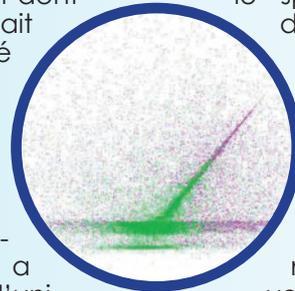


Cosmologie et Rayons cosmiques

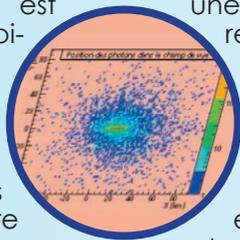
La cosmologie a fait une avancée marquante ces dernières années avec l'étude du fond cosmologique. Bien que les premières observations de ce rayonnement fossile à 3 K aient été effectuées en 1965, il a été montré que ce rayonnement dont le spectre est un corps noir quasi parfait, était très isotrope, mais qu'il existait des variations moyennes sur des échelles de quelques degrés. La mesure précise de ces fluctuations permet de déterminer grâce aux modélisations les paramètres quantitatifs de l'univers (densité, courbure, âge). Une équipe du LPSC s'est engagée dans cette quête, d'abord avec Archeops, puis avec le projet Planck.



Archeops est une expérience embarquée en ballon stratosphérique, conçue comme un prototype du satellite Planck. Elle a permis, avec une très bonne précision de confirmer que l'univers est plat et que seulement une faible partie, environ 4%, de la densité matière-énergie de notre univers est due à la matière ordinaire, que 23% est associée à la matière noire dont la nature est encore inconnue et que 73% est dû à la présence d'une énergie sombre, elle aussi inconnue. Archeops a également confirmé l'accélération de l'expansion de l'Univers.

Le projet de satellite européen Planck-Surveyor prévu pour 2008 permettra une cartographie complète de ce rayonnement fossile avec une sensibilité inégalée. Archeops a permis de tester avec succès un certain nombre d'éléments qui seront utilisés sur le satellite Planck. Planck prendra des données sur le ciel, qui lui permettront d'obtenir une précision plus de 100 fois supérieure à celle d'Archeops. De plus, il est prévu de munir certains canaux de polarimètres afin de mesurer la polarisation du rayonnement, ce qui fournira des informations sur l'éventuelle période de réionisation de l'univers et sur les ondes gravitationnelles primordiales.

La présence en quantité importante de la matière sombre non baryonique, encore inconnue, dans notre univers est une des questions majeures de la cosmologie actuelle. C'est pourquoi le laboratoire de particules super-energetiques s'est engagé dans une R&D visant la détection directe de particules symétriques ou WIMPs: le projet MIMAC-He3.



Autres messagers de l'Univers, les rayons cosmiques, observés pour la première fois en 1910, et ayant permis la découverte de plusieurs particules élémentaires, mesurent une énigme. Leur gamme d'énergie s'étend sur plus de 30 ordres de grandeur et leur origine peut être diverse: soleil, espace interstellaire et intergalactique. La plupart auraient pour origine l'explosion de supernovae. Le LPSC est engagé dans plusieurs expériences ayant pour objectif de les caractériser dans différents domaines d'énergie: AMS, CREAM et EUSO.

La collaboration AMS est prête à installer sur la station spatiale internationale ISS, un système de détection et d'identification des particules cosmiques. Celui-ci est optimisé pour la recherche d'antimatière d'origine primordiale et tenter ainsi de résoudre l'énigme de la dissymétrie localement observée. La détection d'un seul noyau d'antimatière suffirait. Mais c'est aussi à d'autres interrogations concernant la matière noire, la propagation des rayons cosmiques et les photons de grande énergie que tentera de répondre cette expérience.

CREAM, première expérience embarquée sur un ballon longue durée, explorera les rayons cosmiques dans le domaine d'énergie allant de 10^{12} eV à 10^{15} eV pour des éléments allant du proton au fer. L'objectif principal est l'observation des caractéristiques spectrales de ces rayons cosmiques et/ou l'étude des changements en abondance qui pourraient être reliés à la limite d'accélération du front d'onde de choc des supernovae.



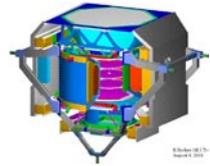
Les rayons cosmiques peuvent aussi être extrêmement énergétiques (10²⁰ eV) mais aucun mécanisme astrophysique connu ne semble capable d'accélérer des particules à de tels niveaux. À ces énergies, le fond de photons cosmologiques devrait représenter un obstacle à leur propagation. Pourtant, bien que très rares dans ce domaine d'énergie (1 par siècle, par km² et par stéradian), ils ont été observés et leur détection nécessite des détecteurs au sol gigantesques. C'est pourquoi le télescope EUSO a été envisagé.

Il aurait permis, depuis l'espace, de continuer les recherches entreprises et d'entreprendre l'étude de la composante la plus extrême du rayonnement cosmique afin d'accéder aux processus les plus énergétiques de notre univers. ■

Participation au projet AMS

M. Buénerd, A. Barrau, L. Derome, M. Mangin-Brinet, K. Protasov, M. Vargas-Trevino (th), O. Véziant.

The AMS experiment will perform a high sensitivity study of the charged particles Cosmic Ray (CR) flux, searching for antimatter and dark matter, and performing unmatched abundance measurements of nuclear CRs. The LPSC group participates to the construction of the Cherenkov imager for particle velocity and charge measurements, allowing isotope separation for light nuclei.



L'expérience AMS recherchera l'antimatière d'origine primordiale et la matière noire, elle étudiera le rayonnement cosmique de particules chargées (RC) ainsi que le rayonnement gamma cosmique pendant plusieurs années d'opération sur la station spatiale internationale (ISS). L'installation de l'expérience sur l'ISS a été retardée par la perte de la navette spatiale Columbia et elle est en cours de discussion.

L'équipe AMS du LPSC a participé à la phase préliminaire du programme expérimental AMS01. Elle a travaillé sur l'analyse et a apporté une contribution majeure à l'interprétation des résultats (voir rapports précédents et publications). Elle est actuellement engagée dans la préparation de la seconde phase du programme expérimental. Deux générations de prototypes ont été construites et étudiées au LPSC. Un faisceau d'ions secondaires a été développé au CERN dans le but de tester la dernière version du prototype (voir rapport précédent).

Les travaux réalisés dans ce cadre portent sur :

- la construction de l'imageur Cherenkov d'AMS ;
- la phénoménologie du rayonnement cosmique galactique et la dynamique de l'interaction RC-atmosphère. L'objectif principal de ce travail est de préparer l'exploitation des futures données d'AMS en élaborant une connaissance de base des flux secondaires atmosphériques et galactiques aussi approfondie que possible ;
- les sources exotiques de rayonnement cosmique primaire (trous noirs primordiaux, matière noire...) afin de préparer la recherche des signatures expérimentales de ces sources dans les données de l'expérience AMS.

Ces activités sont détaillées dans les sections suivantes.



◆ Construction de l'imageur Cherenkov (RICH)

L'imageur Cherenkov d'AMS aura pour fonction principale d'identifier les ions du rayonnement cosmique :

- en masse pour les noyaux de masse inférieure ou égale à 12 et pour le domaine d'impulsion de 1 à 12 GeV/c par nucléon,
- en charge dans tout le domaine d'énergie d'AMS (≤ 1 TeV/n).

Le principe du détecteur est celui de l'imageur annulaire à focalisation de proximité dont la simplicité d'architecture faisait de lui le meilleur candidat pour une expérience embarquée et de longue durée.

La participation de l'équipe du LPSC à la construction du RICH avait été anticipée dès la phase I du programme et avait commencé avec un travail de simulation et la construction d'un prototype d'étude de l'instrument (1997 - 2000). Cette étape préliminaire a permis de déterminer les performances de base accessibles et le domaine d'identification des particules associé.

La construction du prototype de seconde génération est intervenue ensuite sur la base de l'étude d'architecture et des choix définitifs d'instrumentation. Cette version a été testée avec des muons cosmiques, puis à deux reprises au moyen d'un faisceau d'ions secondaires contenant tous les ions d'un rapport Z/A donné, développé dans ce but au SPS du CERN (Voir rapport précédent et [1]).

Intégration des cellules de photomultiplicateurs

L'ensemble des 680 cellules de photomultiplicateurs qui équiperont le détecteur final a été intégré et testé au LPSC au cours de l'année 2004, et livré début 2005 à l'équipe du CIEMAT de Madrid pour l'intégration mécanique dans l'imager (Figure 1). Cette dernière opération est actuellement en cours.

Cette phase de la construction a représenté un travail considérable de tests et d'étalonnages systématiques des éléments constitutifs de chaque cellule : photomultiplicateur et microcircuit d'électronique frontale (voir *M. Vargas-Trevino, thèse, U. Joseph Fourier, Grenoble, juillet 2005*). L'ensemble des photomultiplicateurs et des circuits intégrés de lecture a fait l'objet d'un tri croisé destiné à apparier les gains des PMs avec les propriétés temporelles des circuits intégrés, pour finalement obtenir un plan de détection aussi homogène que possible.

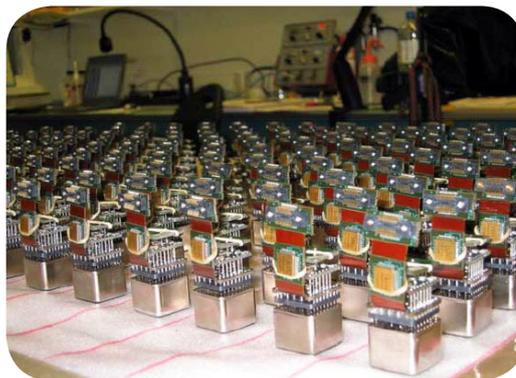


Figure 1 : Cellules de photodétecteurs de l'imager Cherenkov d'AMS en cours d'intégration au LPSC après leur assignation de position dans le plan du détecteur en fonction des caractéristiques en gain des PMs et en temps des circuits intégrés de l'électronique frontale.

Caractérisation optique des tuiles d'aérogel

La vitesse des particules doit être mesurée dans l'imager Cherenkov (RICH) d'AMS avec une précision relative de 1 pour mille, pour conduire, une fois combinée avec les informations fournies par le détecteur de traces au silicium, à une détermination de la masse nucléaire pour les noyaux légers de masse inférieure ou égale à 12.

Cette contrainte de précision sur la mesure de la vitesse se traduit par la nécessité de déterminer l'indice de réfraction du matériau radiateur avec une précision de l'ordre de $\Delta n \sim 10^{-4}$.

Le principal radiateur du RICH d'AMS est constitué d'aérogel de silice d'indice de réfraction $n = 1,05$. Les 100 tuiles qui équiperont le détecteur sont produites par les Instituts Budker (Physique Nucléaire) et Borekov (catalyse) de Novosibirsk.

Une installation expérimentale spécifiquement dédiée à la détermination de l'indice de réfraction de ces tuiles par mesure de déviation laser en utilisant la méthode du prisme (Figure 2), a été mise en place dans une salle propre du LPSC. Les diverses corrections intervenant au niveau de précision requis, telles par exemple que l'influence des variations de pression, de température, de l'indice de l'air... ont été incluses, pour une précision optimale des mesures.

