantique prédisant une telle dépendance, qu'elle soit déterministe ou stochastique, ont ainsi pu être exclus en deçà de l'échelle de Planck.

Le LUPM a été moteur dans les études de la LIV, développant de nouvelles méthodes statistiques et examinant minutieusement les erreurs systématiques associées. Du côté astrophysique, il a fortement contribué à l'élaboration du catalogue à trois ans du LAT, le premier à haute énergie (>100 MeV) pour des sursauts gamma. Cet effort important a permis de

finaliser les procédures d'analyse (détection, localisation, études spectro-temporelles) et d'identifier les principales propriétés collectives des GRBs (durée, spectre, énergétique, etc). En outre, le LUPM a publié plusieurs articles sur des sursauts remarquables permettant de mieux comprendre les propriétés du jet (facteur de Lorentz Γ , localisation des émissions du keV au GeV dans le jet) et d'éprouver le modèle d'émission prompt synchrotron et Compton inverse d'électrons accélérés dans les chocs internes, en particulier en collaboration avec l'Institut d'Astrophysique de Paris (F. Daigne, R. Mochkovitch). Enfin, le LUPM prend part aux activités routinières de *Burst Advocate* (voir la section suivante) de la collaboration LAT depuis le lancement, et il a coordonné le groupe de travail GRB à deux reprises (F. Piron en 2008-2010 et V. Vasileiou en 2011-2012).

4.c.6 Burst / Flare Advocates

Tout membre LAT du groupe de travail GRB assure chaque année environ 5 *shifts* d'une semaine en tant que *Burst Advocate* (BA), personne d'astreinte chargée d'examiner en temps réel les alertes générées par le GBM (en général) ou d'autres observatoires spatiaux comme Swift. Le BA doit examiner les sorties des pipelines d'analyse automatique, réaliser au besoin des analyses complémentaires, et communiquer le plus rapidement possible ces résultats (position du GRB, flux global, brève description de la courbe de lumière, etc) à la communauté sursauts mondiale via le réseau d'alerte GCN (*GRB Coordinates Network*). L'objectif est de susciter dans les heures (voire jours) qui suivent des observations de l'émission rémanente du sursaut, dont l'intensité décroît rapidement, par des télescopes opérant à plus grandes longueurs d'onde afin de mesurer le décalage spectral (*redshift* spectroscopique sinon photométrique) et donc la distance. Cette mesure a pu aboutir pour 34 des 186 sursauts gamma détectés par le LAT en dix ans (second catalogue).

Par ailleurs, le groupe de travail GRB a développé des pipelines pour balayer automatiquement les contours d'erreur de localisation des sources d'ondes gravitationnelles détectées par LIGO et Virgo. Le BA est chargé de veiller au bon déroulement de ces analyses automatiques et de consigner rapidement les résultats dans une circulaire GCN. Le LAT n'a trouvé aucune contrepartie gamma à ce jour, et les BA ont communiqué des limites supérieures pour chacune des 56 alertes publiques de LIGO-Virgo durant la campagne O3 récente. A ce jour, les chercheurs IN2P3 sont (co-)auteurs de 50 circulaires GCN de la collaboration LAT, dont 40 sur la détection de GRBs et 10 sur le suivi d'alertes LIGO-Virgo.

En dehors des GRBs, les sources variables au GeV sont majoritairement des AGN, mais il y a aussi d'autres types de sources (soleil, sources galactiques, sources non-identifiées). Avec son grand champ de vue, le LAT est très efficace pour surveiller le ciel au GeV. Cette surveillance est assurée par l'activité *Flare Advocate - Gamma-ray Sky Watcher* (FA-GSW), avec un suivi des sources variables connues (FA) et la recherche de nouvelles sources (GSW). La collaboration a mis en place un pipeline pour analyser les données dès qu'elles sont disponibles au sol et trouver les sources qui montrent une émission élevée à différentes échelles de temps

(journée ou moins). Chaque semaine un membre de la collaboration LAT assure le *shift* FA-GSW.

Quand une source est dans un état haut d'émission, il est essentiel d'avoir un maximum d'observations sur l'ensemble du spectre multi-longueurs d'onde et il faut donc avertir la communauté le plus rapidement possible. Dans le cas où une source gamma dépasse un seuil prédéfini, soit un message GCN automatisé est envoyé, soit la personne en *shift* FA-GSW prépare une alerte en forme d'ATel qui, après validation de la collaboration, est envoyée à la communauté. La personne en *shift* vérifie que l'analyse produite par le pipeline automatisé est correcte (en réalisant si besoin une analyse dédiée) et souvent, en parallèle de l'envoi d'un ATel, soumet une requête de *Target of Opportunity* au satellite Swift pour acquérir des données en rayons X avec le télescope XRT et en UV / visible avec le télescope UVOT. Les *shifters* sont aussi responsables du suivi des alertes neutrinos du télescope IceCube. Même si aucune contrepartie au GeV n'est détectée, un ATel est rédigé pour partager cette information avec la communauté mondiale. Les membres des équipes IN2P3 ont participé aux *shifts* FA-GSW depuis le début de la mission, ce qui leur a permis de signer 16 ATels.

