

ASTRONOMIE GAMMA AU LAPP : H.E.S.S./CTA



Le LAPP est investi à tous les niveaux de l'expérience H.E.S.S. : le traitement des données (calibration électronique, reconstruction et méthodes d'analyse multi-variables) ; l'exploitation des données pour l'étude de l'origine du rayonnement galactique avec l'étude des nébuleuses de pulsar, vestiges de supernova, nuages moléculaires, régions de formation d'étoiles, des sites potentiels de concentration de matière noire (ex. les galaxies naines) et également des galaxies satellites de la Voie Lactée ; au niveau technique avec la participation à la deuxième phase du projet (H.E.S.S.-2) avec la construction et installation de la caméra du cinquième télescope. L'équipe s'est également impliquée dans la conception des télescopes de nouvelle génération du futur projet CTA avec des contributions de premier niveau dans les divers domaines de la mécanique, mécatronique, électronique et informatique. Un rôle international important est aussi assuré dans les développements du calcul (logiciel scientifique, technologies grilles et cloud) et la gestion des données de l'observatoire CTA.

L'ÉQUIPE DU LAPP

PHYSICIENS

G. Coignet, A. Fiasson, R. Kossakowski, **G. Lamanna**, G. Maurin, S. Rosier-Lees, J.-P. Vialle

POST-DOCS

N. Komin, D. Sanchez

DOCTORANTS

F. Dubois, J. Masbou, F. Krayzel, C. Trichard, F. Mehrez

EQUIPE TECHNIQUE

C. Barbier, L. Brunetti, M. Cailles, E. Chabanne, F. Chollet Le Flour, P.-Y. David, G. Deléglise, J.-M. Dubois, S. Elles, N. Fouque, N. Geffroy, N. Gignoux, I. Gomes Monteiro, M. Gougerot, R. Hermel, J. Jacquemier, L. Journet, T. Le Flour, B. Lieunard, J.-L. Panazol, J. Prast

STAGIAIRES

Lycée (1), Ingénieur (1)

INTRODUCTION

L'étude du rayonnement gamma de très haute énergie avec les télescopes imageurs Tcherenkov a pour finalité l'exploration des phénomènes cosmiques les plus énergétiques, la compréhension de l'origine des rayons cosmiques, la recherche indirecte de matière noire et de contraintes cosmologiques. Les rayons gamma de très haute énergie (100 GeV à 10 TeV) provenant du cosmos, en interagissant dans l'atmosphère, produisent une gerbe électromagnétique qui est détectée via son émission de rayonnement Tcherenkov. Cette lumière Tcherenkov est alors focalisée par des télescopes, dits « Imageurs Tcherenkov » sur leurs caméras composées de photomultiplicateurs. Avec l'exploitation intensive des expériences H.E.S.S., MAGIC et VERITAS depuis les années 2000, et les perspectives à plus long terme du projet CTA, l'astronomie gamma au sol connaît une période d'intense activité. En dix ans, le nombre de sources détectées au TeV a été multiplié par un facteur 20, avec plus de cent sources connues à ce jour. Ces sources constituent les réservoirs d'énergie et les accélérateurs les plus extrêmes de notre cosmos. H.E.S.S. (High Energy Stereoscopic System, c'est-à-dire système stéréoscopique de haute énergie, ainsi nommé en hommage au physicien autrichien Victor Hess qui a découvert les rayons cosmiques en 1912)

est l'expérience de référence au niveau mondial qui a ouvert une nouvelle fenêtre sur les phénomènes les plus extrêmes de l'Univers, et livre une moisson de résultats remarquables. Depuis janvier 2004, H.E.S.S. comprend quatre télescopes de 15 m de distance focale (H.E.S.S.-1) installés sur un plateau désertique à 1 800 m d'altitude en Namibie. En 2012 l'expérience est rentrée dans sa deuxième phase d'opération, H.E.S.S.-2, avec la mise en fonction d'un cinquième télescope d'une focale d'environ 36 m. Les laboratoires français, et notamment le LAPP, se sont impliqués dans la construction de la caméra de ce cinquième télescope. CTA (Čerenkov Telescope Array) est le projet d'avenir du premier observatoire pour l'astronomie gamma de très haute énergie, dans la gamme de quelques dizaines de GeV à quelques centaines de TeV. CTA est un dispositif de nouvelle génération, avec un gain en sensibilité d'un ordre de grandeur dans un domaine en énergie qui s'est déjà montré si riche, et un élargissement de la gamme en énergie à la fois vers les basses et les hautes énergies, ainsi que des améliorations importantes des résolutions énergétique et directionnelle de détection des gammas. CTA consiste en un réseau de plusieurs dizaines de télescopes au sol. Il est prévu de construire un observatoire dans l'hémisphère sud avec une sensibilité accrue, pour l'exploration du plan galactique, et un deuxième dans l'hémisphère nord, orienté vers les basses énergies pour les sources extragalactiques et la cosmologie.

Dans la configuration de base, les télescopes sont disposés sur un maillage de ~ 100 m, chaque télescope ayant environ 15 m de diamètre. Il est prévu une taille variable pour étendre la couverture spectrale avec par exemple un noyau central de quelques grands télescopes pour les

basses énergies et des télescopes de plus petite taille distribués sur une grande superficie pour les plus hautes énergies. L'étendue du réseau ($\sim 1 \text{ km}^2$) fournit une grande surface de détection, permettant d'atteindre une sensibilité 10 fois meilleure que celle des télescopes actuels, avec une résolution angulaire de 1 à 5 minutes d'arc.

COLLABORATIONS

H.E.S.S.

Le système H.E.S.S. est exploité par la collaboration de plus de 170 scientifiques, à partir de 32 institutions scientifiques et de 12 pays différents : la Namibie et l'Afrique du Sud, l'Allemagne, la France, le Royaume-Uni, l'Irlande, l'Autriche, la Pologne, la République tchèque, la Suède, l'Arménie et l'Australie.