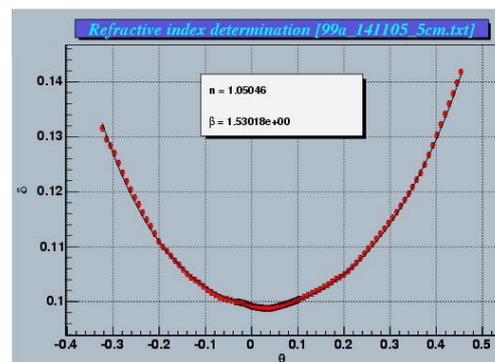
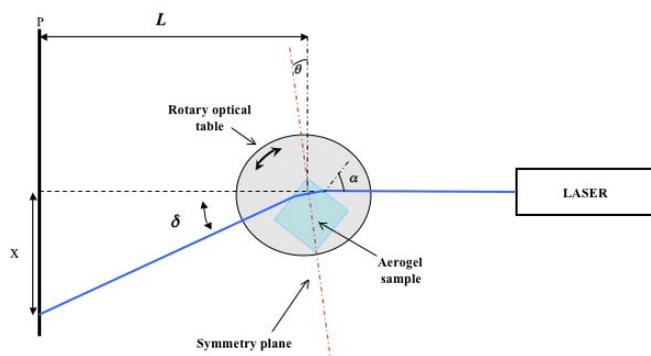


Figure 2 : Schéma de l'installation expérimentale (à gauche) pour la détermination de l'indice de réfraction des tuiles d'aérogel par mesure de minimum de déviation, et exemple de variation de la déviation mesurée en fonction de l'angle d'incidence du faisceau laser (à droite). Les corrections géométriques, celles liées au coefficient de clarté, et celles dues à l'indice de l'air, ont été incluses dans les calculs.

Une attention particulière a dû être portée aux variations d'indice à l'intérieur même des tuiles. Pour confirmer ou infirmer cette inhomogénéité, des mesures en faisceau ont été réalisées au BTF (Beam Test Facility) de Frascati, avec des électrons de 500 MeV. L'installation est illustrée sur la figure 3. La mesure se fait par réflexion du cône Cherenkov sur un miroir sphérique. L'anneau Cherenkov est focalisé sur une plaque photographique. Les plaques sont ensuite analysées par densitométrie. Deux tuiles ont ainsi pu être cartographiées et l'analyse des résultats est en cours.

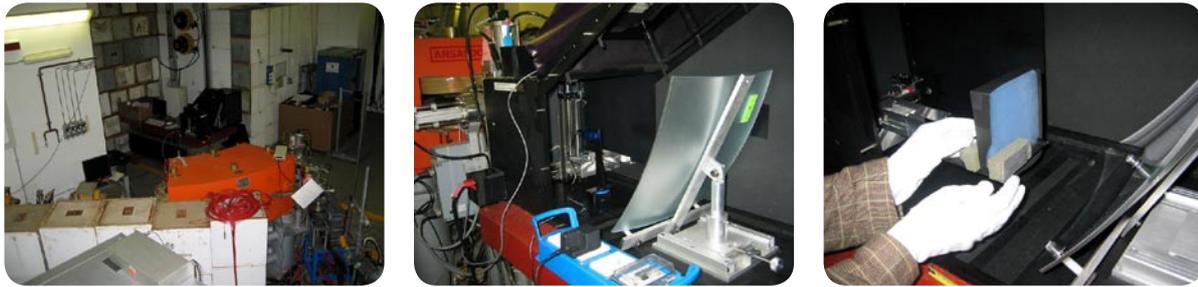


Figure 3 : Zone expérimentale du BTM de Frascati (à gauche), enceinte équipée avec le miroir sphérique et le moteur permettant le déplacement de la tuile (au centre), et positionnement de l'aérogel (à droite).

◆ **Phénoménologie : Interaction du rayonnement cosmique avec l'atmosphère dans l'environnement terrestre**

Depuis 2000, une activité de phénoménologie de l'interaction du rayonnement cosmique avec l'atmosphère et le champ magnétique terrestre est réalisée dans l'équipe AMS. L'objectif initial était d'interpréter les données mesurées d'AMS01, objectif qui a été largement atteint (voir rapports antérieurs et publications), et dont le succès nous a incité à pousser l'exploration plus loin.

Ce travail de phénoménologie s'articule autour d'un outil de simulation Monte-Carlo qui comprend la génération des particules du rayonnement cosmique primaire, sa propagation dans le champ magnétique terrestre, l'interaction dans l'atmosphère et la production de particules secondaires et donc la formation et le développement de cascades de particules.

Le rayonnement cosmique constitue une source unique pour l'étude des oscillations des neutrinos. La puissance de cet outil a été particulièrement mise en évidence par l'expérience Super-Kamiokande au Japon. Les paramètres d'oscillations sont déterminés grâce à la comparaison du flux de neutrinos estimé et du flux mesuré, notamment en comparant l'évolution du rapport ν_e/ν_μ avec l'angle zénithal, c'est à dire la distance de vol.

La détermination des paramètres d'oscillation nécessite une connaissance précise des flux théoriques de neutrinos atmosphériques. La principale difficulté est d'avoir une simulation la plus correcte possible de l'interaction des particules et de la production de particules secondaires. La stratégie utilisée jusqu'alors a été d'utiliser des paramétrisations des sections efficaces inclusives pour chaque particule produite (proton, pion...). Les paramètres sont ajustés sur les mesures disponibles de sections efficaces sur cible fixe.

Cette approche a permis de bien reproduire la production de particules secondaires, mais elle peut s'avérer insuffisante si l'on veut obtenir avec la simulation des résultats d'une grande précision (de l'ordre de quelques pour cents). Pour améliorer les sections efficaces utilisées, des mesures de flux de particules dans l'atmosphère ont été utilisées pour contraindre et ajuster les sections efficaces. En effet, de nouvelles mesures de flux de particules (proton, muons, électrons/positron) dans l'atmosphère (en particulier les mesures effectuées par l'expérience Caprice) sont aujourd'hui disponibles et permettent de contraindre les paramètres de sections efficaces utilisées dans la simulation.

◆ **Recherche de nouvelle physique**

A. Barrau, J. Grain.

Depuis quelques années, le groupe a développé une activité théorique autour des extensions de la relativité générale. Ces deux dernières années, les points suivants ont été étudiés :

Gravitation et cosmologie

La relativité générale, n'étant pas quantifiable, n'est vraisemblablement pas la théorie ultime. Les circonstances où des effets de gravitation quantiques peuvent se manifester demeurent néanmoins extrêmement rares. L'évaporation des trous noirs serait sans doute l'une de celles-ci. Le spectre de particules qu'ils émettent n'est pas tout à fait une loi de corps noir à cause de la forme complexe de la métrique au voisinage de l'horizon. Ce couplage entre les champs quantiques et les trous noirs est entièrement caractérisé par les facteurs de corps gris qui requièrent la résolution des équations de Klein-Gordon et de Dirac en espace courbe avec des conditions aux

limites particulières. Ces coefficients ont été, pour la première fois, calculés pour un espace de type de-Sitter, c'est-à-dire muni d'une constante cosmologique positive et une pour la gravité de Lovelock, c'est-à-dire présentant des termes d'ordres supérieurs en courbure scalaire. Ces calculs ont prouvé que la structure intrinsèque de l'espace temps était reflétée par le processus d'évaporation. Par ailleurs, nous avons montré que l'évaporation des trous noirs permettait de contraindre le spectre de puissance de l'Univers primordial à des échelles très petites et inaccessibles au fond diffus cosmologique [2].

Supersymétrie et matière noire

Certaines particules de Kaluza-Klein, prévues dans le cadre de théories présentant des dimensions supplémentaires, peuvent constituer de bons candidats à la matière noire non baryonique. Nous avons calculé leurs annihilations en antiprotons et les flux résultants. L'espace des paramètres de la théorie se trouve ainsi contraint et de nouvelles perspectives sont tracées pour leur détection.

Par ailleurs, nous avons montré que la mesure des flux de rayons cosmiques avec AMS ou d'autres expériences de cette génération, ainsi que les études du mode tenseur dans le fond diffus cosmologique, pourraient permettre de poser des contraintes sur la supersymétrie locale (supergravité), en particulier sur la masse des gravitinos.

Physique des trous noirs et des hautes énergies

Les modèles de type « Grandes Dimensions Supplémentaires » conduisent naturellement à une échelle de Planck plus faible que la valeur apparente sur notre membrane quadri-dimensionnelle. Elle pourrait même se situer au TeV et devenir donc accessible à des accélérateurs comme le LHC. Nous avons montré que des effets de gravitation quantique – en l'occurrence un terme de Gauss-Bonnet dans la densité lagrangienne – pourraient alors être détectés. La présence d'une constante cosmologique (espaces de-Sitter / Anti-de-Sitter) modifie également la forme du spectre. Enfin, la production locale de trous noirs dans la galaxie et par diffusion thermique dans l'Univers primordial a été évaluée.

Perspectives

À court terme, nous allons poursuivre deux axes de recherche. Le premier, lié à la cosmologie, consiste à finaliser une approche WKB de la dynamique des champs scalaires en espace courbe [3] et à développer une étude de la partie quantique du champ en inflation stochastique. Le second consiste à calculer l'entropie rayonnée par les trous noirs dans les extensions de la relativité générale. Ce dernier point serait une confirmation intéressante de l'hypothèse de Bekenstein qui n'a pas encore été abordée pour les trous noirs de Kerr, les théories de Lovelock et les espaces à $D > 4$.

[1] The AMS RICH collaboration, P. Aguayo et coll., NIM sous presse.

[2] M. Khlopov, A. Barrau, soumis à Class. Quantum Grav.

[3] J. Grain, A. Barrau, soumis à Nucl. Phys. B.

Participation à l'expérience CREAM

M. Buénerd, A. Barrau, L. Derome, M. Mangin-Brinet, Y. Sallaz-Damaz (th).

CREAM is a balloon experiment which was flown already twice over Antarctica, to measure the very high energy (1-1000 TeV) Nuclear Cosmic Ray flux (CR), investigate the energy region where Super Novae front shock acceleration signature is expected for protons, and study the CR transport in the galaxy. The LPSC group has proposed a Cherenkov imager for particle charge measurements over the full range of charge ($1 < Z < 30$), and for backplash and albedo particle rejection. The detector, a proximity focusing imager, is being built in the laboratory.

Figure 1 : Lancement de CREAM à la station antarctique américaine de McMurdo sur un ballon de la NASA en décembre 2005.



L'expérience CREAM (Cosmic Ray Energetics and Mass) permettra d'étudier les rayons cosmiques nucléaires de très haute énergie ($\sim 10^{12}$ à 10^{15} eV) du proton au fer en mesurant leur charge et leur énergie. L'objectif principal est l'observation des caractéristiques spectrales des rayons cosmiques et/ou l'étude des changements en abondance qui pourraient être reliés à la limite d'accélération du front d'onde de choc des supernovae. Cette expérience sera la première à être embarquée sur un ballon de la nouvelle génération (ULDB) développée par la NASA, qui permettra des vols très longue durée, jusqu'à 3 mois.

Un imageur Cherenkov (CHERenkov CAMera) pour la mesure de la charge dans une version évoluée de l'expérience, est en cours de réalisation au LPSC (groupe AMS/CREAM). Le principe de l'imageur est le même que celui utilisé dans AMS (focalisation de proximité). Il comprend un radiateur Cherenkov (aérogel de silice), un espace de glissement de 10 cm environ pour le développement du cône Cherenkov et un plan de détection constitué de photomultiplicateurs Photonis XP3112. La géométrie détaillée de l'instrument est en cours de finalisation.

La figure 2 montre la structure (CAO, vue en coupe verticale) du détecteur en cours de construction.

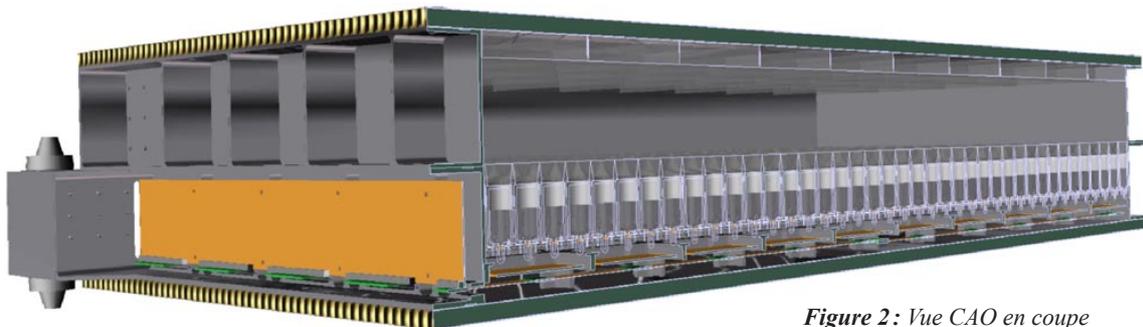


Figure 2 : Vue CAO en coupe du détecteur en cours de construction.

