

# HESS : Etude des accélérateurs cosmiques

L'expérience HESS détecte le rayonnement gamma de très haute énergie pour mieux comprendre les mécanismes de production et de propagation des rayons cosmiques. Les quatre télescopes qui la compose sont opérationnels depuis janvier 2004. Ils sont situés sur un plateau Namibien de haute altitude. Le groupe du LAPP a rejoint la collaboration HESS fin 2005 et participe à la construction de la caméra du cinquième télescope. Les activités de recherche de ce groupe seront détaillées dans ce document.

## Introduction

L'expérience HESS détecte le rayonnement gamma de très haute énergie (100 GeV à 10 TeV) pour mieux comprendre les mécanismes de production et de propagation des rayons cosmiques produits dans les sources astrophysiques telles que les noyaux actifs de galaxie, les pulsars, les nébuleuses de pulsar et les restes de supernovae. Les rayons gamma de très haute énergie, en interagissant dans l'atmosphère, produisent une gerbe électromagnétique qui est détectée via l'émission de rayonnement Tcherenkov. Cette lumière Tcherenkov est alors focalisée sur une caméra composée de photomultiplicateurs. Depuis janvier 2004, HESS comprend quatre télescopes de 15 m de distance focale (HESS1) installés sur un plateau désertique à 1 800 m d'altitude en Namibie. Un cinquième télescope d'une focale d'environ 36 m (HESS2) est en cours de construction. Les laboratoires français sont impliqués dans la construction de la caméra de ce cinquième télescope.

### Points forts

- Système autofocus et de déchargement de la caméra de HESS2.
- Sécurité de la caméra.
- Tests de production des photomultiplicateurs.
- Analyse des sources étendues et performances Hess2.

## La collaboration

HESS est une collaboration inter-nationale réunissant 21 laboratoires, dont pour la partie française 5 de l'IN2P3, 3 de l'INSU et l'IRFU. Lors de la réunion de collaboration de l'automne 2008, le LAPP a pu accueillir ainsi plus d'une centaine de collaborateurs.

## Activités de recherche du groupe du LAPP

Le groupe du LAPP a rejoint l'expérience HESS fin 2005. Il a acquis de nombreuses responsabilités techniques dans la construction de la caméra du futur télescope. Le LAPP s'est impliqué dans l'analyse des sources étendues avec HESS1, comme les nébuleuses de pulsar ou les sources potentielles de matière noire.

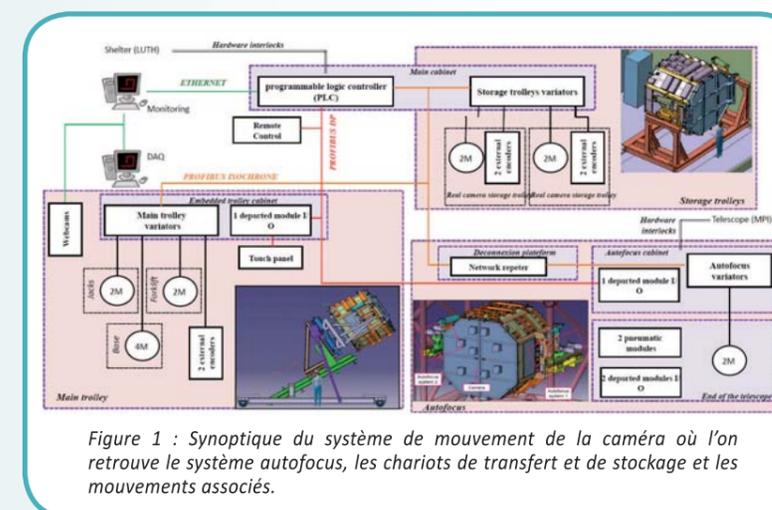


Figure 1 : Synoptique du système de mouvement de la caméra où l'on retrouve le système autofocus, les chariots de transfert et de stockage et les mouvements associés.

Le groupe participe activement à la préparation de l'analyse avec HESS2 en mode mono-télescope : en particulier il a développé des algorithmes de reconstruction de l'énergie des rayons gamma et travaillé sur la discrimination des protons.