CTA

Le projet CTA est une initiative visant à développer la prochaine génération d'imageurs Tcherenkov au sol. Il servira d'observatoire ouvert à une large communauté astrophysique. Le Consortium CTA se compose de plus de 1 000 membres qui travaillent dans 27 pays : Allemagne, Argentine, Arménie, Autriche, Brésil, Bulgarie, Croatie, République tchèque, Finlande, France, Grèce, Inde, Irlande, Italie, Japon, Mexique, Namibie, Pays-Bas, Norvège, Pologne, Slovénie, Afrique du Sud, Espagne, Suède, Suisse, Royaume-Uni, et aux Etats-Unis.

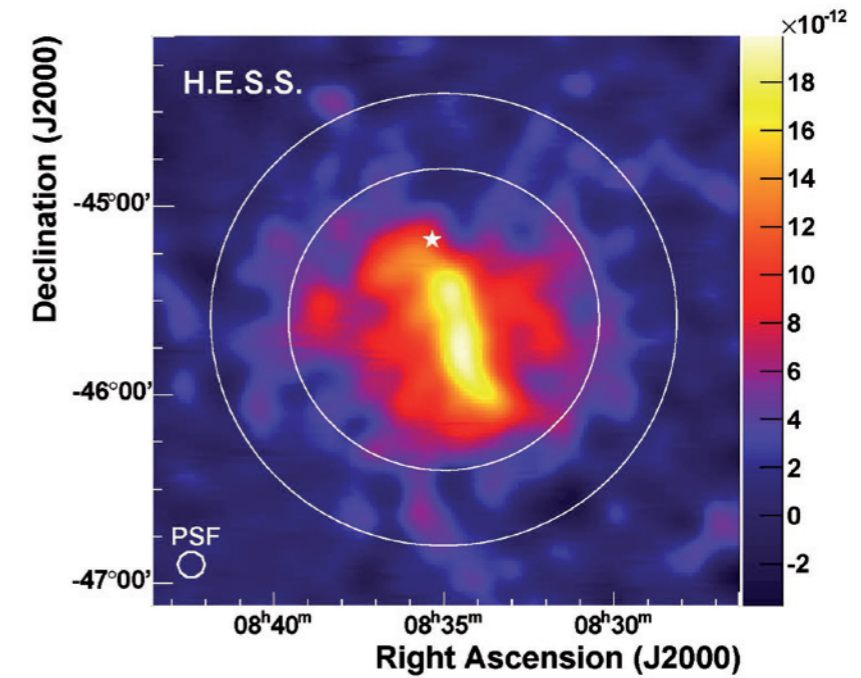


FIGURE 1

Carte d'émission ($\text{cm}^2 \text{s}^{-1} \text{deg}^{-1}$) en gammas mesurée par H.E.S.S. de Vela X, la source la plus étendue jamais étudiée par un système Tcherenkov. L'analyse a été conduite au LAPP avec la méthode d'analyse Xeff.

ACTIVITÉS DE RECHERCHE DU GROUPE DU LAPP DANS LE PROJET H.E.S.S.

Analyse de données

Une reconstruction par minimum de vraisemblance

Afin de déterminer la probabilité qu'un événement détecté soit un photon, ou au contraire une particule issue du fond de rayons cosmiques, deux méthodes multivariées, une analytique basée sur une méthode de minimum de vraisemblance (Xeff) et une autre basée sur les techniques des arbres de décision, ont été développées et appliquées par le groupe aux analyses de H.E.S.S. L'utilisation de ces analyses a montré leur puissance de discrimination. Leur application aux données du cinquième télescope (CT5) est en cours d'implémentation et permettra d'augmenter l'efficacité du détecteur, notamment à basse énergie (~ 30 GeV) où les différences entre gerbes hadroniques et électromagnétiques sont très ténues.

Calibration des données : le système de focalisation de CT5

Le système de focalisation du grand téles-

cope CT5 a été conceptualisé, développé et installé par le LAPP. Il permet au télescope de modifier sa distance de mise au point. Les études de simulation Monte Carlo permettent d'estimer l'effet de cette mise au point et ainsi d'établir le focus optimum pour la détection des gerbes atmosphériques de photon gamma. En effet, ces dernières se développent dans l'atmosphère entre 10 et 30 km d'altitude dépendant de leur énergie et leur angle d'incidence.

Il a été démontré qu'il existe, pour chaque angle, une distance finie de mise au point qui améliore la sensibilité du télescope ainsi que sa résolution angulaire. L'amélioration étant plus importante à basse énergie où l'étalement de la lumière Tcherenkov des gerbes diminue le déclenchement du système d'acquisition. On obtient ainsi un gain compris entre 5 et 10 % de sensibilité et de résolution angulaire.

Origine et nature du rayonnement cosmique galactique

Nébuleuses de pulsars

Dans les nébuleuses de pulsars ou PWN (Pulsar Wind Nebulae), des particules sont accélérées jusqu'aux plus hautes énergies. Les observations de H.E.S.S. ont démontré que les PWN sont responsables pour la majorité de l'émission gamma de très haute

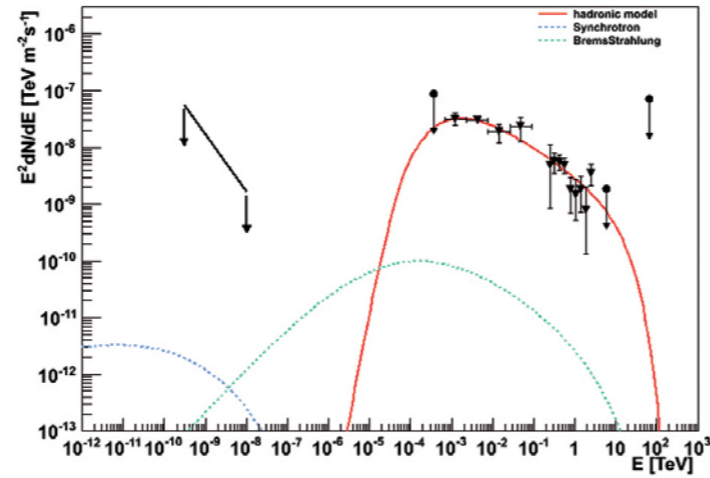


FIGURE 2

Spectre modélisé par une émission hadronique de vestige de supernova G349.7+0.2 vu par H.E.S.S. et par le satellite Fermi.