Simulation

Un programme de simulation du détecteur Cherenkov de CREAM est développé en utilisant l'environnement logiciel de GEANT4. La figure 3 ci-dessous montre quelques premiers résultats.

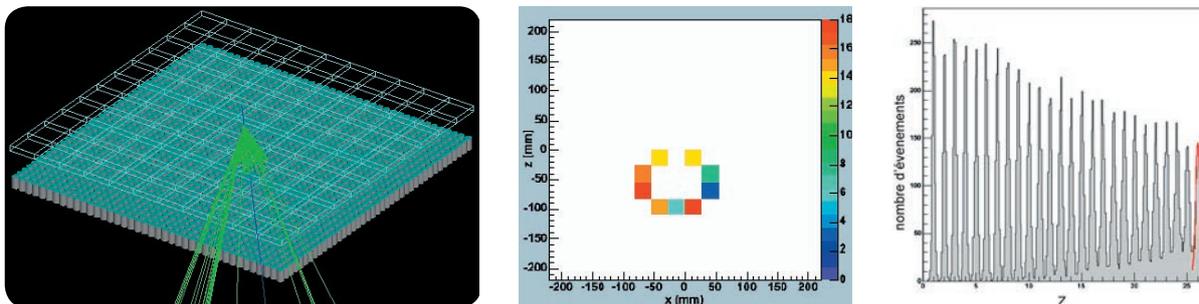


Figure 3: Exemple d'événement simulé (proton, 1 GeV) (à gauche), distribution des photons obtenue sur le plan de photomultiplicateurs (au centre), et reconstruction de la charge pour une résolution spatiale supposée de 1 mm (à droite).

La simulation comporte la modélisation des photomultiplicateurs et contient pour l'instant comme processus physiques, l'effet Cherenkov (aérogel, guides de lumière, et fenêtre d'entrée des photomultiplicateurs), la diffusion Rayleigh (aérogel), la réflexion (aérogel, guides de lumière, et fenêtre d'entrée des photomultiplicateurs) et l'absorption (guides de lumière éventuels et surfaces latérales des photomultiplicateurs). L'efficacité des photocathodes est aussi incluse, conformément aux données fournies par le constructeur.

Les modules de programmes de reconstruction de l'angle Cherenkov et de la charge à partir des données simulées sont en cours d'élaboration.



Archeops

D. Santos, J. Aumont (th), J. Macías-Pérez, C. Renault, M. Tristram (th).

Archeops is a balloon-borne experiment designed to be the prototype of the HFI-Planck satellite with the purpose to measure the temperature angular power spectrum of the Cosmic Microwave Background (CMB) radiation at large and intermediate angular scales. Archeops consists of 4 frequency channels at 143, 217, 353 and 545 GHz permitting to separate CMB and foregrounds. In the last scientific campaign Archeops covered 30 % of the sky performing circular scans during 12 hours of night flight. In the last few years we have proceeded to the scientific exploitation of these data.

Archeops était une expérience ballon qui a volé à 35 km d'altitude afin d'observer les anisotropies du fond diffus cosmologique et les avant-plans entre 143 et 545 GHz. Elle a été un test grandeur nature de l'instrument hautes fréquences de la mission satellite Planck. Un vol technique a eu lieu en juillet 1999 depuis la Sicile et les deux vols scientifiques ont été effectués avec succès les 29 janvier 2001 et 7 février 2002 depuis Kiruna (Suède) au-delà du cercle polaire. Les bolomètres étaient refroidis à 100 mK par un système de dilution $^3\text{He} - ^4\text{He}$, la résolution spatiale a été d'environ 12 minutes d'arc et la couverture du ciel d'environ 30% en 12 heures d'observation nocturne. Cette grande surface a été obtenue par une stratégie de pointage originale: l'instrument est à une élévation constante de 41 degrés et tourne sur lui-même à la vitesse de 2 tours par minute. La rotation de la Terre et le déplacement du ballon du au vent conduisent à l'observation d'une grande surface du ciel avec une bonne redondance nécessaire à l'augmentation du rapport signal sur bruit et à l'étude des erreurs systématiques. L'objectif d'Archeops était double: d'une part l'obtention du spectre de puissance angulaire des anisotropies en température du CMB avec les canaux à basses fréquences et d'autre part de contraindre les émissions d'avant-plans polarisées notamment l'émission des poussières galactiques.

Les activités de la collaboration Archeops en 2004 - 2005 ont été centrées sur l'exploitation scientifique des données et la mise à disposition de ces dernières. Dans ce cadre, le groupe Archeops-Planck du LPSC a contribué de manière significative à:

- la chaîne d'analyse des données,
- la reconstruction du spectre de puissance angulaire du CMB,
- la mesure de la polarisation de l'émission des poussières galactiques,
- l'étude de la non-gaussianité des données,
- la mesure statistique de l'effet Sunyaev-Zeldovich thermique local avec Archeops et WMAP.

◊ Chaîne d'analyse des données

Pendant ces deux dernières années le travail a consisté principalement à construire des cartes finales de l'émission du ciel aux 4 fréquences d'observation d'Archeops: 143, 217, 353 et 545 GHz. Ces cartes sont actuellement les seules disponibles dans le domaine millimétrique avec une aussi grande couverture du ciel et permettent par conséquent l'accès aux très grandes échelles angulaires. L'ensemble du travail sur la chaîne d'analyse des données fera l'objet d'une publication de la collaboration Archeops au début de l'année 2006. En particulier, le groupe a travaillé sur l'analyse temps-fréquence des données d'Archeops qui a permis la sélection des meilleurs bolomètres d'Archeops en fonction de leur sensibilité et de leur taux de contamination par des effets systématiques [1].

◊ Reconstruction du spectre de puissance angulaire du CMB

Le groupe a travaillé sur la reconstruction du spectre de puissance angulaire des anisotropies en température du CMB obtenues avec Archeops. Plus particulièrement dans l'extension des premiers résultats d'Archeops à de plus grandes échelles angulaires pour une mesure plus précise du plateau Sachs-Wolfe, mais également à des échelles angulaires plus petites afin d'atteindre le deuxième pic acoustique dans le spectre et de combler ainsi le manque de mesures entre les données de COBE et de BOOMERANG-MAXIMA. Pour cela, nous avons considéré six bolomètres au lieu des deux utilisés pour la première estimation, et amélioré ainsi l'analyse des données. Dans ce cadre, nous avons développé à Grenoble une nouvelle méthode d'analyse de la réponse optique de l'instrument, Asymfast, afin de tenir compte de l'asymétrie des lobes. Asymfast permet, en décomposant les lobes en une somme de lobes circulaires gaussiens de positions et de tailles différentes, de convoluer rapidement une carte avec un lobe asymétrique et par conséquent de retrouver par simulations sa fonction de transfert dans des harmoniques sphériques. Enfin, nous avons aussi constaté dans la première analyse que l'estimation du bruit dans les données ordonnées en temps, nécessaire à la correction du spectre de puissance mesuré, était à la fois très coûteuse en temps et particulièrement difficile pour les bolomètres les plus bruités qui sont aussi les

plus affectés par des non-stationarités. À ce propos, à Grenoble nous avons développé une nouvelle méthode de reconstruction du spectre de puissance du CMB Xspect qui utilise une combinaison de cross corrélations entre détecteurs indépendants pour estimer le spectre de puissance du CMB final. Comme le bruit n'est en général pas corrélé entre les détecteurs, cette estimation n'est pas biaisée et par conséquent ne nécessite pas d'estimation du spectre de bruit. De plus Xspect permet le calcul des barres d'erreur analytiques évitant ainsi le recours à de lourdes simulations Monte-Carlo.

Les figures 1 et 2 montrent la carte des anisotropies du CMB mesurée avec Archeops et la nouvelle mesure du spectre de puissance angulaire des anisotropies en température du CMB Xspect.

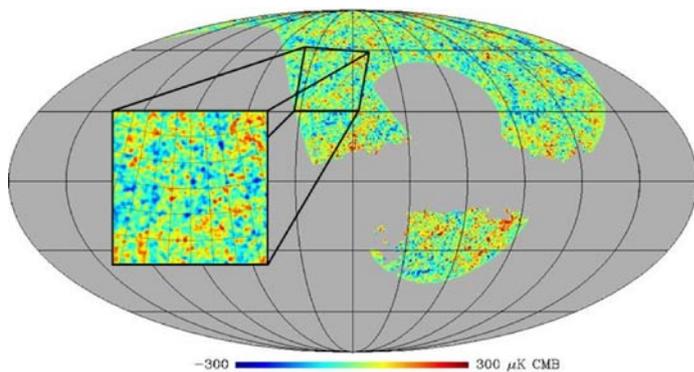


Figure 1: Carte des anisotropies du CMB mesurée avec Archeops. Le plan galactique est masqué pour éviter la contamination par des émissions galactiques. Le zoom représente la région avec le meilleur signal sur bruit.

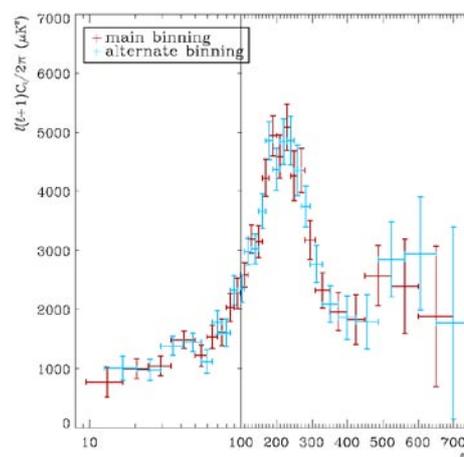


Figure 2: Spectre de puissance des anisotropies du CMB mesuré par Archeops en fonction de la taille angulaire de celles-ci.

◆ Mesure de la polarisation de l'émission des poussières galactiques

Un des grands défis de la mesure de la polarisation des anisotropies du CMB est la soustraction de l'émission polarisée des avant-plans galactiques tels que le synchrotron et la poussière. En ce qui concerne la poussière, Archeops, grâce à son canal polarisé à 353 GHz et à sa grande couverture du ciel, a pu fournir les premières cartes polarisées de cet avant-plan, à grande échelle angulaire. Ces cartes sont à l'heure actuelle les seules mesures disponibles. Les cartes en polarisation d'Archeops à 353 GHz ont mis en évidence une polarisation importante dans le plan galactique allant de 5 à 10% et un angle de polarisation en bon accord avec la structure du champ magnétique galactique sur les bras spiraux.

Afin d'estimer la possible contamination par la poussière galactique de la mesure de la polarisation du CMB, nous avons procédé à l'estimation des spectres de puissance angulaire en température et en polarisation des données d'Archeops à 353 GHz et à haute latitude galactique ($|b| > 5^\circ$). Les résultats obtenus montrent que la poussière galactique est un contaminant majeur de la mesure de la polarisation du CMB à haute fréquence. Nous avons obtenu, par deux analyses indépendantes, une détection significative à 4σ de l'émission de la poussière dans les modes de cross corrélation TE et TB pour des grandes échelles angulaires. Cependant, nous avons montré que ces résultats ne remettent pas en question l'excès de puissance mesuré par WMAP dans le spectre TE, interprété comme une reionisation globale de l'Univers plus tôt que prévue.