4.c.7 Matière noire

La détection indirecte d'un signal de matière noire (annihilation ou désintégration de particules de matière noire) dans le ciel gamma fut un sujet central dès la création par l'IN2P3 d'un groupe d'astrophysique gamma à Montpellier. Aux premières études avec CELESTE en direction de M31 a succédé la préparation de la science avec le Fermi-LAT. Nous nous sommes rapidement intéressés à deux cibles d'analyse : les naines sphéroïdes et le centre de la Galaxie. Les naines sphéroïdes présentent l'avantage d'être de vieux systèmes stellaires dépourvus de gaz et de formation d'étoiles (et donc de signal gamma associé) et la dispersion de vitesse de leurs étoiles membres semble indiquer que leur masse est très largement dominée par de la matière noire. Le halo que celle-ci formerait est néanmoins de petite taille et le signal gamma attendu est faible, contrairement au centre Galactique dont le halo est beaucoup plus imposant mais dont la région d'observation est très riches d'émetteurs gamma connus ou supposés. Le LUPM a été moteur sur les analyses avant lancement de ces deux cibles, et a en particulier milité pour l'usage, à présent systématique dans la communauté gamma, des diagrammes en " $m-\langle \sigma V \rangle$ ". Il a également eu la responsabilité du développement du code d'analyse dédié au sein des *FermiTools*. Après le lancement, le LUPM a co-dirigé les analyses des données Fermi-LAT dans la direction d'un ensemble de naines sphéroïdes publiées dans 4 articles successifs, dont un article dans *Physical Review Letters* qui a eu beaucoup de retentissement en introduisant pour la première fois une analyse statistique combinée de toutes les naines sphéroïdes considérées, technique à présent adoptée par toutes les collaborations de hautes énergies, même sur des sujets hors matière noire. Le LUPM a d'ailleurs participé à des analyses combinées multi-instruments qui généralisent la méthode et ont achevé la diffusion de la méthodologie. Outre une participation importante à d'autres sujets au sein du groupe de travail sur la matière noire et la nouvelle physique (dimensions supplémentaires, violation de l'invariance de Lorentz), le LUPM a également dirigé un effort plus phénoménologique sur

l'estimation du facteur astrophysique (le facteur J) entrant dans le calcul du flux prédit en direction d'un halo de matière noire tel que celui supposé loger au sein d'une naine sphéroïde. L'expertise acquise sur le sujet a culminé avec l'écriture de deux articles de revue ainsi qu'une participation importante à un livre blanc⁷ sur les perspectives de détection de matière noire dans le ciel gamma à l'horizon 2025, présenté au siège de la DOE à Washington.

4.c.8 Electrons cosmiques

Le LAT est un détecteur de photons mais il peut être utilisé pour détecter les électrons et positrons. La préparation de la mesure du spectre des électrons+positrons cosmiques a commencé avant le lancement. La sélection des événements permettant de rejeter le bruit de fond de protons a reposé principalement sur les caractéristiques de la gerbe mesurée dans le calorimètre et a été optimisée à l'aide d'arbres de classification. Une première analyse en 2009 a permis de mesurer le spectre des électrons de 20 GeV à 1 TeV avec une bien meilleure précision que les mesures existantes et n'a pas confirmé le pic à 400 GeV vu par ATIC. Le seuil en énergie de cette analyse a été abaissé à 7 GeV en 2011. Cela a permis d'utiliser la coupure géomagnétique du spectre pour mesurer l'échelle absolue en énergie. Le champ magnétique terrestre peut être utilisé pour distinguer les positrons des électrons. La mesure de la fraction de positrons faite en 2012 avec le LAT a confirmé les résultats de PAMELA en étendant le domaine en énergie de 100 GeV à 200 GeV.

Certaines des améliorations apportées par *Pass 8* étaient naturellement bénéfiques à l'analyse des électrons, en particulier celles ayant trait à la mesure en énergie qui a été étendue jusqu'à 3 TeV. Le LLR a joué un rôle majeur dans l'analyse de 2017 qui a mis à jour la mesure du spectre des électrons de 7 GeV à 2 TeV. Les améliorations de *Pass 8* et une bien meilleure maîtrise des erreurs systématiques ont permis de corriger significativement la mesure de 2009. Cette ré-analyse a été aussi l'occasion de refaire la mesure de l'échelle absolue en énergie

5. Vulgarisation

De nombreuses présentations ont été données sur les résultats de Fermi par l'ensemble des groupes de l'IN2P3 devant le grand public, des astronomes amateurs, des lycéens ou des professeurs du secondaire.