énergie dans notre Galaxie. Au LAPP nous avons participé à l'étude des différents objets de cette classe : la nébuleuse du Crabe, MSH 15-52, G0.9+0.1, HESS J1616-508, et plus particulièrement Vela X.

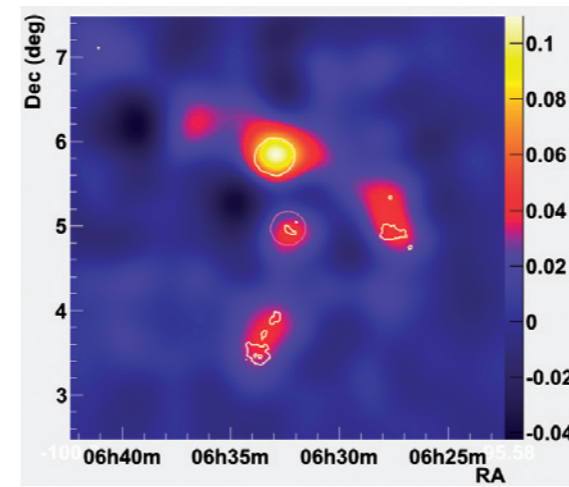
Les PWN se sont révélées être des objets dont la morphologie variée est liée à la fois à leur histoire, aux caractéristiques du pulsar associé, mais aussi aux interactions avec le milieu interstellaire et avec les éjecta du vestige de supernova. L'étude morphologique et spectrale d'un prototype évolutif d'âge moyen, Vela X (figure 1), a permis de mieux comprendre la physique de ces objets : leur évolution dans un milieu interstellaire inhomogène, l'origine inverse Compton de l'émission gamma, les temps de refroidissement des électrons à travers la comparaison avec leur morphologie en rayons X, la rapidité de diffusion des électrons et leur budget énergétique déduit de la dépendance de l'indice spectral des gamma de la distance du pulsar, etc. Cela a fait l'objet d'une publication de l'équipe LAPP au nom de la collaboration H.E.S.S.

Vestiges de supernova et nuages moléculaires

Les restes de supernova en coquille sont actuellement les candidats privilégiés à l'accélération de rayons cosmiques jusqu'à des énergies de l'ordre du PeV (1 000 TeV). La détection de plusieurs de ces objets par H.E.S.S., bien qu'elle confirme l'accélération de particules, ne permet pas de confirmer qu'il s'agisse bien d'accélérateurs hadroniques. Une concentration de matière dense, telle qu'un nuage moléculaire, constitue une sonde idéale pour

mettre en évidence la surdensité de rayons cosmiques attendue à proximité immédiate d'un accélérateur. De telles associations accélérateurs-cibles sont fréquentes dans notre Galaxie. H.E.S.S. a observé ces trois dernières années plusieurs d'entre elles et détecté une émission de rayons gamma en provenance des nuages moléculaires.

Une des sources étudiées par le groupe est H.E.S.S. J1923+141, située dans la région de W51. Cette région a été longuement observée à basse fréquence et est connue pour abriter une multitude d'objets. Parmi eux un vestige de supernova en coquille interagit avec un nuage moléculaire géant. Cette interaction est mise en évidence par la présence d'émissions maser du radical OH, indicatrices de la présence de matière choquée après le passage de l'onde de choc associée au vestige de supernova. Une origine possible de l'émission de rayons gamma est l'interaction de hadrons accélérés par le vestige avec la matière du nuage moléculaire. Cette hypothèse est étayée par la détection récente, par le satellite Fermi, d'une source de rayons gamma dans la gamme en énergie du GeV, coïncidant avec celle détectée par H.E.S.S. Une autre source étudiée par le groupe entrant dans cette catégorie est le vestige de supernova G349.7+0.2. Ce vestige observé dans le domaine des ondes radio montre la propagation de l'onde de choc dans un nuage moléculaire. Sa localisation au bord de la galaxie (22 kpc) et sa relative jeunesse (2 800 ans) montre également que ce choc est très fort rendant a priori les processus d'accélération efficaces. Ses caractéristiques en font le vestige de



supernova le plus lointain observé en astronomie gamma.

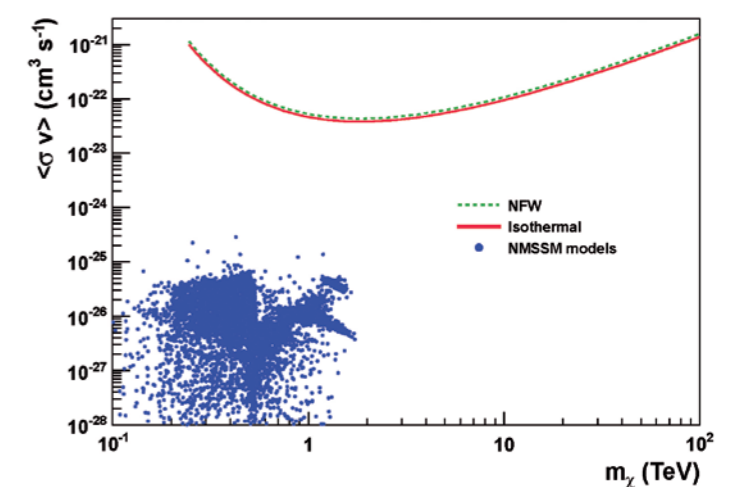
Une analyse originale a été menée en rayons gamma de très haute énergie en utilisant les données de l'expérience H.E.S.S. (figure 2) ainsi qu'avec les données publiques à plus basses énergies du satellite Fermi. L'analyse a pu exclure l'origine purement leptonique de ce rayonnement.

Région de formation d'étoiles

Dans le domaine de l'astronomie gamma galactique, le groupe se consacre également à l'étude des amas d'étoiles. Ces objets astrophysiques sont intéressants à plus d'un titre : l'énergie mécanique libérée par les vents stellaires occasionne l'apparition d'ondes de choc qui sont potentiellement des sites d'accélération de particules conduisant à une émission gamma. De plus, leur contribution dans l'origine des rayons cosmiques peut être importante mais reste encore à évaluer.