## Projets techniques

### Mécanique des déplacements de la caméra

La caméra est constituée d'un peu plus de 2 000 photomultiplicateurs avec leur électronique de lecture associée. C'est un cube d'environ 2,50 m de côté et pesant 2,6 tonnes qui n'est pas hermétique (à l'eau ou la poussière) ; il est donc nécessaire de l'abriter. 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. Dans ce contexte, le défi du projet mécanique du LAPP était de proposer un système automatique le plus léger possible, capable de :

- de fixer et de 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 de retirer la caméra du nez du télescope (système de chargement ou de déchargement).

En septembre 2006, un groupe de travail au LAPP a été mis en place pour étudier les déformations et les contraintes sur la caméra, le télescope et



Figure 3 : Partie inférieure du chariot de transfert avec le plateau pivotant incliné.



Figure 2 : Eléments du système autofocus assemblés sur l'un des côtés du faux nez du télescope. 40 pièces mécaniques constituent le système de focalisation. Les cotes de chaque pièce, définies avec la CAO Catia, ont pu être directement transférées sur la machine à commande numérique lors de leur réalisation.

le système autofocus. Des calculs par éléments finis ont permis de valider le système mécanique proposé par le LAPP, d'optimiser les attaches et points de renforts de la caméra et de satisfaire les contraintes en poids. Ces résultats ont été présentés à la collaboration en avril 2007, laquelle a accepté officiellement le système global d'autofocus et de déchargement. Le projet mécanique comprend trois sous-projets, mêlant étroitement les parties mécaniques et l'automatisme : le système autofocus, les chariots de débarquement et de transfert puis les tests grandeur nature au LAPP. Un synoptique du projet global est détaillé sur la Figure 1.

### Système Autofocus - déplacement dans le nez du télescope :

Le système autofocus a été conçu et entièrement réalisé au LAPP. Il s'agit d'un système pneumatique monté sur 2 ensembles mécaniques fixés sur le nez du télescope. Chaque ensemble est composé de deux parties, l'une étant fixée sur le télescope et l'autre mobile. En juillet 2008, l'autofocus était monté sur le système de test, prêt pour les premiers tests d'automatisme. Le système assemblé sur un des côtés est visible sur la Figure 2.

### Système de débarquement - déplacements en dehors du télescope :

L'étude du chariot de débarquement s'est achevée début 2008. C'est un chariot de 20 tonnes robotisé, long de 6,50 m, large de 4,80 m et haut de 3,50 m, dont on peut séparer les fonctions en deux groupes : la partie supérieure dite « fourche » assure le positionnement de la caméra dans

le télescope et le levage de celle-ci alors que la partie inférieure assure le déplacement sur rails et le levage avec un mouvement de rotation pour se positionner à 35°. La partie inférieure (base et plateau pivotant) est complète depuis février 2009. Les premiers tests de mouvement sur rails se sont déroulés en novembre 2008. Cet ensemble est visible sur la Figure 3. L'étude des chariots de transfert dans l'abri a été finalisée début 2009. Leur réalisation est prévue courant 2009.

### Système de tests :

Un ensemble de tests comportant un « faux nez » (4 m sur 4 m) et une « fausse caméra » (copie conforme en dimension et poids de la caméra) est opérationnel au LAPP depuis le printemps 2008. La fausse caméra a été réalisée au LLR et lestée au LAPP. Le « faux nez » du télescope, reproduisant le nez du quadripode de HESS2, a été conçu au LAPP. Il est placé à l'extérieur du laboratoire. Il peut prendre plusieurs positions : de la station zénithale (Figure 4) à l'horizontale en passant par des stations intermédiaires.