Au delà de ces efforts, deux projets de vulgarisation liés à Fermi ont été développés au CENBG. Le projet COSMIX⁸ met à disposition des professeurs de lycée des détecteurs de muons atmosphériques très simples d'utilisation. Ces détecteurs proviennent du recyclage des barreaux de CsI du calorimètre et leur électronique utilisés pour les tests précédant le lancement. Les barreaux, lus par deux photodiodes, ont été coupés en deux pour permettre de réaliser des coïncidences. Chaque détecteur est robuste, léger, facilement transportable dans une petite mallette et ne nécessite qu'un câble USB pour son alimentation. Les signaux issus

⁷ <https://arxiv.org/pdf/1605.02016>

⁸ <http://www.cenbg.in2p3.fr/COSMIX-Compter-les-muons>

des deux demi-barreaux peuvent être visualisés par un oscilloscope. Un système d'acquisition simple basé sur Arduino permet le comptage des muons et l'enregistrement de leur temps d'arrivée. Une cinquantaine de mallettes ont été réalisées, dont environ 35 circulent dans des lycées français (Aquitaine, Ile-de-France, Alsace, Réunion, Corse) ou étrangers (Suisse, Canada, Vietnam, Espagne). Le flux de muons a été mesuré les lycéens dans les endroits les plus divers (en montagne, en avion, dans des tunnels, sur et sous l'eau, en Antarctique...). Les autres détecteurs ont été acquis par des laboratoires français ou étrangers (dont le CERN) pour leurs opérations de communication.

L'autre projet, baptisé COSMAX⁹, permet à des non-experts, dont le grand public, d'accéder aux données du LAT pour réaliser des cartes du ciel (statiques ou animées) et de mettre en évidence, potentiellement en temps réel, des événements cosmiques intéressants (sursauts solaires, sursauts gamma, éruptions d'AGN, novae...). COSMAX est aussi couramment utilisé pour l'accueil de stagiaires dans des groupes appartenant ou non à la collaboration. Les logiciels sont installés sur des machines virtuelles VMware/Virtual Box Linux à télécharger sur son PC. Depuis 2015, des *Masterclasses* sur "Les trous noirs vus en rayons gamma", basées sur COSMAX, sont organisées deux fois par an sur une journée pour des classes de Première et de Terminale. L'idée de *Masterclasses* sur les données du LAT, que nous avons introduite au sein de la collaboration, a maintenant été reprise par nos collègues étrangers, en particulier italiens.

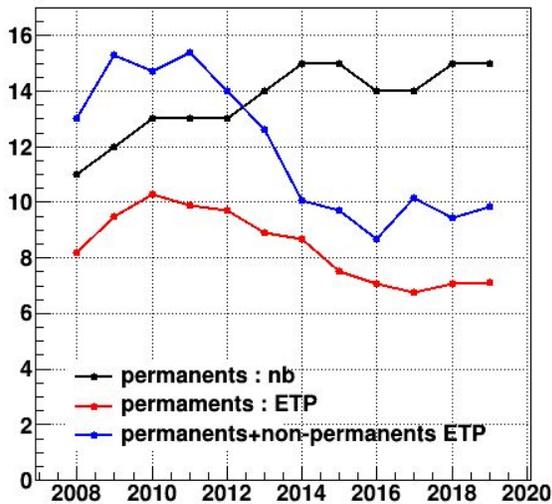
6. Historique RH et financement depuis 2008

6.a Ressources humaines

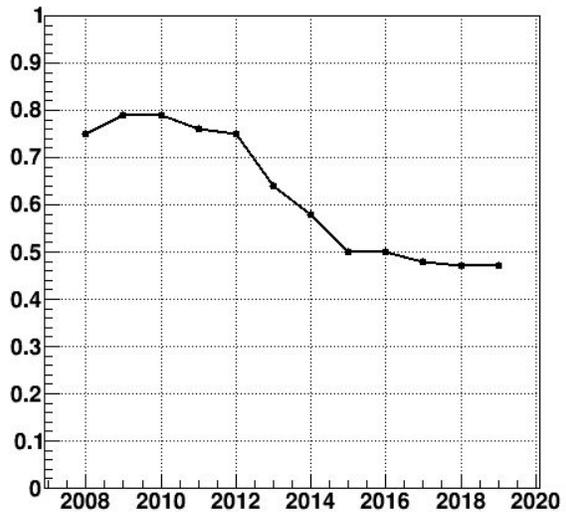
Comme le montre la figure suivante (gauche), le nombre total (permanents+non-permanents) d'ETP-chercheurs est passé d'une quinzaine au moment du lancement à une dizaine en 2015 et est stable depuis. Le nombre de chercheurs permanents dans Fermi a augmenté légèrement depuis 2008 et est quasiment constant depuis 2013, même si la fraction du temps qu'ils y consacrent en moyenne a baissé depuis 2012 (figure de droite) pour atteindre environ 50%. Cela reflète le fait que certains chercheurs ont commencé à migrer sur d'autres projets alors que d'autres continuent à travailler 100% de leur temps sur Fermi.