Notre étude s'est focalisée d'abord sur quelques cas prometteurs d'amas d'étoiles massifs. Une émission gamma a pu être montrée pour deux d'entre eux : NGC 2244 (figure 3) et NGC 6618. Ce sont deux amas d'étoiles massifs très jeunes encore intégrés au nuage moléculaire géant qui leur a donné naissance.

Une étude systématique théorique et phénoménologique sur ce type d'amas d'étoiles est engagée, l'objectif étant de montrer la contribution des vents stellaires dans l'accélération de particules chargées. Nous avons élaboré une modélisation de l'émission gamma attendue et



construit un catalogue d'amas prometteurs sur cette base. Concernant l'analyse des données, ces objets étant pour la plupart brillants en optique, une étude du bruit de fond du ciel optique est en cours. Pour l'heure, aucune corrélation directe n'a été mise en évidence.

Recherche de matière noire

La recherche indirecte de matière noire consiste à profiter du fait que nous vivons probablement dans un halo de WIMPs (Weak Interacting Massive Particle). Les annihilations de ces particules ayant eu lieu dans l'Univers primordial seraient toujours à l'œuvre avec un taux qui dépend de la densité de matière noire au carré ρ^2 . Les produits de ces annihilations constituent ainsi une source non conventionnelle de rayonnement cosmique. Tout l'enjeu de la recherche indirecte consiste donc à séparer cette composante exotique des signaux astrophysiques conventionnels.

La recherche se fait préférentiellement dans les canaux où la proportion de signal exotique est grande : les neutrinos ou l'antimatière (positrons, antiprotons et anti-deutrons). Mais il est également possible de détecter les photons de haute énergie provenant de cibles potentielles et abondants en matière noire, comme le centre de notre galaxie. Cela nécessite cependant une grande sensibilité expérimentale afin d'éliminer le fond astrophysique. L'équipe du LAPP s'est consacrée à la recherche indirecte de matière noire en observant des cibles alternatives : les galaxies naines satellites de la Voie Lactée et plus particulièrement la galaxie naine du Sagittaire.

FIGURE 3

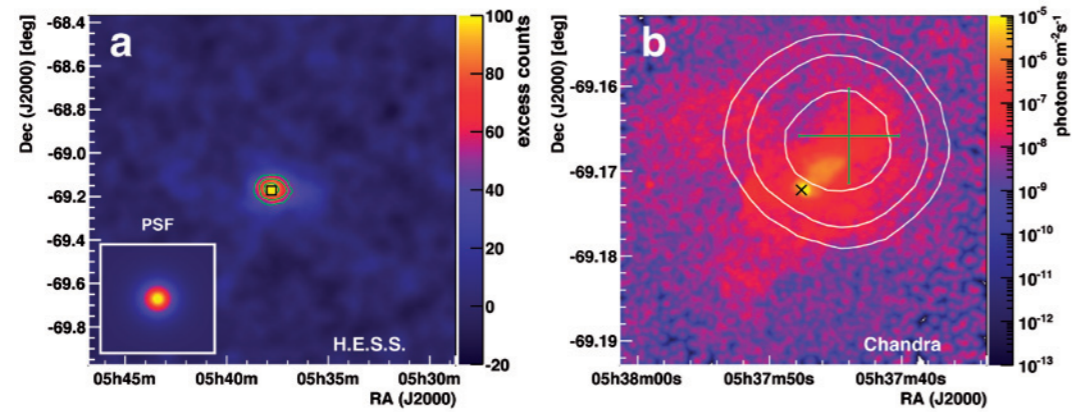
NGC 2244 observé par H.E.S.S. (cercle violet).

FIGURE 4

Limite supérieure (95 % C.L.) de la section efficace d'annihilation pondérée par la vitesse, en fonction de la masse des particules WIMP obtenue à partir de 90 heures d'observations de la galaxie naine du Sagittaire.

FIGURE 5

Flux provenant du grand nuage de Magellan observé par en rayon gamma au TeV par H.E.S.S. (a) et en rayons X par Chandra(b).



Plus de 90 heures d'observation par les télescopes H.E.S.S. ont permis de produire la courbe d'exclusion d'un signal gamma de très haute énergie, la plus contraignante de toutes les galaxies naines observées à ce jour par H.E.S.S. (figure 4).

Le grand nuage de Magellan (LMC)

Le Grand Nuage de Magellan (LMC, Large Magellanic Cloud) est une galaxie satellite de la Voie Lactée, située à une distance de 48 kpc. Le LMC a été observé par les télescopes H.E.S.S. dès 2004. A ce jour, l'exposition totale sur cette source atteint 183 h, faisant du LMC une des sources les plus observées par H.E.S.S. (voir figure 5). Le groupe du LAPP s'est fortement engagé sur l'analyse de ces données depuis 2009. Dans ces données, une première source a été découverte : la nébuleuse de pulsar N 157B. Il s'agit de la première découverte de rayons gamma provenant d'une nébuleuse de pulsar extragalactique. Cette découverte a été présentée par le groupe à plusieurs conférences internationales. La communication de ces résultats à la conférence ICRC 2011 a d'ailleurs été subventionnée par le comité français de physique de l'Académie des Sciences.

Grâce à une modélisation multi-longueur d'ondes, nous avons estimé la contribution en énergie que la nébuleuse fournit à l'accélération des électrons. Cela a permis d'en déduire la période de rotation du pulsar central à sa naissance. Avec une période inférieure à 10 ms ce pulsar est un des plus rapides. L'étoile progénitrice

devait donc être très massive (supérieur à 15 masses solaires), à la limite de la formation d'un trou noir. Un autre objectif de l'étude de la région du LMC était le jeune vestige de supernova SN 1987A. Aucune émission de cet objet n'a été détectée à ce jour. Les bornes supérieures sur l'émission gamma ont été estimées.