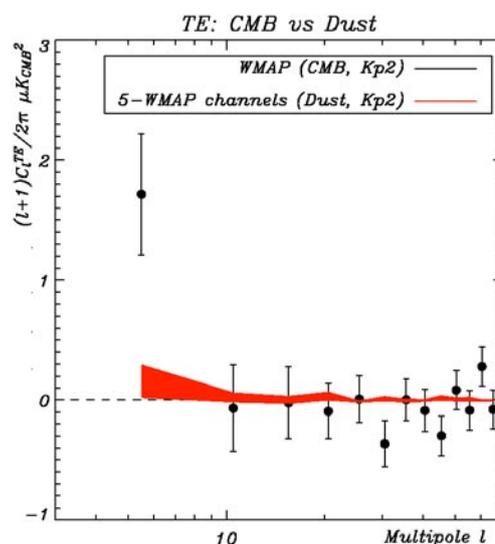


Figure 3: Spectre de puissance croisé en température et polarisation TE du CMB (en noir) mesuré par le satellite WMAP et la contamination de ce spectre par l'émission de la poussière mesurée par Archeops.

◇ Étude de la non-gaussianité des données d'Archeops

Les anisotropies en température du CMB telles que prédites par les théories inflationnaires ont une statistique gaussienne. De nombreuses méthodes mathématiques ont été développées pour vérifier cette hypothèse fondamentale sur les cartes du CMB mesurées. Notre groupe n'ayant pas l'expertise nécessaire pour ce type d'analyse, nous avons organisé une collaboration avec le groupe CMB de Santander en Espagne dans le cadre d'une action intégrée. Nous avons travaillé sur l'application du *test de goodness of fit* de Rayner & Best ainsi que des tests statistiques basés sur les ondelettes sphériques aux données d'Archeops. La méthode de Rayner & Best est particulièrement sensible aux effets systématiques comme la contamination par des émissions d'avant-plan (poussière et résidus atmosphériques) et les erreurs de calibration dans les spectres du bruit et du signal. Des résultats préliminaires indiquent que ces dernières sont les plus importantes. Ce travail permet aussi de contraindre les effets systématiques dans la mesure du spectre de puissance du CMB par Archeops. La publication des résultats obtenus est prévue avant fin juin 2006.

◇ Mesure statistique de l'effet Sunyaev-Zeldovich thermique local avec Archeops et WMAP

Les données d'Archeops sont particulièrement intéressantes pour l'étude de l'effet Sunyaev-Zeldovich (SZ), c'est-à-dire le Compton inverse des photons du CMB avec les électrons chauds dans les amas de galaxies. Cet effet est nul à 217 GHz, une des fréquences d'observation d'Archeops, ce qui permet de le différencier des autres émissions comme le CMB ou la poussière galactique. Pour mesurer l'effet SZ avec Archeops nous avons mis en place une collaboration avec Carlos Hernandez Monteagudo (post-doc sous la direction de Rashid Sunyaev). Après analyse jointe de la corrélation des données d'Archeops et de WMAP avec un patron de la densité de matière obtenu à partir des données 2MASS, nous avons obtenu une détection à plus de 5σ de l'effet SZ sur un ensemble d'amas [2]. En outre, les résultats obtenus en ce qui concerne le paramètre de *comptonisation* moyen sont en très bon accord avec les modèles de formation des structures de type matière sombre froide.

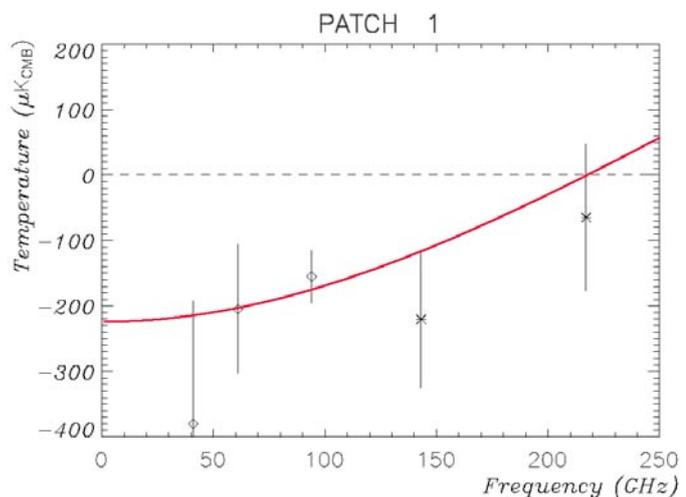


Figure 4: Spectre électromagnétique de l'effet SZ mesuré (noir) en combinant les données d'Archeops et de WMAP et attendu (rouge) en supposant uniquement comme paramètre libre le niveau moyen de SZ (la forme du spectre électromagnétique de l'effet SZ est parfaitement connue).

[1] On the wavelet analysis of CMB time ordered data: application to Archeops, J. F. Macías-Pérez, A. Bourrachot (2005) A&A, accepté.

[2] Spectral indications of thermal Sunyaev-Zel'dovich effect in Archeops and WMAP data, C. Hernández-Monteagudo, J. F. Macías-Pérez, M. Tristram, F.-X. Désert (2005) A&A, sous presse.

Planck

D. Santos, J. Aumont (th), J. Macías-Pérez, C. Renault, M. Tristram (th).

Planck is an European Spatial Agency (ESA) mission concerning the measurement of the cosmic microwave background anisotropies that will be launched in 2007. The laboratory has responsibilities on the on-board hardware related to the Sorption Cooler Electronics (SCE) and the Dilution Cooler Electronics (DCE), in the on-board software controlling the SCE, in the interface that receives the telemetry and sends the commands to the SCE and in the data analysis preparation (L2). The team also participates to the calibration of the High Frequency Instrument (HFI).

L'expérience Planck est le projet le plus ambitieux de la communauté internationale sur le fonds diffus cosmologique et elle sera très probablement une référence pour les années à venir en ce qui concerne la mesure des anisotropies en température et en polarisation E du fond diffus à 3 K.

La mission satellite Planck sera mise en orbite par l'ESA en août 2007 au point de Lagrange, L2. Les objectifs de Planck sont multiples : tout d'abord la cartographie des anisotropies en température et en polarisation du CMB mais aussi l'étude des émissions diffuses des avant-plans galactiques, la fabrication d'un catalogue d'amas de galaxies pour des études cosmologiques via l'effet Sunayev-Zeldovich (SZ), la fabrication d'un catalogue de sources ponctuelles dans le domaine millimétrique ainsi que l'étude des objets astrophysiques compacts et froids, entre autres. Le satellite Planck est constitué de deux instruments : LFI (instrument basses fréquences) composé de radiomètres entre 30 et 70 GHz et HFI (instrument hautes fréquences) composé d'une matrice de bolomètres entre 100 et 857 GHz. Les radiomètres sont refroidis à 20 K par une machine cryogénique appelée « sorption cooler ». Par contre, les bolomètres sont refroidis à 100 mK par le même système de dilution $^3\text{He} - ^4\text{He}$ que pour l'expérience Archeops. Outre le système de refroidissement Planck-HFI et Archeops ont en commun le système optique (télescope hors axe grégorien et cornets de type « dos à dos ») et la stratégie de balayage du ciel via des grands cercles. En revanche, Planck a une résolution maximale d'environ 5 minutes d'arc (13 minutes d'arc pour Archeops), une sensibilité maximale de $40 \mu\text{K s}^{1/2}$ (entre 100 et $200 \mu\text{K s}^{1/2}$ pour Archeops) et couvrira 100% du ciel (30% pour Archeops) avec un temps d'intégration de 14 mois (12 heures pour Archeops). Planck devrait donc effectuer une mesure ultime du spectre de puissance du CMB en température pour des échelles angulaires supérieures à 10 arcmin et mesurer avec grande précision l'autocorrélation des modes E ainsi que leur corrélation avec la température. Par rapport aux modes B, Planck pourra fixer une limite supérieure sur l'énergie de l'inflation aux alentours de 10^{15} GeV.

L'IN2P3 participe à l'effort de conception d'une partie importante de l'électronique embarquée. Le LPSC a la responsabilité depuis novembre 1999, de produire l'électronique de pilotage et de contrôle du cryo-générateur à sorption qui assure le refroidissement à 20 K de LFI (Low Frequency Instrument) et représente une étape très importante dans la chaîne de refroidissement de HFI (High Frequency Instrument). L'équipe du LPSC a également la responsabilité de l'électronique de contrôle de la boîte à vannes de la dilution qui assure le refroidissement du plan focal de HFI à 100 mK.

Nos responsabilités sur Planck sont :

- sur le hardware embarqué : l'électronique du cryo-générateur à sorption (SCE) et l'électronique de la dilution (DCE) ;
- sur le software embarqué : le logiciel de pilotage et de contrôle de la SCE et l'interface avec un logiciel de l'ESA pour la télémétrie et les télécommandes ;
- la préparation à l'analyse de données de Planck-HFI : nombreux modules du niveau 2 de la DPC (Data Processing Center) ;
- la participation aux groupes de travail de Planck-HFI.

L'électronique du cryo-générateur à sorption (SCE) a dû être réalisée en coordination avec le travail de nos partenaires du Jet Propulsion Laboratory (JPL) à Pasadena (Californie-USA) responsables de la conception et construction des compresseurs de la machine cryogénique.

Les tests du logiciel de contrôle et de pilotage de la SCE ont exigé un effort important de toute l'équipe pendant toute l'année 2005. Une collaboration avec le laboratoire LSR (Logiciels Systèmes et Réseaux) de l'IMAG a été établie à ce sujet. Le travail en collaboration avec le LSR a été très utile et enrichissant. L'activité de l'équipe pendant la période 2004 - 2005 est détaillée dans les chapitres des différents services techniques concernés.

Une étape importante a été franchie en mai 2005, quand nous avons testé pendant un mois au Jet Propulsion Laboratory, le modèle cryogénique de qualification (CQM) de la SCE avec notre logiciel et l'avons couplé au modèle de vol des compresseurs (TMU) du JPL. Le test a permis de valider le logiciel et de démontrer que le

système (SCE+TMU) fonctionne. Pendant le deuxième semestre de 2005, l'équipe a dû assurer l'intégration de l'électronique SCE au satellite à Alcatel (Cannes) et participer aux différents tests. L'équipe du LPSC a également participé à l'étalonnage de HFI à Orsay en 2005.

◆ Participation à l'analyse de données de Planck-HFI

Depuis 2001, le LPSC participe activement à la préparation de l'analyse des données de Planck-HFI via le niveau 2 du Data Processing Center (L2). D'une part nous sommes responsables de la chaîne de prétraitement des données. Cette étape comprend notamment la correction des effets de l'électronique de lecture, la correction de gain dynamique et l'identification des signaux produits par des rayons cosmiques. Une étude statistique des caractéristiques de ces signaux sera par ailleurs un outil efficace pour caractériser le bon fonctionnement et la stabilité de chaque détecteur. Elle s'applique sur les données brutes et fournit des données ordonnées en temps utilisables par les éléments suivants de la chaîne d'analyse : traitement des effets systématiques ou production de cartes par exemple. D'autre part, continuant un effort commencé avec Archeops et qui se poursuit au-delà de Planck par une activité de recherche et développement sur les matrices de bolomètres, notre groupe participe à l'analyse des données polarisées par le développement de logiciels de production de cartes spécifiques. Enfin divers outils d'analyse permettant de vérifier ou de corriger la stationnarité des données grâce à l'utilisation des ondelettes par exemple sont mis à disposition de la collaboration.

Fin 2005, une première série de logiciels développés par l'ensemble des membres de L2 a été assemblée afin d'analyser des simulations réalistes des observations du futur instrument. Cet effort va s'intensifier et s'affiner jusqu'au lancement du satellite et naturellement se poursuivre ensuite. Notre groupe, associé à F.-X. Désert du LAOG, sera en première ligne pour traiter les informations issues quotidiennement des 52 bolomètres et 20 thermomètres fins de Planck-HFI durant les 2 années d'observation.