⁹ <ftp://www.cenbg.in2p3.fr/astropart/VM/cosmax.pdf>

Effectif des chercheurs



Ratio ETP/nb pour les permanents



6.b Financement

6.b.1 Construction

Les seuls chiffres à notre disposition estiment le coût de la contribution IN2P3 au calorimètre à ~750 k€ (dont 180 k€ pour l'autoclave).

6.b.2 Fonds communs

Les fonds communs de la collaboration s'élèvent à environ 6 k€/signataire. La contribution de l'IN2P3 à ces fonds communs se fait en *in-kind* à travers le calcul effectué au CC-IN2P3 (voir tableau dans la partie 3.c.4). Cela représente 170 k€/an en moyenne depuis 2009. De plus un ingénieur en informatique du LLR a fait un séjour de deux ans à SLAC. Il est à noter que l'IN2P3 prend en charge la contribution de toutes les équipes française hors CEA (~25 personnes en tout). Le CNES a aussi contribué au calcul de Fermi *via* le financement de quatre ingénieurs en informatique en contrats CDD au LUPM pour une durée totale de 8.5 ans (et le financement de leurs missions à SLAC, de plusieurs semaines chacune).

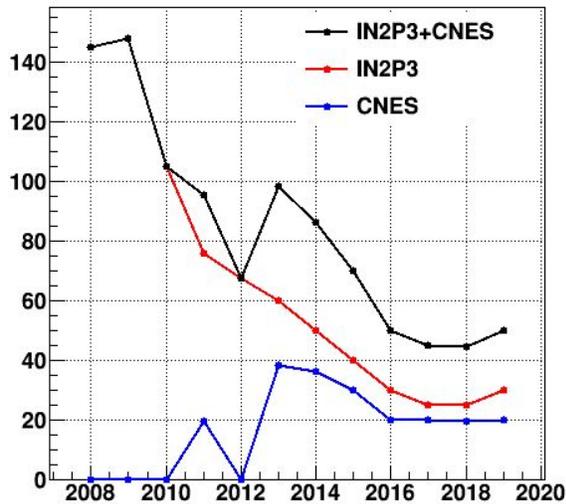
6.b.3 Soutien mission

Comme le montre la figure suivante, le soutien mission IN2P3 a baissé après le lancement pour atteindre un premier plateau de 5 k€/ETP entre 2011 et 2014, puis un second plateau autour de 3 k€/ETP.

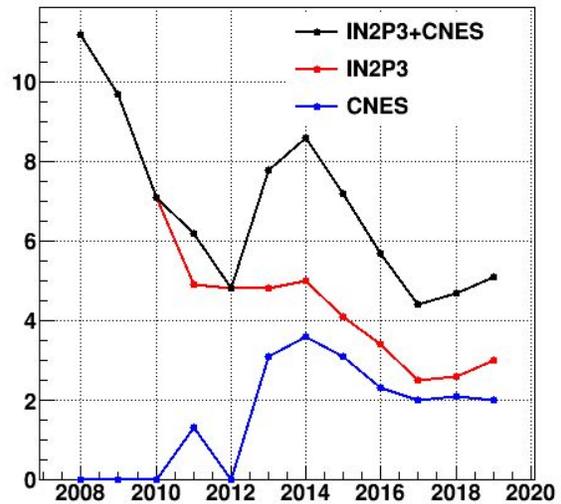
Depuis 2011, nous avons fait chaque année (sauf en 2012) une demande de soutien au CNES. Ce financement s'est stabilisé en 2016 vers 2 k€/ETP. Notre soutien mission total (IN2P3+CNES) est donc d'environ 5 k€/ETP. Il est à noter que cette demande de soutien au CNES est évaluée régulièrement par le groupe Astronomie et Astrophysique du CNES. Ces

évaluations sont faites conjointement avec toutes les équipes françaises travaillant dans la collaboration (IN2P3, INSU, CEA). Les rapports de ces évaluations sont jointes en annexe E.

Financement (keuros)



Financement/ETP (keuros)



6.b.4 Financements nationaux et internationaux

Les performances du LAT ont été souvent utilisées dans le cadre de demandes de projet nationales mais aussi sur le plan européen. On peut citer l'ERC P-WIND (M. Lemoine-Goumard, CENBG, 2011-2013) et le projet PECORA (S. Gabici, APC, 2018-2022) impliquant le CENBG. La contribution sur Fermi des doctorants et post-doctorants financés par ces projets est précisée en annexe C. Enfin, une collaboration entre des chercheurs de Stanford et du CENBG a été établie en 2009 pour une durée d'un an grâce à une subvention de 15 k\$ du France-Stanford Center for Interdisciplinary Studies.

