

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.

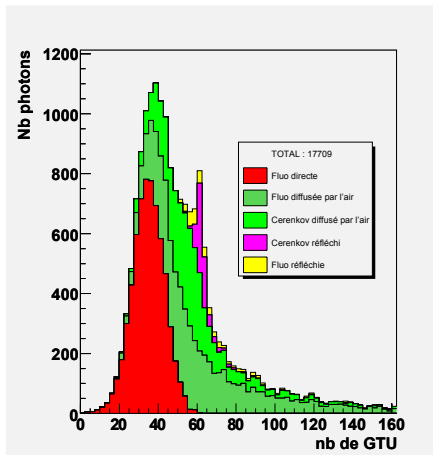


Figure 1: Distribution en temps des différentes composantes du signal intégré sur la surface totale de la pupille.

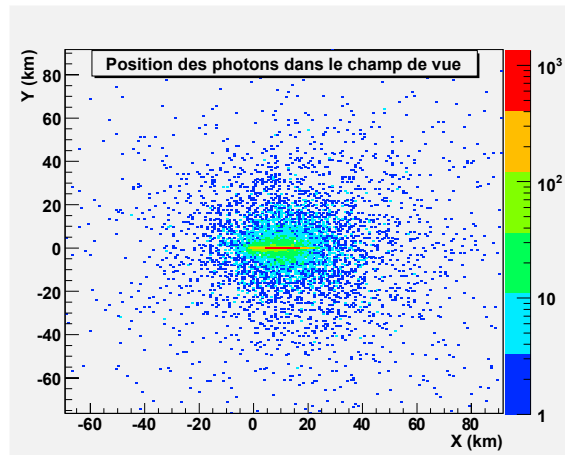


Figure 2: Position des photons projetés dans le plan horizontal de la pupille.

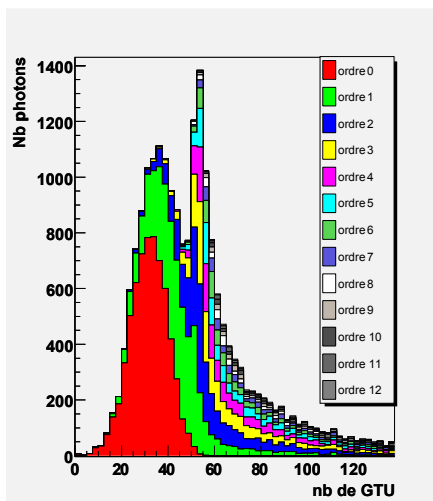


Figure 3: Distribution en temps du signal sur la pupille pour la même gerbe que la figure 1 mais en présence d'un nuage, ceci pour les différents ordres de diffusion.

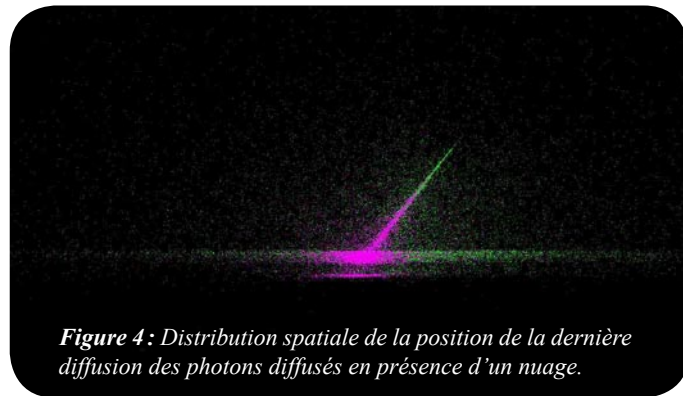


Figure 4: Distribution spatiale de la position de la dernière diffusion des photons diffusés en présence d'un nuage.

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 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.

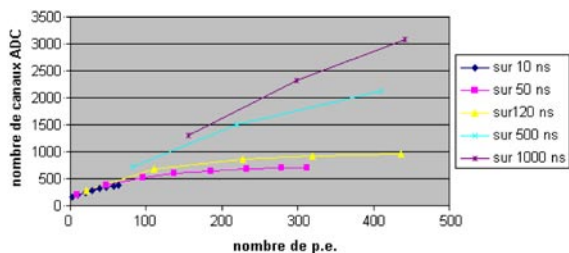


Figure 5 ▲ Linéarité du signal d'anode en régime impulsif.