◆ Séparation aveugle de composantes polarisées

Dans le cadre des groupes de travail de Planck WG2 (développement de méthodes de séparation de composantes) et WG7 (étude des émissions d'avant-plan) nous avons développé à Grenoble une nouvelle méthode de séparation aveugle de composantes appliquée à des données polarisées. Celle-ci est basée sur la méthode SMICA-MDMC en température que nous avons adaptée aux données polarisées multifréquence de type CMB. Nous l'avons implémentée et testée sur des données simulées en polarisation de Planck. Nous nous sommes particulièrement intéressés à la mesure des modes B du CMB en présence des émissions d'avant-plans. Ces modes B signeraient la présence d'ondes gravitationnelles primordiales issues de la période d'inflation et permettraient de mesurer l'échelle d'énergie de cette dernière. Une publication des résultats est en préparation.

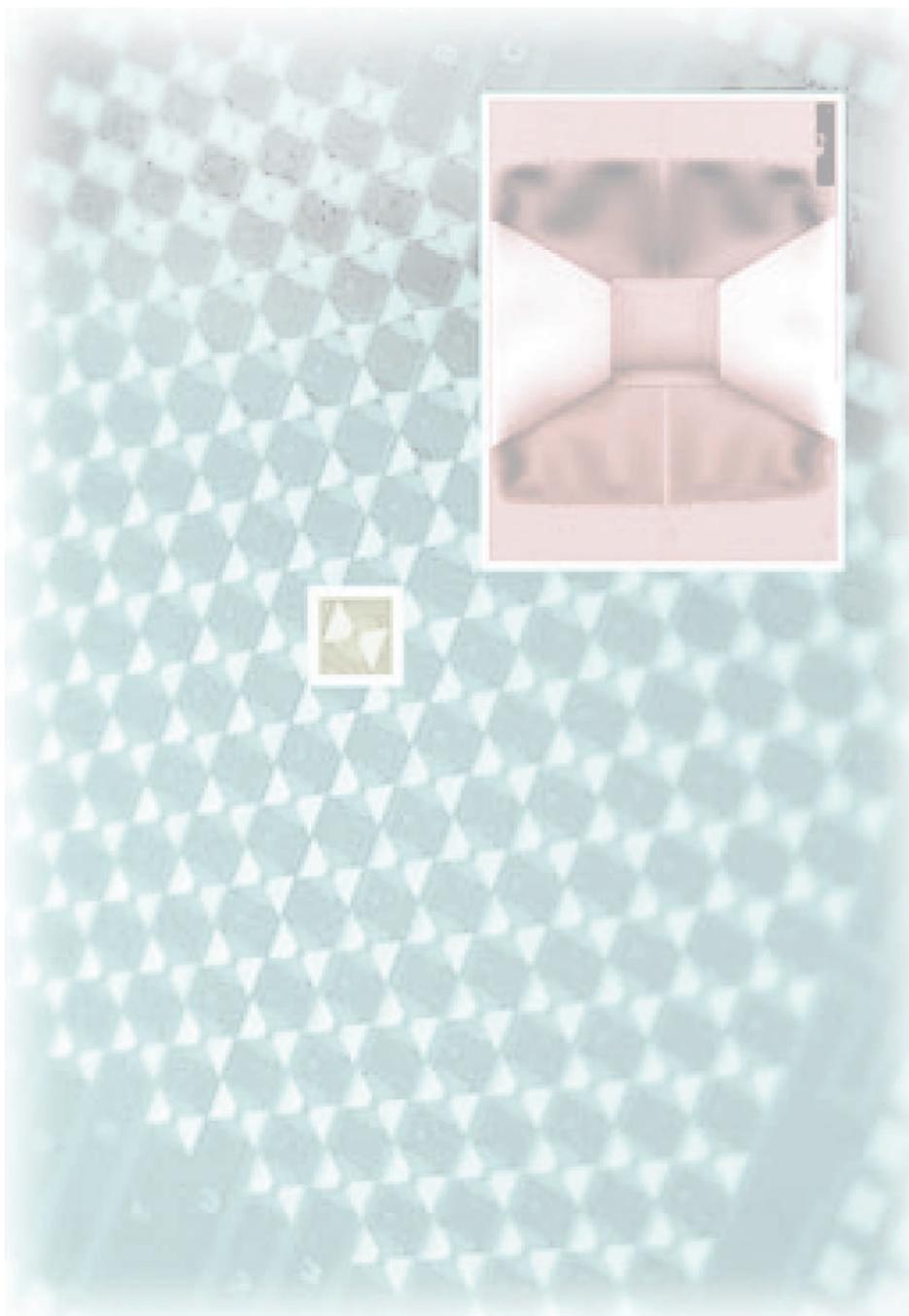
◆ Phénoménologie autour de l'Inflation

Afin de profiter de l'accès aux données de très bonne qualité comme celles d'Archeops ou dans un avenir proche celles de Planck, nous avons initié au sein de l'équipe une étude sur le *pre-heating* qui est la période de transition à la sortie de l'inflation vers l'ère de rayonnement. Dans cette transition il y a une période où le champ scalaire, l'inflaton, va transformer son énergie en rayonnement et matière. Une collaboration avec Mar Bastero-Gil de l'Université de Grenade a été établie afin de produire un code de calcul sur réseaux qui nous permette d'estimer et de décrire la physique de cette période de transition en introduisant les perturbations de la métrique spatio-temporelle. Le laboratoire a invité Mme Bastero-Gil pendant 3 mois en 2004 et pendant cette période nous avons pu réaliser le programme de calcul en série pour le modèle le plus simple *phi4* et pour un modèle hybride, avec deux champs. Cette collaboration a été très productive et nous avons pu générer un code plus général que les codes existants sur le sujet, par exemple *latticeeasy*. Ce calcul demande des ressources importantes en temps de calcul pour un réseau de 128 points par dimension spatiale. Donc, une version parallélisée a dû être produite. Nous sommes en train de « debugger » cette version parallèle et nous comptons avoir un outil qui nous permette de produire des résultats avant mars 2006.

◆ R&D : matrices d'antennes pour la matrice bolométrique

La polarisation du CMB, type B, celle qui nous permettra de contribuer à l'estimation du fond stochastique des ondes gravitationnelles primordiales, exige une grande sensibilité et une haute densité des détecteurs sur le plan focal. Une solution serait de remplacer les cornets qui font le couplage optique entre le télescope et les bolomètres par une matrice d'antennes adaptée à la fréquence que l'on veut détecter. Dans notre cas, nous sommes intéressés par les canaux millimétriques 143 GHz et 217 GHz pour le CMB, et pour les contaminants d'avant-plans 353 et 545 GHz. Nous participons à une ligne de R&D autour de cette problématique dans le cadre du

projet DCMB, financé par le CNES, et piloté par Alain Benoît du CRTBT. Au LPSC nous avons l'expertise de l'utilisation du logiciel HFSS utilisé pour le calcul en éléments finis de la réponse électromagnétique des coupleurs pour les accélérateurs. Avec le service de Détection et Instrumentation nous avons commencé à étudier les configurations possibles des matrices d'antennes qui pourraient être validées par une mesure de leur réponse avec un interféromètre de type Martin-Puplett qui a été conçu mi 2004, et construit au LPSC. L'interféromètre utilise des polariseurs et des lames séparatrices à fils tissés au LPSC. La conception et la construction de cet interféromètre ont été un défi mécanique pour notre laboratoire. Nous avons mesuré les premiers interférogrammes fin 2005. Plus d'informations peuvent être trouvées dans les chapitres des services techniques concernés.



R&D pour la détection directe de WIMPs : MIMAC-He3

D. Santos, V. Comparat, J. Macías-Pérez, F. Mayet, E. Moulin (th).

The existence and the nature of the non-baryonic dark matter are one of the most exciting topics in astroparticle research. The direct detection of WIMPs is one way to confirm the existence of such dark matter. The ^3He is proposed to be used as a target for detecting fermionic WIMPs by spin-spin interaction. The ^3He has very interesting properties showing a complementarity with the running projects. The team tries to validate a design of a detector using a micro-tpc matrix of gas chambers (MIMAC-He3).

En parallèle aux activités liées à l'étude du CMB, l'équipe est concernée par un problème complémentaire de la cosmologie observationnelle tel que l'existence et la nature de la matière sombre non baryonique. La méthode choisie pour contribuer à l'étude de ce problème est la détection directe de particules supersymétriques, plus généralement appelées WIMPs (Weakly Interactive Massive Particles) en utilisant l' ^3He comme cible.

L' ^3He a des propriétés très intéressantes pour ce type de détection : une signature claire de la capture de neutrons thermiques, une très faible section efficace Compton dans le domaine d'énergie de la radioactivité naturelle et un spin un demi qui ouvre le canal d'interaction spin-spin avec les WIMPs fermioniques comme le neutralino.

Depuis septembre 1999, le groupe a voulu développer un détecteur de WIMPs de nouvelle génération basé sur des cellules type Lancaster, d' ^3He superfluide à ultra basse température (100 microKelvin). Ce développement a été fait en collaboration avec le groupe de Henri Godfrin et Yuriy Bunkov du CRTBT. Ce travail nous a permis de valider les estimations préliminaires concernant l'intérêt d'utiliser ce système comme élément sensible dans la détection des particules interagissant faiblement avec la matière, puis de développer une méthode d'analyse des signaux provenant de la cellule. En 2004 nous avons mesuré la réponse d'un prototype multicellulaire à 3 cellules avec une source d'électrons de conversion interne de ^{57}Co produite au LPSC. Pour cela nous avons développé toute une stratégie de dépouillement des données avec une différenciation des événements près du seuil par ondelettes et construction d'un filtre optimal. Les résultats de cette expérience ont été publiés dans NIM.

À la lumière des résultats obtenus avec le prototype multicellulaire, nous avons décidé de faire évoluer l'idée du détecteur à l' ^3He vers une technique de détection qui nous permette d'avoir une discrimination électron-recoil. La nouvelle voie de développement consiste à utiliser une chambre de type micromegas ou GEM afin de collecter les charges primaires produites par ionisation par le noyau de recoil de l'interaction d'un WIMP, puis de les différencier des traces de longueur différente laissées par les électrons de même énergie. En effet, les électrons ont des parcours qui sont un ordre de grandeur supérieur à ceux des noyaux de recoil. Nous menons cette nouvelle ligne de R&D en collaboration avec l'ILL, Saclay et l'APC. Une des étapes importantes de validation de cette idée concerne la mesure du facteur de « quenching » dans l'hélium 3 aux énergies de recoil inférieures ou égales à 5,6 keV. Afin de réaliser cette mesure, le service de source d'ions du LPSC a conçu et construit une source de type ECR, pour accélérer des ions d' ^3He qui devront traverser une fine feuille de polypropylène avant d'entrer dans notre prototype où la mesure de l'énergie d'ionisation laissée par les ions sera faite. Le premier

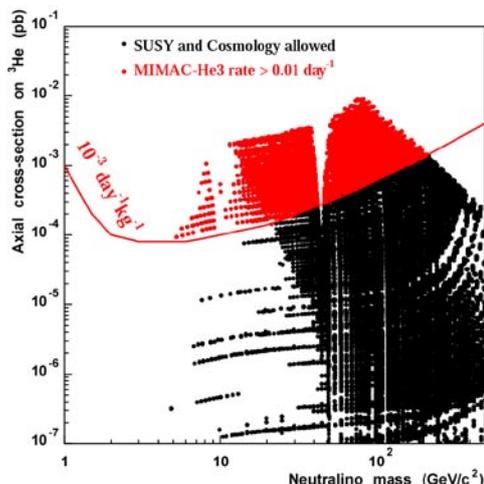


Figure 1: Les modèles supersymétriques accessibles à MIMAC-He3 (10 kg).