### Banc test des PMs

Un banc sous acquisition LABVIEW a été monté au LAPP pour qualifier 1000 photomultiplicateurs. Ce banc comprend une partie mécanique (caissons sources lumineuses et banc), une partie optique, une partie électronique et une partie informatique. Le signal du photon unique a été observé dès les premiers tests. Le logiciel ROOT a pu être interfacé sur l'acquisition, permettant d'exploiter les données de mesure de manière standard (pour un physicien) tout en bénéficiant de la convivialité de LABVIEW. Les ingénieurs du LAPP ont pu cloner leur système (électronique et informatique) sur le banc du CESR (Centre des études spatiales du rayonnement de Toulouse) avec lequel nous avons étroitement collaboré dans les mises au point optique et mécanique du banc du LAPP. Le banc était opérationnel fin 2007, en lumière blanche et UV. Les tests se sont déroulés au printemps 2008, sur 4 mois, en parallèle avec les laboratoires du LPNHE et du CESR. L'acquisition complètement automatisée a permis d'effectuer l'ensemble des mesures en moins de 15 minutes par lot de 8 photomultiplicateurs.

### Système de sécurité de la caméra

Le LAPP a la responsabilité de la sécurité de la

caméra (déplacements et "slow control").

L'architecture et le partage des tâches entre automatisme (commande des automates par un système commercial) et informatique (supervision, transfert et exploitation des données, analyse de risques) ont été finalisés début septembre 2007. Les parties monitoring et sécurité de la caméra seront développées et testées dans l'environnement officiel de l'expérience.

Le système de sécurité électronique de la caméra appelé aussi "slow control" comporte une carte principale et trois types de carte annexe dans un même châssis : la carte LEDs pour la calibration de la position du plan focal, les cartes de températures et la carte de commande des ventilateurs. Le système complet a été conçu, réalisé et testé au LAPP. La carte principale centralise les différentes informations du slow control (photodiodes, température, ventilateurs, HV statut, calibration LEDs) et intègre la logique de contrôle. Les cartes de températures (principale et ventilateur) fonctionnent et sont intégrées depuis

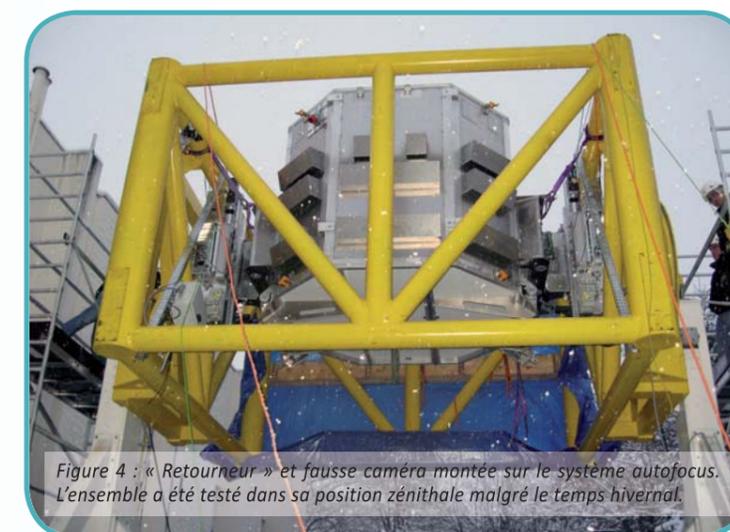


Figure 4 : « Retourneur » et fausse caméra montée sur le système autofocus. L'ensemble a été testé dans sa position zénithale malgré le temps hivernal.

novembre 2008 à la mini caméra contenant 20 tiroirs de photomultiplicateurs. La dernière carte LEDs est prête pour les tests au MPI Heidelberg. L'intégration finale de l'ensemble des cartes du slow control dans la caméra HESS2 est prévue pour l'été 2009.

## Analyse de physique et résultats

Connaître la nature des rayons cosmiques primaires accélérés (leptons ou hadrons) est l'un des enjeux scientifiques principaux de HESS. Cela peut se faire en étudiant précisément la morphologie des sources, leur spectre en énergie

et en combinant les observations dites multi-longueurs d'onde. L'étude morphologique des sources étendues nécessite une sensibilité à des flux faibles (quelques % de la Nébuleuse du Crabe). L'équipe du LAPP s'est impliquée dans l'amélioration de la discrimination du fond par rapport aux événements de photons pour une meilleure sensibilité sur HESS1. L'accès aux énergies de la dizaine de GeV sera possible avec HESS2 et permettra de différencier les contributions de photons issus des interactions hadroniques ( $p + p \rightarrow \pi^0$ ) ou produits par inverse Compton. Aussi, l'équipe du LAPP s'est-elle fortement impliquée dans la préparation à l'analyse avec HESS2 dans ce domaine d'énergie.