Projets techniques

Mécanique des déplacements de la caméra

La caméra du cinquième télescope est constituée d'un peu plus de 2 000 photomultiplicateurs avec leur électronique de lecture associée. C'est un cube d'environ 2,5 m de côté et pesant 2,75 tonnes qui n'est pas hermétique (à l'eau ou la poussière) ; il est donc nécessaire de l'abriter, ce qui rend aussi les tâches de maintenance plus aisées car la caméra est inclinée à -32° lorsque le télescope est en position garage. La caméra est à au moins 5 m du sol quand le télescope est bloqué en position repos, rendant difficile la solution d'abri fixe avec des dimensions raisonnables, solution qui a été retenue pour les abris des caméras de H.E.S.S.-1. Dans ce contexte, le défi du projet mécanique du LAPP était de proposer un système automatique, le plus léger possible, dans un temps court, capable :

- de fixer et verrouiller la caméra dans le nez du télescope avec la possibilité de régler la focalisation sur une distance maximale de 20 cm ;
- de positionner ou retirer la caméra du



FIGURE 6

Le chariot de déchargement pose la caméra sur un chariot de stockage.

télescope (système de chargement/déchargement) et de la remplacer par un clone de taille, poids et centre de gravité identiques à la caméra.

Au début 2006, un groupe de travail au LAPP a été mis en place pour commencer les études du système. Elles se sont étendues sur une période de 4 ans. Le système de focalisation et le système d'échange des caméras ont été acceptés lors d'une réunion de collaboration en avril 2007. Le projet mécanique comprend deux sous-projets, mêlant étroitement les parties mécanique, automatisme et informatique :

- Le système de focalisation (déplacement dans le nez du télescope). Ses spécifications permettent de modifier la distance entre les miroirs et la caméra de 35,97 m à 36,17 m avec une précision de 0,05 mm. Lors du chargement et déchargement de la caméra pour différentes maintenances, ces performances sont conservées grâce à un système pneumatique de loquets. L'ensemble étant contrôlé par une application Java développée par les informaticiens du laboratoire. Tous ces éléments permettent au télescope CT5 de modifier sa distance de mise au point.
- Système de débarquement-transfert entre le télescope et l'abri. Le système d'échange des caméras est composé d'un chariot de déchargement et de 2 chariots de stockage. Ces derniers permettent de stocker les caméras dans un abri afin d'effectuer les opérations de maintenance. Ils se dé-

placent suivant un seul axe et sur une distance de 6 mètres par l'intermédiaire de 2 roues motorisées. La cinématique du chariot de déchargement est composée de 5 axes dont 4 sont motorisés. Il est d'abord constitué d'une base se déplaçant sur un axe horizontal (20 mètres) et d'un plateau pivotant. La partie supérieure permet le positionnement au droit du télescope. Cette partie est composée d'une translation et d'un levage, tous les 2 motorisés par une vis à billes. Le dernier axe est un réglage manuel fin pour permettre de rattraper les défauts angulaires. L'ensemble de ces mouvements est contrôlé par un automate. Les utilisateurs interagissent sur le système via une interface appelée SUPERVISION développée au laboratoire, comme la partie automatisme.

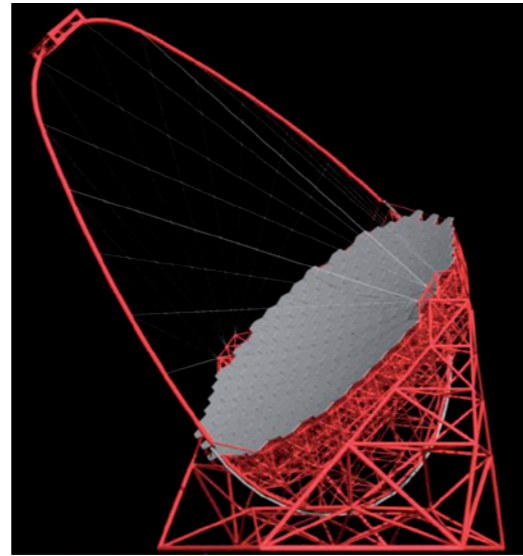
Chaque axe motorisé des chariots est équipé d'un codeur permettant de mesurer la distance définie par le programme. Des capteurs de différents types sont installés sur le système afin de contrôler/commander les mouvements. Les positionnements de ceux-ci sont primordiaux dans la fiabilité du système.

Système de sécurité de la caméra

Le LAPP est responsable de la partie sécurité et « slow control » de la caméra de CT5. La partie « slow control » comprend le suivi continu des paramètres environnementaux de la caméra ainsi que le contrôle d'un certain nombre d'éléments comme les portes, les LED (Light Emitting Diodes)

FIGURE 7

Le Large Size Telescope – LST de CTA.



de calibration, les ventilateurs. La partie sécurité intègre un système intelligent de surveillance de différents éléments de la caméra et réagit rapidement en cas de défaillance d'un sous-système.

D'un point de vue matériel, ce système comporte une carte électronique principale et trois types de cartes annexes situées dans un même châssis compact PCI (Peripheral Component Interconnect) : la carte LEDs pour la calibration de la position du plan focal, les cartes de températures et la carte de commande des ventilateurs. La carte principale centralise les différentes informations du slow control (photodiodes, température, ventilateurs, HV (High Voltage) statut, calibration LEDs) et intègre la logique de contrôle. Le système complet a été conçu, réalisé et testé au LAPP. Aujourd'hui le système est en fonctionnement sur site.