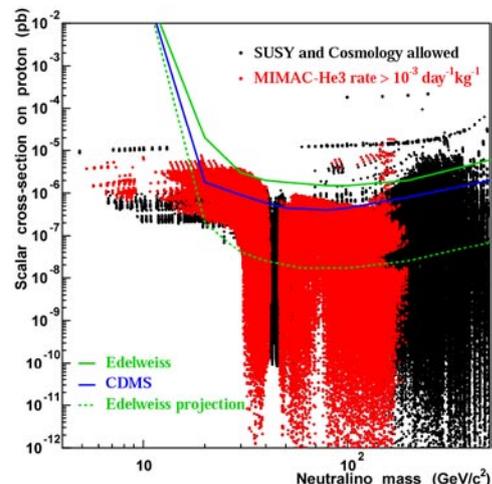
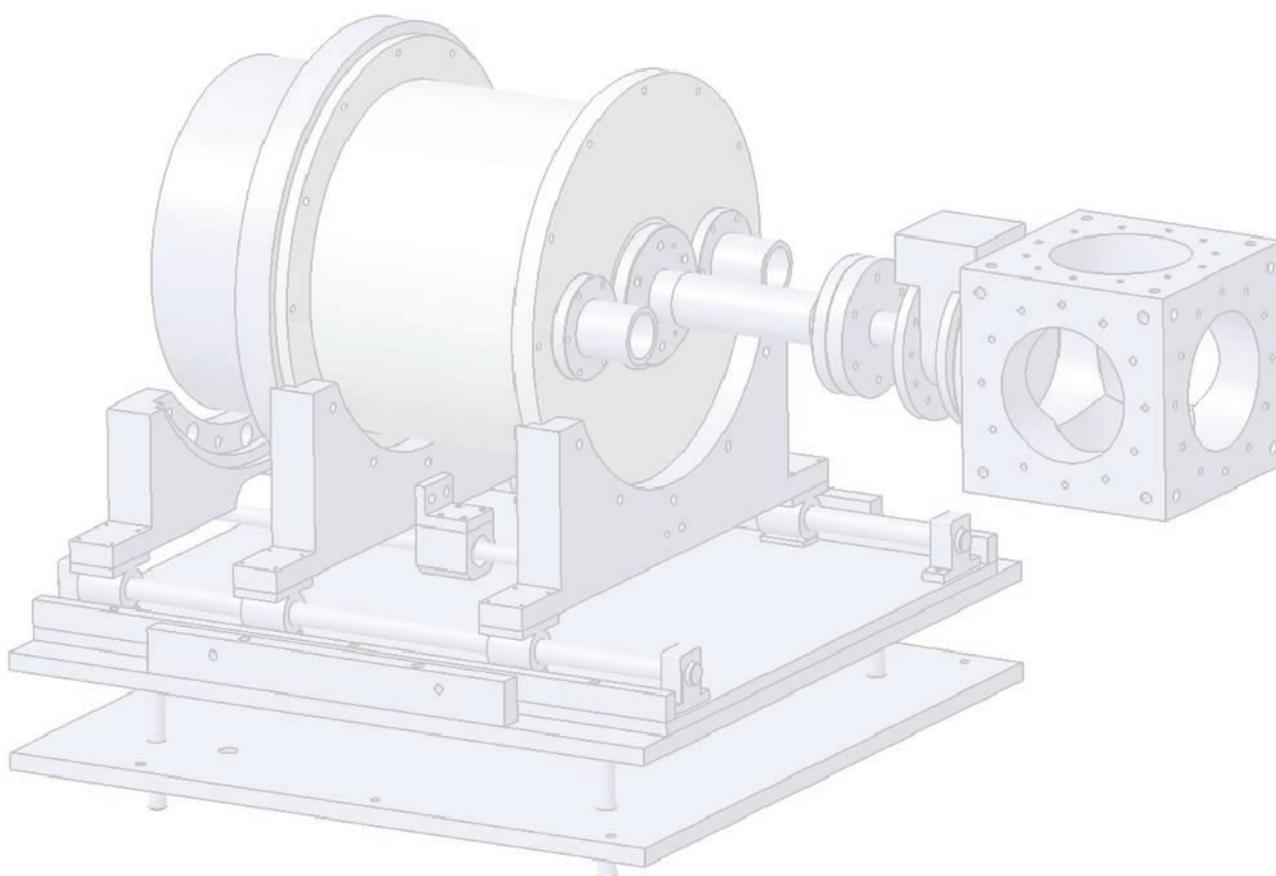


Figure 2: La distribution de ces modèles comparée aux courbes d'exclusion des projections d'expériences en cours. Ceci montre la complémentarité entre les détections axiale et scalaire.

faisceau a été fourni en septembre 2005 et la mesure de temps de vol afin de caractériser les énergies des ions sortants de la source a commencé fin 2005. La mesure du facteur de quenching est prévue pour mars 2006 et une mesure du bruit de fond dans notre prototype avec une électronique développée par le LPSC au laboratoire souterrain bas bruit de Rustrel est prévue pour juin 2006.

Nous avons publié, en 2005, un papier qui montre la complémentarité de notre projet MIMAC-He3 explorant la voie axiale (spin-spin) avec les autres projets existants qui explorent la voie scalaire de l'interaction faible. Les figures 1 et 2 illustrent cette complémentarité en montrant les modèles supersymétriques accessibles à MIMAC-He3.



L'expérience EUSO (Extreme Universe Space Observatory)

D.H. Koang, C. Berat, J. Chauvin, D. Lebrun, F. Montanet, S. Moreggia (th), A. Stutz.

The EUSO experiment was dedicated to the detection from space of Ultra High Energy Cosmic Rays, above the GZK cut-off (few 10^{19} eV). The aim was to understand how and where these UHECR could be produced: extremely efficient cosmic accelerators or decay of super heavy relic particles? EUSO would detect the atmospheric showers generated by the primary particles via a telescope recording the fluorescence light and the Cherenkov light signals produced when particles from the shower interact with the atmosphere. The received lights were to be imaged by a large Fresnel lens optic onto a finely segmented focal plane, equipped with multi-anode PMTs. The LPSC was involved in several parts of this project: design and test of the analog Front End Electronics, study of the performances of the detector with an end-to-end simulation ESAF, study of the UV background and light reflection on earth with the Ultra experiment.

Dans la nature, les particules les plus énergétiques jamais observées sont les rayons cosmiques. L'existence et l'origine de rayons cosmiques d'énergie de l'ordre de 10^{20} eV soulèvent des questions dans les domaines de la physique fondamentale, la cosmologie et l'astrophysique. Le projet EUSO a pour but l'observation et l'étude de ces rayons cosmiques, en utilisant un télescope installé sur la Station Spatiale Internationale pour détecter de la lumière UV émise lors de l'interaction des rayons cosmiques avec l'atmosphère terrestre nocturne. Cette approche nouvelle de détection des gerbes atmosphériques, qui consiste à placer un imageur finement segmenté dans l'espace, de façon à bénéficier d'un angle de vue très important, pourrait permettre d'augmenter de un à deux ordres de grandeur le nombre d'événements super GZK détectés par rapport aux données existantes. EUSO devrait permettre une détermination précise du spectre global des rayons cosmiques à ces énergies, la distribution de leur direction d'arrivée, l'identification et le dénombrement des sources compactes si elles existent ainsi que la mesure de leurs spectres individuels. EUSO constitue une mission pionnière dans le domaine.

La collaboration EUSO regroupe plusieurs pays d'Europe, le Japon et les USA. En France, trois laboratoires de l'IN2P3, dont le LPSC, sont impliqués. Le projet EUSO a été présenté à l'agence Spatiale Européenne (ESA) en 1999 pour voler sur un satellite et a été sélectionné en 2000 pour une installation sur le module Columbus de la Station Spatiale Internationale. L'étude dite de phase A a démarré au printemps 2002 et s'est terminée durant l'été 2004. Et en attente d'une décision de l'ESA sur l'entrée dans la phase B, des travaux de R&D se sont poursuivis pendant l'année 2005. L'équipe de Grenoble, composée de six personnes, était pleinement impliquée dans ces études pour lesquelles différentes responsabilités lui avaient été confiées. Le groupe était responsable du sous-système dédié à l'électronique analogique de premier niveau, et avait des responsabilités à l'intérieur du sous-système *Simulation*. Il a participé également à des expériences de validation pour EUSO (expérience ULTRA).

Bien que les conclusions des études de la phase A aient été jugées satisfaisantes au niveau des ambitions de la physique et au niveau technique, EUSO a été d'abord mise « en veille » pour raison d'incertitudes pesant sur la Station Spatiale internationale et d'attente des premiers résultats d'Auger. L'arrêt du projet a été définitif en octobre 2005 par suite du retrait officiel de l'ASI, principal bailleur de fond avec la NASA et la JAXA. (Certains des collaborateurs d'EUSO se sont regroupés pour envisager une refonte de ce projet dans le cadre des Cosmic Visions 2015 - 2025 de ESA.)

◇ Évaluation des performances d'un détecteur spatial

Beaucoup de travail de modélisation a été réalisé pour permettre d'apporter des réponses précises quant à la faisabilité d'un détecteur spatial tel que le détecteur EUSO. Dans une première étape, des simulations dites « rapides » ont été élaborées au sein de la collaboration pour obtenir des estimations de l'acceptance du dispositif, des taux de comptage, des bruits de fond, de la résolution en énergie, et de la capacité d'identification des primaires, afin de rédiger le rapport de la fin de phase A exigé par l'ESA.

Un programme de travail plus ambitieux a été initié, concernant à la fois la simulation du fonctionnement du détecteur, et également la reconstruction des événements : le logiciel de simulation et d'analyse de l'expérience EUSO, nommé ESAF pour Euso Simulation and Analysis Framework a été développé. Un de ses objectifs est de simuler entièrement l'expérience EUSO, depuis la première interaction du primaire jusqu'aux informations transmises par l'électronique du détecteur, en passant par le développement de la gerbe atmosphérique, la génération de la fluorescence et du rayonnement Cherenkov, le transfert radiatif dans l'atmosphère, les sources de bruit de fond, l'optique et l'électronique du détecteur. Le but est de simuler chacun des processus physiques

« indépendamment » les uns des autres, c'est-à-dire que l'utilisateur peut simuler un seul maillon de la chaîne et ainsi vérifier quantitativement les différences induites par les diverses configurations de cette partie de la simulation. Le logiciel a été conçu pour permettre également la reconstruction et l'analyse des données réelles et simulées. Pour répondre à ce cahier des charges, les fonctionnalités de la programmation Orientée Objet (code écrit en C++) sont utilisées. En outre, le logiciel ESAF exploite plusieurs potentialités de ROOT (outils d'analyse, environnements graphiques).

Le groupe du LPSC a développé plusieurs parties du logiciel, concernant la modélisation de l'atmosphère, le développement des gerbes, la production du signal lumineux, et sa transmission dans l'atmosphère jusqu'à l'entrée du détecteur, en tenant compte des processus de diffusion, de réflexion et d'absorption.

Description de l'atmosphère

Un détecteur spatial en orbite autour de la Terre aura dans son champ de vue une atmosphère dont les caractéristiques vont varier rapidement en raison du déplacement du détecteur. Or, les caractéristiques de l'atmosphère (composition, variables thermodynamiques et leurs profils, nuages, polluants) ont une influence sur les premières étapes de la détection des rayons cosmiques : développement de la gerbe, production de lumière et transfert radiatif. Le logiciel ESAF est conçu pour utiliser la même description de l'atmosphère à chaque étape de la simulation de ces trois processus. Le groupe a développé les outils permettant d'avoir accès à différents modèles d'atmosphère, utilisés dans la communauté des atmosphériciens.