### Etudes des sources étendues avec HESS1

#### Nébuleuses de pulsars avec HESS1 :

En utilisant les informations disponibles relatives à la géométrie des gerbes électromagnétiques, il est possible de définir un estimateur plus efficace. Plusieurs solutions consistent à utiliser les distributions de différentes variables discriminantes et à déterminer la probabilité qu'un événement détecté soit un photon, ou au contraire une particule issue du fond de rayons cosmiques. Parmi ces solutions, la variable  $X_{eff}$ , basée sur une méthode de minimum de vraisemblance, est définie selon :

$$X_{eff} = \frac{\eta f_B(x_i)}{\eta f_B(x_i) + (1 - \eta) f_S(x_i)}$$

où  $f_S$  et  $f_B$  sont les distributions de probabilité associées respectivement au signal (photon) et au bruit (protons),  $\eta$  représente la fraction de bruit de fond.

Cette méthode d'analyse développée au LAPP (Publication 1) a été appliquée à l'étude des restes de supernovae et des nébuleuses de pulsar, telles que la nébuleuse du Crabe ou Vela X (voir Figure 5). La première est utilisée comme « chandelle standard » pour comparer l'efficacité des différentes méthodes d'analyse (Table 1) où un gain notable de sensibilité a été

obtenu en termes de rapport signal sur bruit ou significativité. La seconde, de par sa proximité (~290 pc), représente un excellent sujet d'étude de la morphologie dépendante de l'énergie (Figure 5).

#### 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 HESS, 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. HESS a observé ces trois dernières années plusieurs d'entre elles et détecté une émission de rayons gamma en provenance des nuages moléculaires. La dernière détection en date est visible sur la Figure 6. Cette source de rayons gamma, HESS J1923+141, est située dans la région de W51 (Publication 2). 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 FERMI/Glast d'une source de rayons gamma dans la gamme en énergie du GeV coïncidant avec celle détectée par HESS. De nouvelles observations de cette région seront effectuées au printemps prochain et vont permettre d'affiner notre compréhension de cette source et de son origine.

	$N_{ON}$	$N_{OFF}(\alpha)$	Excès $\gamma$	$\sigma$	S/B
Analyse Standard (Publiée)	4759	2417(5.0)	4283	94.2	8.9
Nouvelle Analyse $X_{eff}$	4999	897(5.0)	4820	114.9	26.9

Table 1 : Comparaison des sensibilités classique et nouvelle ( $X_{eff}$ ) sur la Nébuleuse du Crabe.