ACTIVITÉS DE RECHERCHE DU GROUPE DU LAPP DANS LE PROJET CTA

Les perspectives et les études de physiques

Les recherches les plus récentes et le projet scientifique futur de l'équipe du LAPP s'inscrivent dans la perspective scientifique offerte par l'astronomie gamma de très haute énergie avec l'observatoire CTA. Les observations aux énergies de seuil (~ 30 GeV) sont les plus critiques pour le

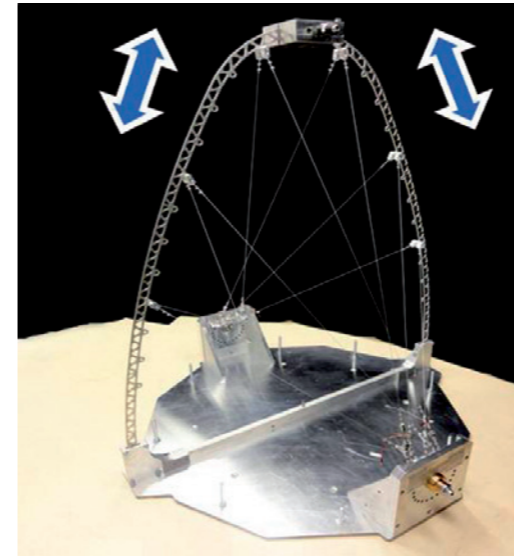
fonctionnement des imageurs Tcherenkov, en raison de la présence d'une fraction plus importante d'électrons cosmiques, des fluctuations de la géométrie et de l'intensité des images qui rendent la réduction du fond hadronique plus difficile, et des effets géomagnétiques plus importants dont dépend l'évolution des gerbes atmosphériques. Mais les observations à quelques dizaines de GeV sont aussi les plus importantes pour les objectifs scientifiques du LAPP :

- recherche de matière noire ;
- origine du rayonnement galactique (physique des pulsars, supernovæ et nuages moléculaires) ;
- étude de population des sources extragalactiques, i.e. NAG (Noyaux Actifs de Galaxie) et GRB (Gamma Ray Burst) pour étudier l'histoire de la formation stellaire, l'évolution du fond de lumière extragalactique (EBL), les possibles signatures de violation de l'invariance de Lorentz.

Le projet de conception et réalisation du télescope de grande taille (LST) est donc le projet majeur autour duquel gravite le programme de recherche et les développements techniques du LAPP.

La mécanique

Le regroupement de recherche international actuellement engagé dans l'étude du design du LST (MPI-Munich, LAPP-Anancy, IFAE-Barcelone, CIEMAT-Madrid, INFN-Italie et le CTA-Japon) travaille sur un prototype inspiré par les télescopes de MAGIC et

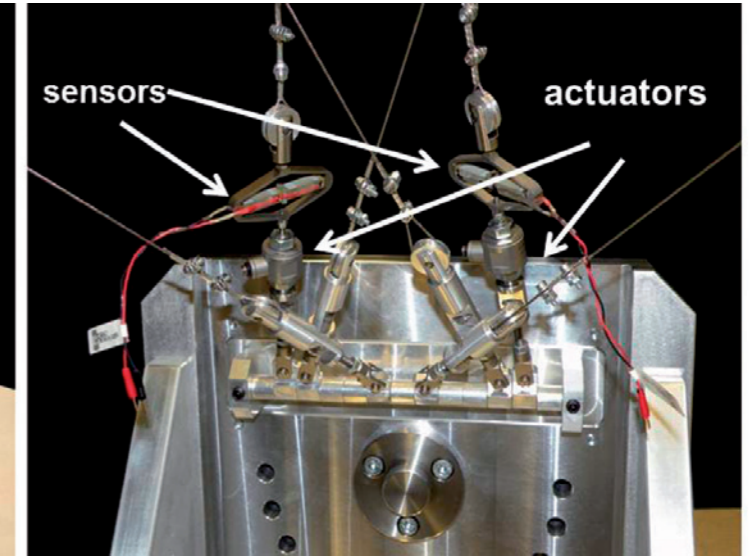


caractérisé par un miroir parabolique de 23 m de diamètre et une distance focale de 28 m. Les défis majeurs du programme LST sont liés à la nécessité de réaliser un instrument techniquement très performant :

- léger (~ 50 tonnes) pour le repositionner rapidement (moins de 20 s pour 180° de rotation soit une vitesse de 10 m/s) en réponse aux alertes des événements rares (i.e. éruptions de GRB ou de NAG) ;
- un grand champ de vue pour l'étude de sources étendues (i.e. les vestiges de supernova et la nébuleuse de pulsars) ;
- stable pour garantir une très bonne résolution angulaire (point spread function : $PSF < 0.1^\circ$).

Dans ce contexte international, le groupe du LAPP a su se distinguer par des propositions importantes de recherche et de développement technique, notamment le développement d'éléments mécaniques en matériaux composites (i.e. structures en fibres de carbone), afin d'optimiser un design de poids contenu mais stable statiquement et dynamiquement.

Depuis 2009, l'équipe est impliquée dans l'étude et la réalisation des structures mécaniques hautes du télescope, de l'arche des télescopes LST et de l'interface avec la caméra, avec des problématiques liées à l'application de matériaux composites. Les premiers résultats de cette phase, basés sur un design modulaire, ont été obtenus en 2010 et présentés à la collaboration CTA (et détaillés dans le « Baseline Design Document » rédigé en 2011). L'arche de



taille trop importante (28 m) ne pourra pas être réalisée en une seule pièce monolithique. La structure parabolique de l'arche, entièrement en fibres de carbone, sera composée de segments tubulaires connectés entre eux. Le design résulte d'une étude approfondie de calculs numériques tenant compte des charges et des résistances des matériaux (i.e. traction, compression et flexibilité), critiques dans la phase de moulage de la pièce de jonction, dans le choix des éléments tubulaires, et pour les procédures d'assemblage et de collage.

La validation et la certification des prototypes ont fait l'objet d'un contrat avec des partenaires industriels et ont été financées par la Commission Européenne (projet FP7-CTA-Preparatory-Phase).

La mécatronique

Dans la configuration actuelle, le design de l'arche permet de satisfaire toutes les spécifications statiques et dynamiques du télescope. Avant d'aboutir à cette configuration, une étude de R&D en mécatronique a été menée par l'équipe : la stabilisation active des structures pour l'optimisation de l'alignement optique du système caméra-miroir, puis sa validation grâce à un prototype et à la construction d'un système d'amortissement vibratoire.