Un certain nombre de travaux ont montré que la présence de nuages dans le champ de vue du télescope représentera environ 60% du cycle utile, et les événements détectés en présence de nuages devront être analysés. En l'état actuel, la description des nuages dans le logiciel est simplifiée (altitude, hauteur, profondeur optique). L'introduction de données satellite plus élaborées est envisagée.

Développement des gerbes et production du signal lumineux

Les gerbes peuvent être simulées à partir de formes analytiques décrivant leur développement longitudinal, tout en incluant les fluctuations du premier point d'interaction. On obtient ainsi le nombre de particules chargées en fonction de l'altitude. Pour compléter cette description, on a introduit une modélisation de la distribution latérale des électrons, ainsi que différentes représentations analytiques de leur distribution en énergie et en angle.

Les photons de fluorescence sont générés en tenant compte des résultats de mesure sur la production de fluorescence. Le rendement de fluorescence pour chaque longueur d'onde est calculé suivant les caractéristiques locales de l'atmosphère et le spectre en énergie des électrons.

Les photons Cherenkov sont générés d'après la relation de Frank et Tamm, entre 300 et 450 nm, en utilisant l'indice de réfraction local. Le taux de production tient compte de la distribution en énergie des électrons, et la distribution angulaire de ces derniers est utilisée pour générer la distribution angulaire des photons.

Quel que soit le type de photons, on tient compte également de la distribution latérale des électrons.

Transfert radiatif

Le nombre de photons produit étant de l'ordre de 10^{15} , une simulation purement Monte-Carlo de leur propagation dans l'atmosphère n'est pas possible. Dans le domaine de longueur d'onde UV correspondant à la sensibilité du détecteur, les composantes de l'atmosphère sont purement diffusantes, excepté l'ozone qui, situé aux environs de 20 km d'altitude, absorbe fortement les photons de longueur d'onde inférieure à 330 nm. La diffusion par les molécules de l'air est bien décrite par la loi de Rayleigh. Les diffusions par les poussières et impuretés des basses couches de l'atmosphère (les aérosols) et les nuages, suivent la loi de Mie. À cause de ces différents processus, une part seulement de la fluorescence émise en direction du détecteur sera effectivement transmise. Des photons de fluorescence initialement émis dans une autre direction pourront être diffusés vers le télescope et distordre le signal. La plupart du rayonnement Cherenkov émis le long de la gerbe va subir une réflexion au sol. Certains des photons Cherenkov, diffusés vers le télescope, contribuent à « polluer » le signal de fluorescence, d'où l'importance de simuler correctement cette contribution.

Dans un premier temps, le travail a consisté à transférer en tenant compte de leur probabilité d'être diffusé ou absorbé :

- les photons de fluorescence émis dans l'angle solide du détecteur,
- les photons Cherenkov réfléchis au sol,
- les photons Cherenkov diffusés une fois.

Pour cette première approche de simulation du transfert radiatif, la méthode a consisté à regrouper les photons

en paquets, propagés pas à pas en tenant compte des distributions latérale, angulaire, longitudinale et du spectre en longueur d'onde.

Cette méthode ne permettait pas de simuler de façon simple la diffusion de fluorescence dont l'émission est isotrope. Une solution alternative a donc été développée. Le télescope est situé à 430 km d'altitude, et le développement des gerbes a lieu dans les basses couches de l'atmosphère. Ces conditions permettent de tenir compte de l'angle solide formé par la pupille du télescope en début de simulation. Celui-ci étant de l'ordre de 10^{-11} stéradians, le nombre de photons à simuler devient raisonnable ($\sim 10^5$). Pour un temps de calcul légèrement plus élevé, cette méthode permet de simuler non seulement la diffusion de la fluorescence et du Cherenkov, mais aussi de traiter les ordres supérieurs de diffusion (diffusion multiple). Cette méthode est également indispensable pour traiter le transfert radiatif dans les nuages. Il suffit pour cela de fixer un ordre maximal de diffusion et, pour que la méthode soit valide, de simuler **indépendamment** chaque ordre de diffusion. À noter que les deux méthodes appliquées à la diffusion Rayleigh simple du Cherenkov, donnent des résultats identiques.

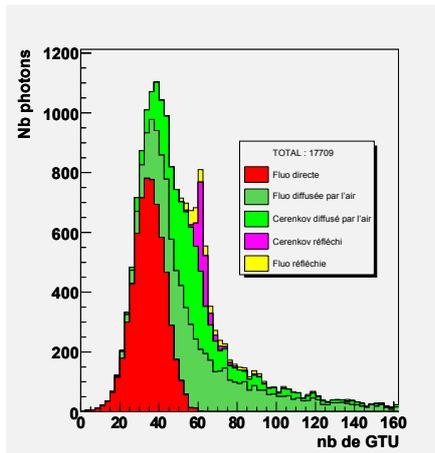


Figure 1: Distribution en temps des différentes composantes du signal intégré sur la surface totale de la pupille.

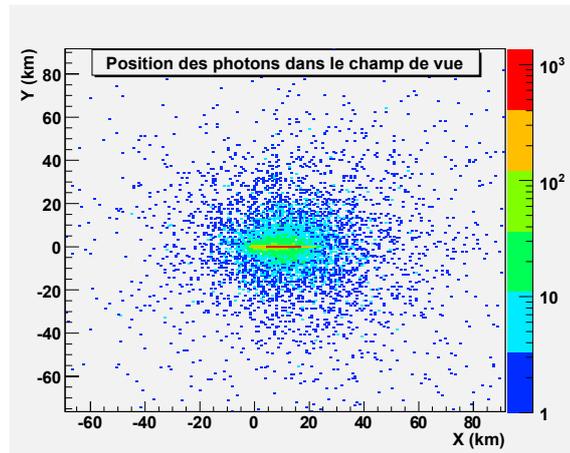


Figure 2: Position des photons projetés dans le plan horizontal de la pupille.

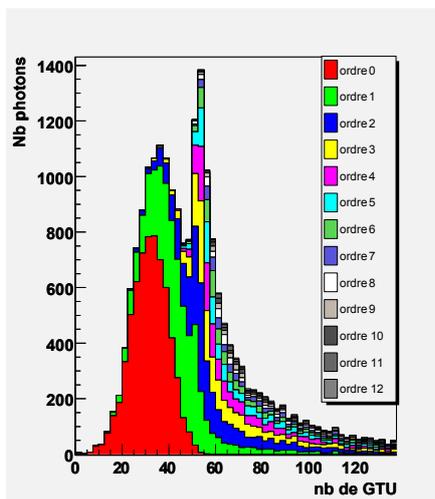


Figure 3: Distribution en temps du signal sur la pupille pour la même gerbe que la figure 1 mais en présence d'un nuage, ceci pour les différents ordres de diffusion.

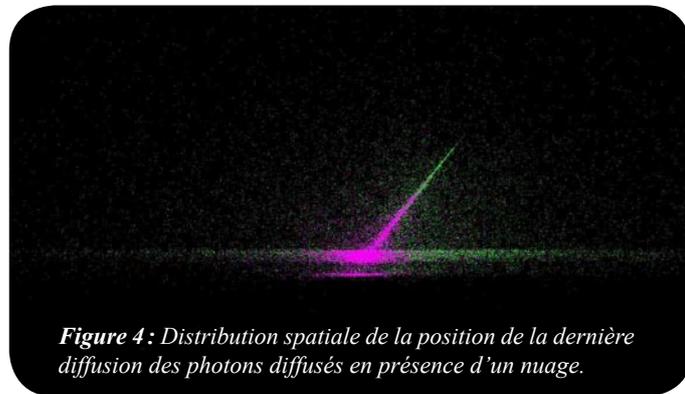


Figure 4: Distribution spatiale de la position de la dernière diffusion des photons diffusés en présence d'un nuage.

directement sur le détecteur. Le maximum du profil en temps est retardé de 3 GTU (1 GTU = 2,5 μ s). Le nombre de photons au maximum est augmenté de 40%. Ainsi, du fait de la cohérence temporelle des photons diffusés avec les photons directs, les caractéristiques du signal semblent fortement perturbées. Cependant, la surface focale du télescope étant pixellisée, il nous faut tenir compte de la dispersion des photons dans le champ de vue du télescope afin d'estimer cette fois-ci la cohérence spatiale entre photons diffusés et directs. Une première

étude a été menée et semble montrer qu'en ciel clair la fluorescence diffusée et les ordres de diffusion supérieurs à trois contribuent de manière négligeable à la pollution du signal. La figure 2 représente la position des photons projetés dans le plan horizontal. On constate que la majeure partie des photons diffusés ne touche pas les mêmes pixels que le signal direct. Les figures 1 et 3 montrent l'effet, sur la même gerbe, de nuages situés entre 1 et 2 km d'altitude et de profondeur optique égale à 1. En présence de nuages optiquement épais, jusqu'à 7 ou 8 ordres de diffusion semblent nécessaires pour estimer de façon fiable la contribution des photons diffusés. La figure 4 présente la distribution spatiale, en présence d'un nuage, de la position de la dernière diffusion de ces photons.

Perspectives

Dans le cadre d'une thèse, des études systématiques sont menées à partir des résultats de la simulation, pour mieux aborder et définir les étapes de la reconstruction, plus particulièrement celles concernant le profil de la gerbe et la détermination de l'énergie du primaire. Même si le groupe termine sa participation au projet EUSO, le travail réalisé pour le logiciel de simulation et d'analyse ESAF est exploité pour mieux comprendre le fonctionnement d'un télescope UV basé dans l'espace. Grâce à son adaptabilité, sa flexibilité et sa modularité, il peut jouer un rôle clé dans des études de faisabilité pour de futures propositions d'expériences spatiales de détection de grandes gerbes atmosphériques, dans le cadre du programme **Cosmic Vision 2015 - 2025**, pour ne citer que celui-là.

◆ Une électronique front end analogique submicronique

L'électronique *Front End* d'EUSO comporte une partie digitale et une partie analogique. La partie digitale assure les fonctions de comptage, de marquage X-Y, de déclenchement de premiers niveaux et de stockage dans les mémoires numériques. L'analogique remplit le rôle de préamplificateur, d'intégration des signaux et de stockage dans des mémoires analogiques. Pour des raisons de compacité, d'économie d'énergie et de fiabilité, l'ensemble de l'électronique Front End est à construire à partir de circuits intégrés spécifiques (ASIC).

Deux mini-circuits d'études d'ASIC de 2,8 et 12 mm² ont d'abord été réalisés en technologie CMOS puis un en technologie SiGe 0,35µm d'AustriaMicroSystem pour l'étude des fonctions analogiques. Les mesures effectuées sur ces circuits ont fourni des résultats conformes aux valeurs attendues pour la plupart des fonctions étudiées. Les figures 5 et 6 montrent les plages de linéarité pour les signaux d'anode et de dynode en régime impulsif.

Le premier prototype commun intégrant la partie analogique et numérique pour 18 voies a été réalisé en collaboration avec le groupe de Gênes fin 2004. Le but était d'aboutir au bout de 2 ans avec 3 prototypages successifs à un dessin final de l'unité de lecture frontale des photomultiplicateurs multi anodes MARS (pour Multi Anode Readout System). En combinant la technique de comptage de photons uniques et la méthode d'intégration de charge, MARS devrait pouvoir couvrir une dynamique de quatre ordres de grandeur (de 0,3 photoélectrons à 3 000 photoélectrons) avec une non linéarité inférieure au pour cent. De plus, en introduisant un système de remise à zéro des intégrateurs une fois saturés associé au comptage du nombre de saturations, MARS devrait mesurer avec une précision moindre les charges supérieures allant jusqu'à 30 000 photoélectrons. La puissance consommée a été limitée à 1,2 mW par voie pour répondre à la contrainte d'un détecteur embarqué qui est de 300 W pour l'ensemble des 200 000 pixels du télescope.