Le LUPM a organisé et accueilli la réunion de collaboration LAT de l'automne 2014. Elle a réuni ~120 participants durant 5 jours, et était financée par l'IN2P3, l'Université Montpellier 2 et le Labex OCEVU.

7. Retour sur expérience

7.a. Bilan

La mission Fermi a rempli la plupart des objectifs scientifiques fixés initialement et les découvertes inattendues ont été nombreuses (plus de 8700 articles utilisant les données du LAT, ayant fait l'objet de plus de 135 000 citations). Après 12 ans d'exploitation, ses caractéristiques restent des atouts majeurs à l'ère de l'astronomie multi-messagers et de l'astronomie des phénomènes transitoires (*time-domain astronomy*), comme l'ont souligné les

membres du dernier *Senior Review Committee* de la NASA¹⁰. Rappelons qu'aucun successeur susceptible de dépasser les performances globales du LAT n'est en cours de développement. Les données et produits (comme les catalogues) du LAT resteront donc l'état de l'art dans ce domaine pour probablement plusieurs décennies.

Les membres de l'IN2P3 impliqués dans la collaboration sont heureux d'avoir participé à cette très belle aventure scientifique. Si certains avaient des compétences antérieures en astronomie gamma via CELESTE ou CAT, aucun n'avait d'expérience dans le domaine spatial. Dans la phase de pré-lancement, nous nous sommes rendus visibles et avons été reconnus grâce à nos contributions sur la préparation de l'instrument permises par nos compétences de physiciens expérimentateurs. La transition occasionnée par le lancement aurait pu représenter un saut dans l'inconnu quant à notre contribution à l'exploitation scientifique de l'instrument. En fait, cette incertitude a été largement atténuée par notre participation active (allant jusqu'aux tâches de coordinateurs) aux différents groupes de travail scientifiques bien en amont du lancement. Les *Data Challenges* ont été extrêmement profitables pour acquérir les compétences qui nous manquaient dans l'exploitation des données. Le déroulement du projet a d'une façon générale permis une excellente collaboration entre les communautés de physique des particules et d'astrophysique des hautes énergies.

Il nous semble important de mentionner certains points qui ont grandement facilité notre insertion :

- Fermi est une mission généraliste, avec un nombre quasi illimité de sujets scientifiques. Cette profusion réduit très fortement le risque de concurrence interne dans la collaboration.
- La politique actuelle de la NASA veut que les données soient publiques immédiatement, ce qui interdit l'existence de domaines réservés au sein ou en dehors de la collaboration. A nouveau, cette situation réduit les risques de conflit interne et encourage l'esprit de collaboration.
- La politique de données publiques, qui avait suscité certaines inquiétudes en nous privant potentiellement d'une partie du retour scientifique de la mission au bénéfice de concurrents extérieurs, s'est en fait révélée plutôt positive et la compétition bénéfique. La richesse et l'abondance des données du LAT justifient que l'ensemble de la communauté y ait accès afin de maximiser leur exploitation. La vigueur de l'activité extérieure à la collaboration est un facteur essentiel examiné par le *Senior Review Committee* pour recommander le prolongement de la mission.
- Le principe d'ouverture et de non-exclusivité dans la collaboration a pour corollaire que les droits et responsabilités assumés par les membres sont non proportionnés aux contributions financières ou techniques des instituts auxquels ils appartiennent (même si la corrélation existe). Le pragmatisme affiché par nos collègues américains concernant notre maintien dans la collaboration malgré le retrait du CNES est remarquable.

¹⁰ [2019 Senior Review committee report](#)

- Les données et les outils étant voués à être publics, ces derniers ont été développés dans cet esprit bien avant le lancement, très bien documentés et extensivement testés au sein de la collaboration. Il a donc été assez facile pour nous de se familiariser avec ce nouvel environnement.
- L'appartenance à la collaboration nous a offert des contacts privilégiés, voire des collaborations étroites, avec certains des meilleurs experts mondiaux du domaine, qui auraient été difficiles autrement.
- La personnalité plutôt débonnaire du PI est un autre facteur d'apaisement.

Tous ces facteurs ont été propices à un climat de travail constructif et collaboratif, dont notre production scientifique témoigne ([Liste des publications](#)). Les 20 thèses réalisées dans nos groupes ont fortement bénéficié des échanges et partenariats divers noués au sein de la collaboration. Précisons que la liberté laissée aux membres de l'IN2P3 de s'intégrer dans les thématiques de leur choix a été un gage certain de rendement scientifique optimal.

Cette situation n'est pas forcément facilement transposable dans un projet futur, où les conditions seront naturellement différentes. Le projet AMEGO (télescope spatial généraliste au MeV) proposé par nos collègues de la NASA se présente comme offrant de grandes similitudes avec Fermi dans sa structure et son fonctionnement. Certains d'entre nous s'engageront avec confiance dans ce projet s'il aboutit.