Lorsque le LST est soumis à un vent turbulent ou lors d'une phase de pointé, les modes de vibration de la structure porteuse de la caméra peuvent être excités. Ces vibrations provoquent un déplacement

FIGURE 8

Maquette d'arche stabilisée par le système mécatronique de capteurs et d'actionneurs de forces.

de la caméra par rapport à sa position nominale, retardant la prise de données (voire l'empêchant totalement en cas de vent trop fort ou trop turbulent). L'amortissement utilisé pour cette étude est appelé « Integral Force Feedback » (IFF). Pour le mettre en œuvre, il est nécessaire d'intégrer à la structure à amortir un actionneur combiné à un capteur de force. Cette technique s'adapte parfaitement aux structures câblées des télescopes de CTA et réduit sensiblement les vibrations. Cela permet également d'améliorer la précision du pointé et donc la résolution angulaire des télescopes. Une simulation a été réalisée afin de valider les différentes procédures de mise en œuvre de l'IFF.

En 2010, un démonstrateur à échelle réduite a été réalisé. Il s'agissait d'une structure haubanée supportant une fausse caméra et incluant les capteurs, les actionneurs, ainsi que l'électronique permettant de les mettre en œuvre. Tous les tests ont été accomplis avec succès : les mesures montrent que nos algorithmes permettent en quelques secondes de stabiliser la caméra.

L'expérience acquise dans la réalisation du système de débarquement de H.E.S.S.-2 nous a également permis d'obtenir la responsabilité du projet de mécatronique qui contrôle et commande les télescopes LST de CTA.

Le futur « drive system » (2 axes de rotation) devra répondre à différentes exigences :

- synchronisation des axes à plusieurs moteurs : ce type de fonctionnement a été mis en œuvre sur le projet H.E.S.S. (roues sur rails), néanmoins les jeux mécaniques seront moindres dans le cas du télescope LST et son comportement reste à être étudié. Des contraintes d'ajustement pourront être mises en place.

- sécurisation des mouvements via l'intégration d'un automate : solution qui n'a jamais été mise en œuvre au LAPP.
- régénération d'énergie sur le réseau électrique lorsqu'un moteur devient générateur de courant : un aspect qui est très important au sein du projet CTA, compte-tenu des puissances mises en jeu et du déploiement de l'expérience sur un site désertique.
- optimisation des trajectoires : le télescope étant un système inertiel, un déplacement donné peut être réalisé suivant différentes combinaisons de trajectoires et un compromis doit être trouvé entre puissance moteurs et temps de déplacement.

Les 4 télescopes LST sont à intégrer au sein d'une architecture de grande envergure nommée array control au sein de laquelle devront cohabiter tous les télescopes, mais aussi les stations météo, les systèmes de calibration, le pilotage des miroirs... L'équipe a établi l'architecture globale de contrôle et développe l'instrumentation d'automates pour le contrôle des moteurs du LST.

L'informatique de contrôle

Une étape de contrôle informatique a demandé un investissement particulier de l'équipe pour le développement de solutions innovantes qui ont été retenues par la collaboration internationale CTA. Les objectifs du projet informatique étaient :

- l'homogénéisation des accès aux matériels et aux instruments ;
- la standardisation et la hiérarchisation des informations pour la surveillance et le contrôle du réseau de télescopes ;
- l'optimisation des communications entre l'environnement logiciel, les automates programmables et les autres dispositifs embarqués.

Le protocole et le logiciel développés, actuellement en cours de tests avec le système mécatronique du LAPP, font référence au nouveau standard OPC/UA (OPC Unified Architecture).

L'électronique

Dans le contexte plus large de « NectarCAM », un prototype français de caméra Tcherenkov de nouvelle génération, le LAPP s'implique dans deux projets :

- le développement d'un système intelligent pour la surveillance et le pilotage des différents sous-systèmes de la caméra : paramètres d'environnement, portes, refroidissement, alimentation, systèmes de calibration, etc. Ce système inclut les fonctions de sécurité de la caméra en cas de défaillance d'un sous-système.
- l'étude, débutée en 2011, de nouveaux photo-détecteurs SiPMs, plus sensibles que les PM classiques qui devraient améliorer les performances des LSTs aux énergies de seuil (~ 50 GeV).

L'équipe du LAPP a d'abord pérennisé le banc test de photo-détection de la caméra de CT5 pour la caractérisation des prototypes SiPMs de divers fabricants. Puis elle a démarré le projet de micro-électronique de réalisation d'un circuit intégré ASIC de lecture et de pré-amplification des SiPMs. Celui-ci répond aux spécificités des LSTs et des MSTs et intègre le projet NectarCAM.

Le calcul et la gestion des données du futur Observatoire

CTA se propose d'être le premier observatoire public dédié à l'étude du rayonnement gamma de très haute énergie. Son programme d'observations ainsi que l'exploitation de ses données seront ouverts à la communauté scientifique mondiale. Il est donc nécessaire de développer des outils informatiques inscrits dans la tradition et le savoir-faire de

l'IN2P3 : la maîtrise de la gestion de grand flux de données des télescopes (une dizaine de Pétaoctets par an), la réalisation d'une architecture de calcul, d'archivage et de services associés, capable de fournir à la communauté scientifique un accès à tous les niveaux de données, à tous les logiciels d'analyse, aux ressources de calcul partagées ainsi qu'aux outils d'analyse multi-longueur d'ondes d'astrophysique.

Au niveau international, l'équipe du LAPP a conçu puis assuré le démarrage, la mise en œuvre et la coordination du projet international « CTACG - CTA Computing Grid » avec pour finalités :

- la production et la gestion de données de simulation Monte Carlo via la grille EGI ;
- l'étude de faisabilité de la gestion de données du futur observatoire CTA via les technologies de grille, de plateformes intégrées et de réseaux mondiaux de recherche.

Après trois ans d'activités (2009 à 2012), le bilan du projet CTACG est extrêmement positif :

- il a été présenté dans des conférences internationales ;
- il a été proposé et approuvé par un financement (CDD post-doc de 3 ans dans l'équipe du LAPP) en réponse à un appel d'offre international ASPERA en novembre 2009 ;
- ceci est une réussite de l'application Grid dans un contexte différent de celui du LHC. Le comité scientifique de GIS France Grilles a décerné à CTACG le second prix à l'occasion des premières rencontres scientifiques à Lyon, le 19 septembre 2011.