Un début de collaboration a été établi avec les services du CNES. Un test de latch-up sous irradiations a été effectué par le CNES-Toulouse sur un des premiers circuits de 12 voies. Le taux de latch-up pour l'orbite de l'ISS mesuré est de $4,4 \cdot 10^{-6}$ événement par jour et par composant soit 1 latch-up par composant tous les 622 ans. Ce taux est acceptable pour le télescope d'EUSO qui devra assurer une observation nocturne de l'atmosphère. D'autres tests devraient suivre pour aboutir à une qualification aux normes spatiales.

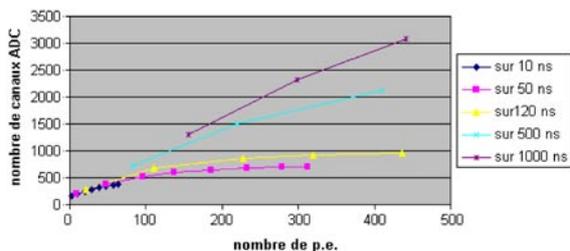


Figure 5 ▲ Linéarité du signal d'anode en régime impulsif.

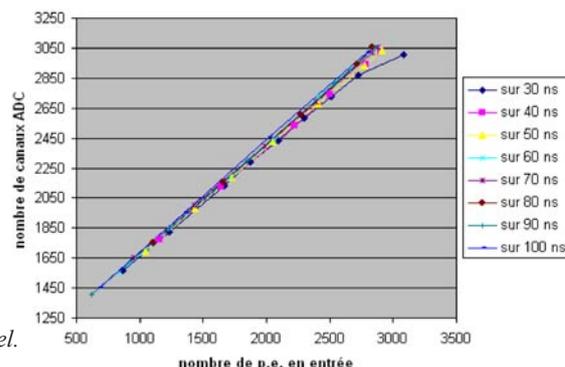


Figure 6 ► Linéarité du signal de dynode en régime impulsif.

ULTRA : une expérience de validation au sol pour le télescope spatial EUSO

Les objectifs principaux d'ULTRA sont la mesure de la lumière réfléchie UVA Cherenkov associée aux gerbes atmosphériques sur différents types de surfaces terrestres typiques (océans, sables...)

Trois instruments de base constituent ULTRA :

- un petit réseau (ET-Scope) composé de cinq stations (scintillateurs plastiques) en coïncidence, pour la détection au sol des particules de la gerbe atmosphérique. La géométrie actuelle du réseau est celle d'un carré avec une station au centre ;
- un télescope UV (Belenos) placé au centre de l'ET-Scope et regardant vers le haut pour la détection des UV directs. Un Belenos est constitué de deux télescopes identiques en coïncidence. Pour chaque télescope, deux lentilles de Fresnel focalisent la lumière sur la photocathode d'un PM ;
- un télescope UV (UV-Scope) placé en hauteur, pointant vers le sol et dont le champ de vue recouvre la totalité de la surface de l'ET-Scope. Cet UV-Scope mesure les UV réfléchis.

◆ Déploiement du réseau au LPSC

En 2004 le détecteur a été déployé sur le campus du LPSC (Figure 7), la surface disponible permettant l'installation d'un réseau de surface avec un pas de 54 mètres. Le télescope UV Belenos était installé à proximité de la station centrale. Au printemps, plusieurs périodes de prises de données de nuit autour de la nouvelle lune ont permis de caractériser la lumière Cherenkov associée aux gerbes : distribution latérale et intensité en fonction de la taille de la gerbe mesurée par le détecteur au sol. Les résultats sont présentés sur la figure 8.

Le site du LPSC en milieu périurbain souffre naturellement d'un fort taux de pollution lumineuse qui n'autorise la détection de la lumière Cherenkov que pour les gerbes les plus énergétiques.



Figure 7 : Trois stations de l'ET-scope sur le site du LPSC.

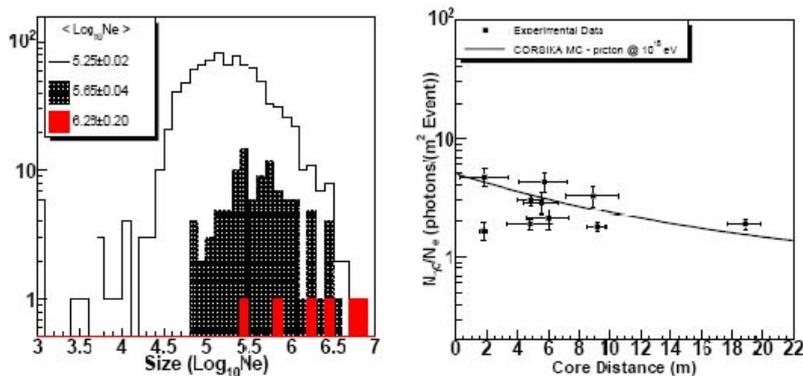


Figure 8 : À gauche, distribution des tailles de gerbes détectées par le réseau au sol (blanc), donnant un signal Cherenkov dans le télescope au zénith (noir), et un signal de lumière réfléchi (rouge).

À droite, distribution latérale de la lumière Cherenkov normalisée à la taille de la gerbe, comparée sans ajustement à la valeur attendue par le logiciel de simulation Corsika.

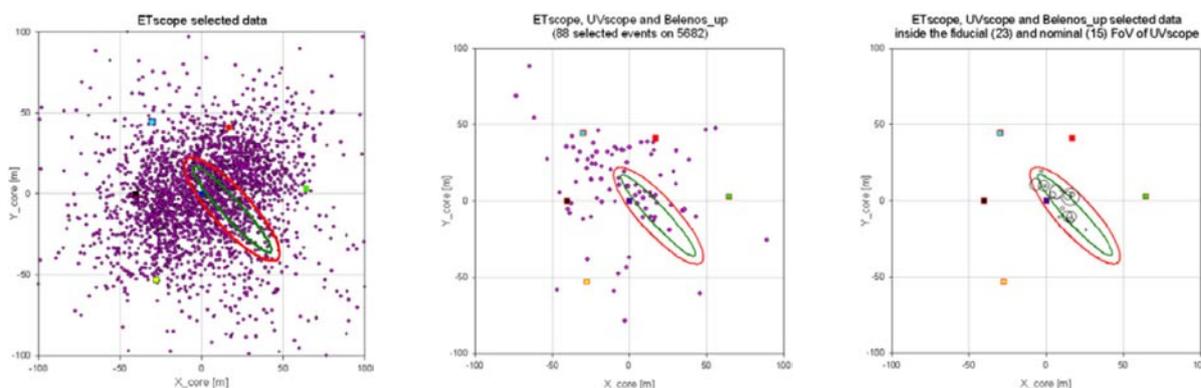
En l'absence du télescope UV, et malgré le taux élevé de bruit de fond lumineux, nous avons tenté de détecter la lumière réfléchie par le sol recouvert de matériaux de forte réflectivité. Pour cela, un deuxième système Belenos a été construit rapidement et a été installé à proximité du centre du réseau à une hauteur de 2 mètres pointant vers le sol recouvert par 30 m² de Tyvek, matériau fortement diffusant. Sur un ensemble de 76 heures de comptage, et compte tenu de la sensibilité des télescopes aux gerbes les plus énergétiques, 6 événements en coïncidence avec tous les détecteurs ont été clairement identifiés comme correspondant à des gerbes dont le signal Cherenkov réfléchi par le sol avait été détecté. Le taux de ces événements conduit à estimer la réflectivité du Tyvek à $77 \pm 17\%$. Cette valeur est à comparer avec la valeur nominale de 80% dans la bande de longueur d'onde du signal Cherenkov. Une autre approximation de la réflectivité peut être obtenue par l'analyse du rapport des taux de bruit de fond lumineux lorsque le Belenos pointe au zénith et au nadir, on obtient alors une réflectivité de $87 \pm 16\%$.

Le principe de la détection de la lumière Cherenkov réfléchie a ainsi été établi.

◆ Déploiement du réseau sur mer: ULTRA en Sicile

Le but principal de l'expérience étant d'étudier la réflectivité de la lumière Cherenkov sur la mer, au printemps 2005, ULTRA a été déployé sur le site marin de l'Institut d'Écologie Marine de Mazara à Capo Granitola (Sicile, Italie). La configuration du site a permis une implantation aisée du réseau au pas de 100 mètres : les 4 détecteurs au sol entouraient le détecteur central et le télescope Bélénos embarqués sur une plateforme flottante. Le télescope UV, en position surélevée sur la berge, pointait au centre du réseau.

Des données ont été recueillies au cours de 4 campagnes de mesure de septembre à décembre 2005. Le faible bruit de fond nocturne et une surface de collection de l'UV-Scope 50 fois supérieure à celle du Belenos2 précédemment utilisé, ont permis la détection de la lumière réfléchie pour une réflectance marine inférieure à 1%. Il est également intéressant de noter que, sur la mer, certaines gerbes peuvent avoir un comportement lumineux spécifique, car elles continuent de se développer sous l'eau. La lumière créée sous l'eau peut alors contribuer au signal détecté, en particulier dans la ligne de visée. Les données sont en cours d'analyse actuellement mais des résultats partiels sont présentés sur les figures 9 et 10.



Figures 9 et 10 : À gauche, impact des gerbes détectées par le détecteur au sol, superposé avec le FOV de l'UV-Scope. Au centre, impact des gerbes vues par le Belenos au zénith et l'UV-Scope. À droite, impact des gerbes vues par tous les détecteurs, dont le cœur est dans le FOV de l'UV-Scope.

◆ Mesure en laboratoire de la BRDF des sols et de la mer à 360 nm

Dans le cadre du programme EUSO et de son expérience de validation ULTRA dont l'objectif est la détection de la fraction réfléchie au sol de la lumière Cherenkov associée aux gerbes cosmiques, nous avons entrepris des mesures de la fonction de réflectance diffuse bidirectionnelle (BRDF) sur différents matériaux d'intérêt pour les programmes considérés.

Dans ce but nous avons construit un spectro-gonio-réfectomètre qui est décrit dans les activités du Service Détection et Instrumentation. Après calibration avec un échantillon de référence standard (Spectralon), un certain nombre de mesures ont été réalisées au laboratoire avec une sensibilité relative inférieure à 0,1% de la référence.

◆ Effets des vagues sur la réflectivité de l'eau

L'état de surface des océans est bien connu pour avoir une grande influence sur le bilan radiatif des échanges air-océan. Nous avons simulé l'effet des vagues sur l'eau, en insufflant au-dessus du plan d'eau un débit régulier d'air dans différentes orientations. La figure de diffusion est fortement dépendante de l'orientation des déformations de surface.

De plus, dans la région diffuse non spéculaire, de fortes variations de la réflectance ont été observées. Elles dépendent de la profondeur d'eau et de l'albédo du fond. Ces résultats indiquent que l'intensité de la lumière Cherenkov réfléchie détectée par EUSO au-dessus des océans ou par ULTRA au-dessus de la mer, devrait dépendre fortement des conditions locales de la surface de l'eau et de l'angle d'incidence des gerbes aussi bien en zénith qu'en azimut (Rapport LPSC-05-120).

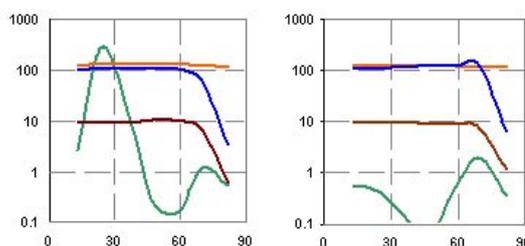


Figure 11 : Fonction de réflectance relative dans le plan spéculaire à gauche et dans le plan normal à droite. Les données concernent des échantillons de PTFE (rouge), de neige (bleu), de roche (marron) et d'eau pure (vert).