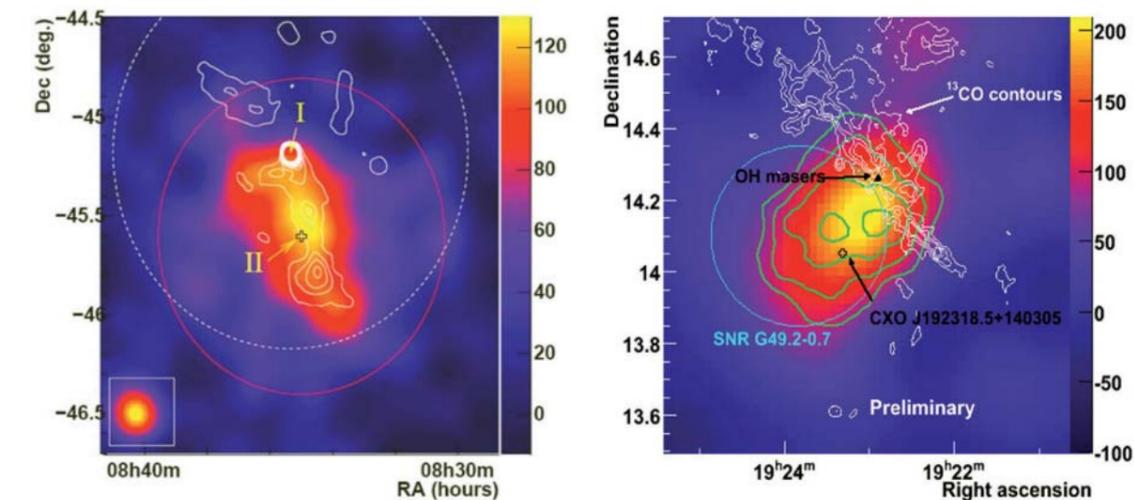


Figure 5 (gauche) : Carte d'excès de la nébuleuse de pulsar Vela X vue par HESS. La position I correspond à la position du pulsar déduite des observations radio, le centre de gravité de l'émission est marqué par la croix/carré (position II).

Figure 6 (droite) : Carte d'excès de rayons gamma obtenue par HESS dans la région de W51. Les contours verts représentent les contours de significativité de 3 à 6  $\sigma$  de la source HESS. La position du maser du radical OH est indiquée par un triangle noir et celle de la nébuleuse de pulsar observée par Chandra en rayons X par une croix. Le maser indique l'interaction du vestige de supernova représenté par le cercle bleu avec le nuage moléculaire indiqué par les contours blancs de la raie du CO.

### Préparation à l'analyse de HESS2 et amélioration de l'acceptance aux basses énergies (30-50 GeV)

Avec les télescopes Tcherenkov atmosphériques, les images des gerbes électromagnétiques sont bien représentées par une ellipse dans le plan focal de la caméra. Cette ellipse peut être décrite par les paramètres dits de "Hillas". Dans le cas d'une reconstruction stéréoscopique (comme HESS1) 2 paramètres suffisent pour discriminer les gerbes électromagnétiques des gerbes hadroniques (la longueur et la largeur de l'ellipse) sous forme de variables réduites. Pour déterminer l'énergie de l'événement, l'intensité du signal (la charge) et la connaissance du paramètre d'impact sont les mesures déterminantes.

La technique précédente stéréoscopique ne peut s'appliquer pour les basses énergies. De même, la mesure du paramètre d'impact se révèle être peu précise. Pour pallier ces problèmes, une analyse multi-variables a été développée au LAPP (Publication 3) en utilisant uniquement le cinquième télescope. Elle est basée sur les arbres de décision et les

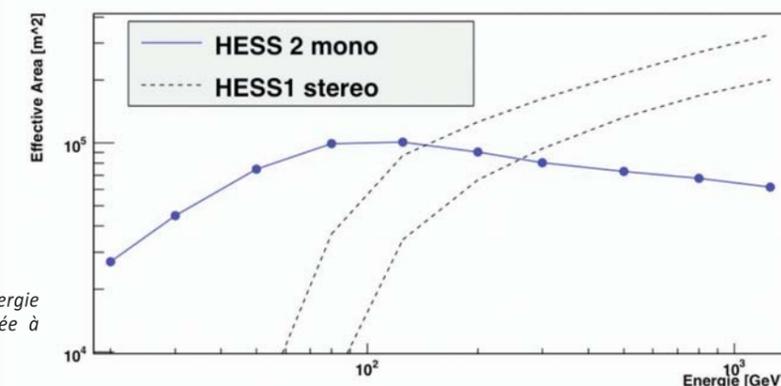


Figure 7 : Calcul d'acceptance en fonction de l'énergie en mode mono (HESS2 ligne bleue) comparée à l'acceptance de HESS1 (lignes pointillées).

réseaux de neurones dans le but de déterminer l'énergie des photons et de rejeter les hadrons, dont le taux augmente quand le seuil en énergie diminue. L'analyse en cours permet d'atteindre une efficacité de 45 % pour une réjection de 95 % des hadrons avec un seuil à 50 GeV. Cette étude a permis de réduire aussi considérablement le biais systématique sur la reconstruction en énergie. L'acceptance estimée pour HESS2 en mode mono est comparée à celle de HESS1 sur la figure 7.