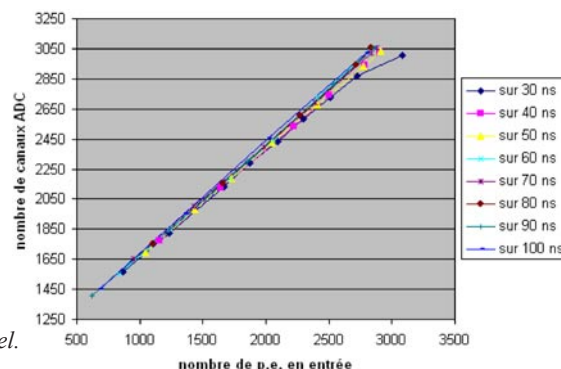


Figure 6 ► Linéarité du signal de dynode en régime impulsif.

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.

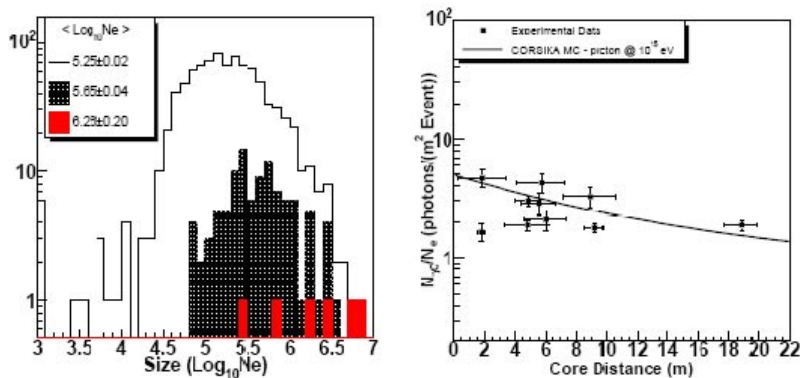


Figure 8 : À gauche, distribution des tailles de gerbes détectées par le réseau au sol (blanc), donnant un signal Cherenkov dans le télescope au zénith (noir), et un signal de lumière réfléchi (rouge).

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.

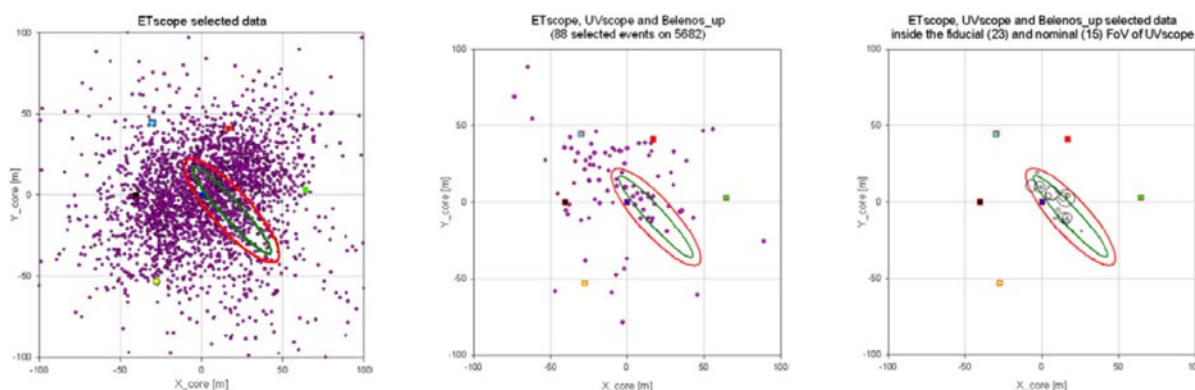
En l'absence du télescope UV, et malgré le taux élevé de bruit de fond lumineux, nous avons tenté de détecter la lumière réfléchi par le sol recouvert de matériaux de forte réflectivité. Pour cela, un deuxième système Belenos a été construit rapidement et a été installé à proximité du centre du réseau 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 réfléchi 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).

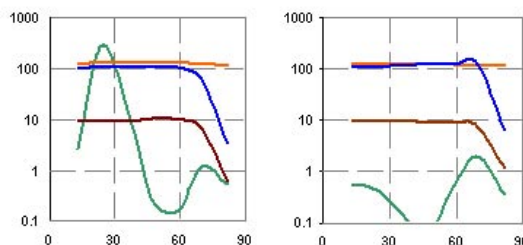


Figure 11 : Fonction de réflectance relative dans le plan spéculaire à gauche et dans le plan normal à droite. Les données concernent des échantillons de PTFE (rouge), de neige (bleu), de roche (marron) et d'eau pure (vert).