7.b. Compétences acquises / problèmes rencontrés

Le fait d'avoir contribué à la construction de l'instrument final (structure du calorimètre) nous a obligé à adopter l'"approche qualité" imposée par les procédures et normes du domaine spatial, ce qui représentait à l'époque une évolution majeure dans le domaine technique. Cette approche, devenue standard pour les réalisations de projets de physique de l'Institut, est maintenant pleinement ancrée dans la culture des ingénieurs.

Pour les chercheurs, travailler sur des données publiques a représenté une révolution culturelle, à laquelle ils se sont adaptés. Les responsabilités prises dans les différents groupes de travail et sur des articles majeurs de la collaboration leur ont permis d'acquérir une crédibilité incontestable en tant qu'acteurs du spatial.

Le problème majeur auquel les équipes de l'IN2P3 ont dû faire face au début de leur engagement dans Fermi a été de ne pas avoir de label spatial, ce qui les a mises potentiellement dans une situation d'infériorité politique et décisionnelle. L'aventure Fermi a certainement contribué à changer la situation, tant sur le plan technique que scientifique. Il est très probable par exemple que l'interaction avec le CNES se ferait sur d'autres bases aujourd'hui qu'à l'époque.

8. Conclusion

Fermi a été une des premières missions spatiales de l'IN2P3. Les caractéristiques de l'instrument, qui est pleinement un détecteur de physique des particules, ont fait de cette

mission une porte d'entrée idéale dans ce domaine. Les compétences expérimentales des équipes de l'IN2P3 ont pu pleinement s'exprimer sur les techniques de reconstruction et de calibration et de contribution aux simulations, ce qui leur a valu une reconnaissance indéniable au sein de la collaboration. Toutes les équipes se sont impliquées dans l'exploitation scientifique des données, avec des responsabilités importantes dans les différents groupes de travail et la coordination de publications majeures. Nous espérons que la couverture unique du ciel au GeV permise par le Fermi-LAT ainsi que sa synergie avec d'autres instruments comme les télescopes Cherenkov au sol, actuels et bientôt CTA, et les observatoires d'ondes gravitationnelles ou de neutrinos perdurera encore longtemps. La fin de la prise de données ne marquera pas la fin de nos activités qui se tourneront alors vers les publications finales et l'oeuvre d'héritage (*legacy papers*). Les compétences acquises, ainsi que la reconnaissance associée, sont déjà mises à profit dans les projets CTA, SVOM, et LSST, et pourront l'être dans un futur proche sur un projet comme AMEGO.

Annexes (ou liens)

A. Liste des responsabilités

(les noms soulignés correspondent aux personnes ayant des responsabilités au moment du lancement.)

Coordinateur-adjoint puis coordinateur de l'analyse : P. Bruel (LLR)

Coordinateur du groupe de travail *Calibration & Analysis* : P. Bruel (LLR), J. Brégeon (LUPM)

Coordinateur du groupe de travail sur les Sursauts Gamma : F. Piron (LUPM), V. Vasileiou (LUPM)

Coordinateur du groupe de travail sur les Sources Galactiques : D. Smith (CENBG), M. Lemoine-Goumard (CENBG)

Coordinateur du groupe de travail sur les Emissions Diffuses : J. Cohen-Tanugi (LUPM)

Coordinateur du groupe de travail sur les Catalogues : B. Lott (CENBG)

Coordinateur du groupe de travail sur les Noyaux Actifs de Galaxie : B. Lott (CENBG), S. Fegan (LLR), D. Horan (LLR)

Responsable des tests sous faisceau au GSI et CERN-SPS : B. Lott (CENBG)

Coordinateur de l'analyse des tests sous faisceau CERN : P. Bruel (LLR)

B. Liste des publications

La liste présente les publications de Catégorie 1 ou 2 dont au moins un des auteurs de contact est membre de l'IN2P3. Cette liste ne reflète qu'une partie de nos contributions au travail de publication, un facteur étant que le nombre d'auteurs de contact est limité à 5. Le total des publications est de 74, dont 45 de Catégorie 1 et 29 de Catégorie 2, comptant 8295 citations. Bien que notre effectif corresponde à moins de 10% des membres de la collaboration, nous avons participé à plus de 20% des publications de Catégorie 1 (publications majeures). Nos publications antérieures au lancement ainsi que les articles de revue sont également présentés.