Ces dernières années, CTACG est devenu une partie du projet plus vaste « CTA Data Management » dont le consortium international CTA nous a confié la coordination. L'équipe se consacre à la fois à la direc-

tion de ce projet important ayant pour but le développement global du système de gestion des futures données de CTA, voire la réalisation du CTA Data Centre, une des priorités nationales du consortium CTA-France, ainsi qu'à l'étude et au développement du logiciel scientifique. L'équipe s'intéresse notamment au Framework de programmation, aux méthodes de reconstruction utilisant le calcul parallèle et les processeurs graphiques GPU, et au nouveau paradigme d'archivage des données via des systèmes de base de données standard et/ou non-rationnelles.

PUBLICATIONS IMPORTANTES

- [1] *A multivariate analysis approach for the imaging atmospheric Cherenkov telescopes system H.E.S.S.*, F. Dubois, G. Lamanna and A. Jacholkowska, *Astroparticle Physics* 32 (2009) 73–88
- [2] *HESS J0632+057: A new gamma-ray binary?* J. A. Hinton, J.-L. Skilton, S. Funk, J. Brucker, F. A. Aharonian, G. Dubus, A. Fiasson, Y. Gallant, W. Hofmann, A. Marcowith, and O. Reimer, *Astrophys. J. Letters* 690 (2009) L101–L104
- [3] *Optimization of multivariate analysis for IACT stereoscopic system*, A. Fiasson, F. Dubois, J. Masbou, G. Lamanna, S. Rosier-Lees, *Astroparticle Physics* 34 (2010) 25–32
- [4] *Design concepts for the Cherenkov Telescope Array CTA*, The CTA Consortium, 2010, arXiv:1008.3703v1
- [5] *The GeV-TeV Galactic gamma-ray diffuse emission. I. Uncertainties in the predictions of the hadronic component*, T. Delahaye, A. Fiasson, M. Pohl, and P. Salati. *Astronomy & Astrophysics* 531 (2011) A37
- [6] *Supernova-enhanced Cosmic-Ray Ionization and Induced Chemistry in a Molecular Cloud of W51C*, C. Ceccarelli, P. Hily-Blant, T. Montmerle, G. Dubus, Y. Gallant and A. Fiasson, *Astrophys. J. Letters* 740 (2011) L4
- [7] *Simultaneous multi-wavelength campaign on PKS 2005-489 in a high state*, H.E.S.S. collaboration, A. Abramowski et al., *Astronomy & Astrophysics* 533 (2011) A110
- [8] *Probing the extent of the non-thermal emission at TeV energies from the Vela X region with H.E.S.S.*, H.E.S.S. collaboration, A. Abramowski, G. Lamanna et al., *Astronomy & Astrophysics* 548 (2012) A38
- [9] *Nonthermal X-rays from low-energy cosmic rays: application to the 6.4 keV line emission from the Arches cluster region*, V. Tatischeff, A. Decourchelle, G. Maurin, *Astronomy & Astrophysics* 546 (2012) A88
- [10] *Discovery of gamma-ray emission from the extragalactic pulsar wind nebula N 157B with H.E.S.S.*, H.E.S.S. Collaboration, A. Abramowski et al., *Astronomy & Astrophysics* 545 (2012) L2

THÈSES ET HABILITATION À DIRIGER DES RECHERCHES

G. Lamanna, *Etude du rayonnement cosmique de haute énergie : contribution à sa mesure et à la recherche de son origine*, HDR soutenue le 16 novembre 2009

F. Dubois, *L'astronomie gamma de très haute énergie avec H.E.S.S. Développement d'une analyse multi-variables et application à l'étude de nébuleuse de pulsars*, thèse soutenue le 18 décembre 2009

J. Masbou, *Etude de sensibilité de H.E.S.S.-2 en dessous de 300 GeV et recherche indirecte de matière noire dans les données de H.E.S.S.*, thèse soutenue le 29 Septembre 2010

PRÉSENTATIONS DANS DES CONFÉRENCES

F. Dubois, *H.E.S.S. observation of the Vela X nebula*, Conference ICRC 2009, Łódź, Pologne

A. Fiasson, *VHE gamma-ray emission from the W51 region*, Conference ICRC 2009, Łódź, Pologne

G. Masbou, *The H.E.S.S. II simulated performance*, Conference ICRC 2009, Łódź, Pologne

A. Fiasson, *SNR and molecular clouds*, 44th Rencontres de Moriond 2009, La Thuile, Italie

G. Lamanna, *Indirect Dark Matter search with H.E.S.S.*, PATRAS Workshop on Axions, WIMPs and WISPs, Mikonos, Grèce 2011

G. Masbou, *Re-observation of the Sagittarius dwarf galaxy with H.E.S.S.*, Conference ICRC 2011, Beijing, Chine

N. Komin, *H.E.S.S. observations of the Large Magellanic Cloud*, Conference ICRC 2011, Beijing, Chine

N. Komin, *Search for Galactic Cosmic Ray Sources with H.E.S.S.*, 2011, 23rd Rencontres de Blois, France

N. Komin, *TeV Gamma-Ray Emission from the extra-Galactic PWN N 157B / PSR J05367-6910*, The Cosmic Kaldeidoscope Workshop 2012 Kruger Park, South Africa

POUR EN SAVOIR PLUS

Site de l'expérience HESS au LAPP :

http://lappwiki01.in2p3.fr/HESS-lapp/index.php/Main_Page

Site de l'expérience HESS :

<http://www.mpi-hd.mpg.de/hfm/HESS/>

Site du projet CTA au LAPP :

<http://lappwiki01.in2p3.fr/CTA-FR/doku.php>

Site de l'observatoire CTA : <http://www.cta-observatory.org>

Page de l'article « Astronomie gamma : le ciel révélé aux très hautes énergies » :

http://www.in2p3.fr/physique_pour_tous/informations/articles/2006/astro_gamma.pdf