### Plan pour 2010-2014

Le groupe souhaite poursuivre ses études sur les sources étendues telles que les nébuleuses de pulsar, les nuages moléculaires ou des sources potentielles de matière noire (galaxies naines) sur HESS (1 et 2). Il souhaite aussi

s'investir sur l'étude des fonds diffus galactique et extragalactique et travailler conjointement avec les théoriciens du LAPP spécialistes de la propagation des rayons cosmiques (sujet de recherche du CDD ANR). Lorsqu'AMS sera en prise de données, il y aura des études conjointes menées entre les deux groupes sur les sources (spectres des pulsars aux énergies communes), le fond diffus et toute déviation possible révélant de la Nouvelle Physique. Le groupe est aussi engagé dans le futur projet CTA (nous renvoyons le lecteur à cette partie détaillée dans ce rapport).

Compte tenu des évolutions du groupe (S. Rosier-Lees 50 %, G. Lamanna 70 %, J.-P. Vialle 40 %, G. Coignet (Emérite), R. Kossakowski 40 %, A. Fiasson (CDD)) et de la contribution importante du LAPP, deux entrées permanentes : CR2 ou CR1 et un poste de maître de conférences sont indispensables. Cela permettra de renforcer le groupe dans l'analyse et d'y jouer un rôle moteur.

#### Dates clés

Mai 2009 : premiers tests complets au LAPP de déchargement de la camera de HESS.

Décembre 2009 : fin de la construction du cinquième télescope de HESS.

Premier semestre 2010 : installation de la camera sur le télescope de HESS2.

Septembre 2010 : premières prises de données HESS2.

## L'équipe du LAPP

Physiciens : G. Coignet, R. Kossakowski, G. Lamanna, S. Rosier-Lees, J.-P. Vialle

Post-doc. : A. Fiasson, S. Ranchon

Doctorants : F. Dubois, J. Masbou

Equipe Technique : Y. Bastian, J.-P. Baud, P. Baudin, Y. Beeldens, L. Brunetti, F. Cadoux, M. Cailles, P.-Y. David, J.-M. Dubois, N. Fouque, N. Geoffroy, R. Hermel, L. Journet, T. Leflour, B. Lieunard, I. Monteiro, P. Mugnier, J.-L. Panazol, J. Prast, V. Riva S. Tissot-Lieunard, T. Yildizkaya

Stagiaires : K. Cochard, T. Cordier, A. Jacholkowska, J. Masbou, J. Méhault

## Publications importantes

Le groupe a cosigné 34 publications de HESS depuis son arrivée dans la collaboration, <http://www.mpi-hd.mpg.de/hfm/HESS/pages/publications>

### Referee interne

1. "Search for Gamma-rays from Dark Matter annihilations around Intermediate Mass Black Holes with the H.E.S.S. experiment", Phys.Rev. D78 (2008) 072008. F. Aharonian et al.
2. "A search for a dark matter annihilation signal towards the Canis Major overdensity with H.E.S.S." Astrophysical Journal 691 (2009) 175-181. F. Aharonian et al.
3. "The discovery source HESS 1908+063 coincident with Mgro 1909", submitted for publication. F. Aharonian et al.

### Proceedings

"A multivariate analysis approach for the IACT HESS system", Gamma08, F. Dubois et al., to be submitted to Astrophysical Journal. SF2a Emissions de très haute énergie dans les nébuleuses de pulsar, F. Dubois et al.

Moriond09 Abstract submitted to ICRC2009, A. Fiasson et al.

"Acceptance Study of HESS2", Gamma08 et Abstract submitted to ICRC09, J. Masbou et al.

"Observations of VHE gamma-ray Galactic sources with HESS", (Frascati Series publication) G. Lamanna at SciNeGH07.

## Responsabilités du groupe

Mouvements de la caméra :

**Chefs de projet** : L. Brunetti, B. Lieunard.

**Physiciens coordinateurs** : S. Rosier-Lees, J.-P. Vialle.

Sécurité de la caméra :

**Chefs de projet** : T. Leflour, J. Prast.

**Physicien coordinateur** : G. Lamanna.

Tests des PMs :

**Chefs de projet** : N. Fouque, J.-L. Panazol.

**Physicien coordinateur** : S. Rosier-Lees.