[Lien vers liste des publications](#)

C. Listes des thèses et post-doctorants

C.1 Thèses

- Calorimétrie et recherche de sources en astronomie spatiale
Régis Terrier 2002, Université Paris VII (Denis Diderot)
- Contribution à l'étalonnage en énergie du calorimètre du GLAST-LAT et qualification des modèles de cascades hadroniques disponible sous GEANT4
Johan Bregeon 2005, Université de Bordeaux 1

- Contribution à la calorimétrie du télescope spatial à rayon gamma GLAST et étude des cascades électron-photon sur le fond diffus extragalactique
Pol d'Avezac 2006, Ecole polytechnique
- Performance du calorimètre du Large Area Telescope de l'observatoire spatial GLAST pour le rejet du fond de protons cosmiques ; Etude d'un modèle de sursauts gamma à composantes leptonique et hadronique et prédiction d'observation avec GLAST
Sylvain Guiriec 2007, Université de Montpellier 2
- Detections of millisecond pulsars with the Fermi Large Area Telescope
Lucas Guillemot 2009, Université de Bordeaux 1
- Pulsar Observations with the Fermi Large Area Telescope
Damien Parent 2009, Université de Bordeaux 1
- Complémentarité de recherche de matière noire dans les galaxies naines sphéroïdes avec les expériences H. E. S. S. et Fermi-LAT
Christian Farnier 2009, Université de Montpellier 2
- Étude et modélisation de noyaux actifs de galaxie les plus énergétiques avec le satellite Fermi
David Sanchez 2010, École polytechnique
- Premières détections de nébuleuses avec le Fermi-Large Area Telescope et étude de leurs pulsars
Marie-Hélène Grondin 2010, Université de Bordeaux 1
- Détection, localisation et étude des propriétés spectrales de sursauts γ observés à haute énergie avec l'expérience Fermi
Veronique Pelassa 2010, Université de Montpellier 2
- Recherche d'association de vestige de supernova et de nuage moléculaire avec H.E.S.S. et Fermi-LAT - Optimisation de l'imagerie gamma
Jérémy Méhault 2011, Université de Montpellier 2
- Variabilité des blazars détectés par le télescope spatial Fermi-LAT Etude de 3C 454.3 et développement d'une méthode de génération de courbes de lumière optimisées
Lise Escande 2012, Université de Bordeaux 1
- Étude de la région de la source non-identifiée HESS J1745-303 avec l'instrument LAT à bord du satellite Fermi
Lola Falletti 2013, Université de Montpellier 2

- Identification des accélérateurs cosmiques : recherche de nébuleuses de pulsars au GeV avec le Fermi Large Area Telescope
Romain Rousseau 2013, Université de Bordeaux 1
- Détection de sept pulsars gamma faibles et contraintes sur le moment d'inertie des étoiles à neutrons avec le Fermi-LAT
Xian Hou 2013, Université de Bordeaux 1
- Etude des performances du télescope gamma Fermi à basse énergie et impact sur la science
Thibaut Desgardin 2015, Université de Montpellier
- The prompt emission of Gamma-Ray Bursts: analysis and interpretation of Fermi observations
Manal Yassine 2017, Université de Montpellier
- Observations de vestiges de supernovæ en coquille avec le Fermi Large Area Telescope
Benjamin Condon 2017, Université de Bordeaux
- Études spectro-morphologiques et multi-longueurs d'onde des vestiges de supernova en gamma et autres sources au TeV
Justine Devin 2018, Université de Montpellier
- New insights on the nature of blazars from a decade of multi-wavelength observations
Janeth Valverde 2020, Ecole Polytechnique/IPP
- Recherche des accélérateurs de protons avec le fermi-LAT et préparation de la science avec CTA.
Arnaud-Rémi Marès (en cours) Université de Bordeaux
- Étude et modélisation des sursauts gamma de Fermi, implications pour SVOM et CTA, et contribution à l'astronomie multi-messagers.
Lorenzo Scotton (en cours), Université de Montpellier

C.2 Post-doctorants

- CENBG : V. Lonjou (2006-2008), M. Dalton (2011-2013, ERC P-WIND, 50% Fermi), J. Méhault (2011-2013, ERC P-WIND, 50% Fermi), H. Laffon (2012-2015, 50% Fermi), J. Devin (2018-, ANR PECORA, 70% Fermi)
- LLR : P. Fortin (2010-2012)
- LUPM : N. Komin (2005-2007, 50% Fermi), V. Vasileiou (2011-2013), M.-G. Bernardini (2017-2018, 30% Fermi), R. Quentin (2017-2019)

D. Liste des partenariats

- Collaborations HESS, VERITAS, Swift
- France
 - CEA Irfu (sources galactiques, tests sur faisceaux, catalogues de sources)
 - INSU-IRAP Toulouse (sources galactiques, catalogues de sources, GRBs)
 - INSU-IAP (GRBs)
 - INSU-Orléans Nançay (pulsars)
 - GANIL (tests sous faisceaux)
 - LPNHE Jussieu (GRBs)
- Etats-Unis
 - NASA (Goddard Space Flight Center, Marshall Space Flight Center)
 - SLAC (*Calibration & Analysis*, tests sur faisceaux, AGN, GRBs, matière noire)
 - Naval Research Laboratory (calorimètre, tests faisceaux, AGN, pulsars)
 - Stanford University (GRBs)
- Italie
 - INFN (tests sur faisceaux, reconstruction, électrons cosmiques)
 - Agence Spatiale Italienne (AGN)
 - INFN/Univ. Trieste (GRBs)
 - Obs. di Brera (GRBs)
- Suède
 - KTH Stockholm (matière noire, AGN, GRBs)
- Allemagne
 - GSI (tests sur faisceaux)
- Afrique du Sud
 - Johannesburg Univ. (GRBs)

Le partenariat avec le SLAC a conduit à 3 mises à disposition sur site (2 séjours d'un an, un autre de 2 ans) de membres du CENBG (D. Smith, B. Lott) et du LLR (P. Bruehl).

E. Avis du groupe Astronomie et Astrophysique du CNES sur Fermi

Les textes qui suivent sont les verbatim des avis rendus par le groupe Astronomie et Astrophysique du CNES sur l'activité Fermi en France.

Revue 2013

Les équipes françaises (AIM, LUPM, IRAP, IPAG, LLR et CENBG) sont fortement impliquées dans l'analyse et l'exploitation des données du LAT. Elles ont notamment des responsabilités dans la production des nombreux catalogues de sources. Dans les années à venir, elles vont continuer à s'impliquer dans les études spectroscopiques des pulsars, la recherche d'émissions transitoires et de sursauts gamma, la recherche de blazars extrêmes, la caractérisation de matière noire dans les halos de matière, dans la recherche et caractérisation des binaires gamma, dans la recherche de traceurs de gaz dans la Galaxie en conjonction avec Planck. La ré-analyse de toutes les données Fermi permet d'obtenir une meilleure résolution angulaire et ainsi de réduire la limite de confusion. L'extension de la mission apporte donc un bénéfice important (plus grand que la racine carrée du temps).

Au vu de la moisson des résultats scientifiques de la mission Fermi, de l'implication des équipes françaises dans la production du catalogue de sources et dans des analyses et résultats scientifiques majeurs, le groupe Astronomie et Astrophysique tient tout d'abord à féliciter les équipes françaises pour la remarquable qualité du travail fourni sur le projet. Il recommande dès lors très fortement au CNES de continuer à soutenir les activités des équipes françaises impliquées dans Fermi sur les deux prochaines années.

Revue 2016

Six laboratoires de l'INSU, de l'IN2P3 et du CEA travaillent sur les sujets suivants : sursauts gamma (GRBs) ; noyaux actifs de galaxies (AGN) et autres galaxies ; matière sombre ; pulsars (PSRs); nébuleuses à vent de pulsar (PWNe), vestiges de supernovae (SNR) et accélération des rayons cosmiques ; mesure du spectre des électrons cosmiques ; analyses à bas niveau.

Le satellite fonctionne toujours de façon nominale après 8 ans d'observation, un taux de publication toujours constant d'environ 60 articles par an et un taux de citation de ses catalogues également constant d'environ 300 par an. La NASA a accepté une prolongation jusqu'en 2018.

Le groupe recommande fortement la poursuite du soutien aux équipes françaises impliquées dans l'analyse des données de Fermi. D'ici SVOM, FERMI a une capacité unique pour les sources transitoires de haute énergie. Les équipes sont fortement impliquées dans la

construction des catalogues et du modèle de l'émission galactique issus des données du LAT. De nombreux pixels étant encore sans signal, la qualité des données évolue en fonction du temps d'observation et non pas encore de la racine carrée du temps d'observation. Le gain scientifique justifie donc la poursuite de cette mission.

Le groupe recommande vivement le soutien d'un CDD de 2 ans dédié à l'intégration du pipeline FERMI sur une Machine Virtuelle et/ou un Conteneur-Logiciel. Conformément à sa ligne de conduite, le groupe souligne que le CNES ne devrait pas financer les frais de publication. Par ailleurs l'accompagnement scientifique en terme de missions et conférences devrait être fonction des ETP et non du nombre de personnes dans les équipes.

Revue 2019

La demande se place dans le cadre du soutien à l'exploitation scientifique du LAT, instrument grand champ de Fermi qui observe tout le ciel toutes les 3 heures entre 20 MeV et 300 GeV. Le LAT est l'un des deux instruments de Fermi, satellite NASA lancé en 2008. Il n'a pas d'équivalent dans cette gamme d'énergie qui est essentiel dans le domaine des phénomènes transitoires violents.

Dans la collaboration Fermi-LAT, les chercheurs de l'IN2P3 contribuent activement à un large champ scientifique incluant GRB, AGN, émission diffuse galactique, pulsars & PWN, SNR ainsi que l'accélération des rayons cosmique et l'amélioration des performances de l'instrument. B. Lott est coordinateur du groupe de travail chargé des catalogues depuis 2015.

La présente demande concerne la participation nécessaire des chercheurs aux réunions de la collaboration, et aux conférences pour diffuser leurs résultats.

En cohérence avec l'une des conclusions du SPS du Havre qui est "mettre la donnée au cœur des missions", le groupe soutient la demande d'accompagnement scientifique lié à l'analyse des données par ce groupe dynamique.