



# L'observatoire Pierre AUGER

(stage de détection effectué au laboratoire AstroParticules et Cosmologie)

N. BERNAL<sup>\*,†</sup> & J. QUÉVA<sup>†,‡</sup>

14 Mars 2005

## CONTENU DU DOCUMENT

<b>I. Introduction</b>	<b>1</b>
<b>II. Chaîne de détection et électronique</b>	<b>1</b>
A. Les détecteurs au sol . . . . .	1
Géométrie générale . . . . .	1
Les cuves ČERENKOV . . . . .	2
Les triggers physiques & l'acquisition	2
B. Les détecteurs de fluorescence . . . . .	2
C. Les communications . . . . .	3
D. Reconstruction des données du réseau au sol	4
<b>III. Conclusion</b>	<b>5</b>

## I. INTRODUCTION

Depuis plus de 40 ans (Volcano Ranch (USA), 1962) on a l'évidence observationnelle de rayons cosmiques d'ultra haute énergie. Ceux-ci ont été l'objet d'étude de plusieurs expériences de par le monde (Haverah Park (UK), Fly's Eye (USA), ...) qui nous ont confirmé leur existence. Néanmoins ces rayonnements, qui sont probablement une manifestation des phénomènes les plus violents de l'univers, restent à ce jour complètement inexplicables. Il existe deux sortes de modèles quant à leurs origine : 1. ceux basés sur des processus astrophysiques d'accélération dus aux irrégularités magnétiques interstellaires (mécanisme de Fermi, scénarios dits *Bottom-Up*), 2. ceux faisant intervenir la désintégration de particules super-massives ( $m \simeq 10^{24}$  eV, scénarios dits *Top-Bottom*), qui requièrent une nouvelle physique. Les modèles astrophysiques prédisent une anisotropie des directions d'arrivée (comme ils supposent l'existence de sources), alors que les modèles de physique nouvelle prédisent une isotropie de ces directions. Aux plus hautes énergies, soit à plus de  $10^{20}$  eV, les deux expériences les plus récentes, HiRes et AGASA, observent un comportement différent : seule la première "voit" la coupure GZK<sup>1</sup>. L'observatoire Pierre AUGER couple les deux principales techniques de détection : un

système de détection au sol des particules de la gerbe et un autre pour le rayonnement de fluorescence produit par l'interaction de la gerbe avec l'atmosphère. Il a été décidé, lors de la rédaction du cahier des charges de l'observatoire (The Auger Collaboration 1997), d'étudier le flux des particules de haute énergie, *i.e.* leurs énergies, leurs directions d'arrivée et la nature du primaire (proton, noyau, photon, neutrino?). Ainsi l'observatoire pourra confirmer ou non la coupure GZK, plaider pour une classe de modèle ou l'autre, les contraindre, sachant que pour les modèles de type astrophysique la tache des gerbes permet de remonter à l'histoire magnétique des particules du primaire.

Pour plus de détails sur la physique des rayons cosmiques de haute énergie on pourra se reporter aux deux articles de revue de Nagano & Watson (2000) et Bertou, Boratav & Letessier-Selvon (2000).

## II. CHAÎNE DE DÉTECTION ET ÉLECTRONIQUE

### A. Les détecteurs au sol

#### Géométrie générale

Des précédentes observations (ICRC 2003, Tsukuba) on s'attend à un flux de l'ordre de 1 particule par siècle par  $\text{km}^2$ , la communauté AUGER désirant une soixantaine d'événements par an, 30 dans l'hémisphère nord, 30 dans l'hémisphère sud, la surface à couvrir est alors de  $2 \times 3000 \text{ km}^2$ . Pour l'instant seul le site austral est en cours d'installation. Pour avoir une acceptance de 1, soit une probabilité certaine que trois cuves soient touchées par une gerbe de plus de  $10^{19}$  eV, et ce quelque soit l'angle d'incidence ( $\theta_{\text{max}} \simeq 70^\circ$ ), il a été calculé que les cuves doivent être espacées de 1500 m (avec un réseau de maille triangulaire à une altitude<sup>2</sup> de 1400 m), on a ainsi 1600 cuves à disposer sur une surface comparable à celle de l'Île de France. La dimension du site rend le câblage des cuves impossible, pour des raisons évidentes de coût, elles doivent alors être autonomes; elles sont donc dotées de panneaux solaires, d'un système de communication radio et d'une synchronisation en temps par une puce GPS.

\*bernal@ipno.in2p3.fr

†queva@ipno.in2p3.fr

‡Etudiants au DEA Champs, Particules, Matières.

<sup>1</sup>qui vient de la photoproduction de pions par l'interaction des protons avec les photons du fond diffus cosmologique.

<sup>2</sup>celle de la "Pampa Amarilla" en Argentine où l'observatoire est implanté

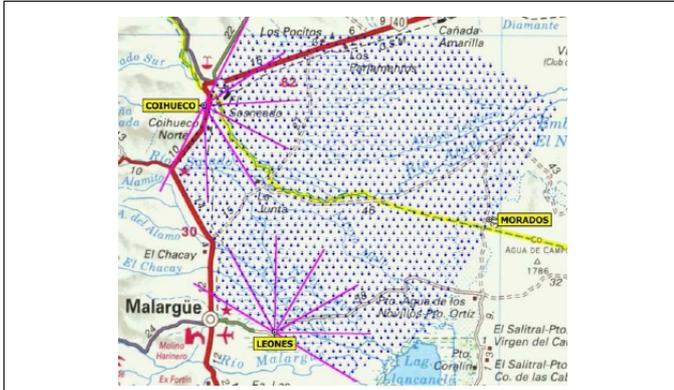


FIG. 1 – Carte de l’observatoire Pierre AUGER implanté en Argentine à côté de Malargüe. On représente le réseau au sol et deux détecteurs de fluorescence, un à Coihueco et l’autre à Leonés.

## Les cuves Čerenkov

Pour les détecteurs au sol deux solutions s’offraient à la collaboration : 1. l’usage de scintillateurs ou 2. exploiter l’effet ČERENKOV ; cette dernière a été préférée car quelque soit l’angle d’incidence de la gerbe celle-ci est "vue" par une cuve ČERENKOV, ce qui n’est pas le cas pour les scintillateurs ; de plus, les scintillateurs ne sont pas sensibles aux photons (ceux-ci n’ayant pas le temps de se convertir en paire  $e^+e^-$ ) et ils distinguent mal les muons des électrons (ce qui n’est pas le cas des cuves). Ces cuves ont une hauteur de 1,5 m, un diamètre de 3,6 m, elles contiennent une poche d’eau pure désionisée de 1,2 m de hauteur qui, l’observatoire étant sensé être opérationnel près de vingt ans, est d’une étanchéité éprouvée (afin d’éviter l’intrusion de bactéries, ...). Les parois de la poche d’eau sont en Tyvek, qui réfléchit, diffuse et rend uniforme la lumière ČERENKOV recueillie par trois photomultiplicateurs (PM) de grande surface (9") disposés en haut de la cuve et orientés vers le bas. Hors événements de haute énergie, qu’on sait distinguer, les cuves sont en permanence bombardées par des muons du tout venant ; ceux-ci présentent un spectre connu (Eidelman & al 2004) qui permet l’auto-calibration de la cuve, l’énergie est ainsi codée en *Vertical Equivalent Muons (VEM)*.

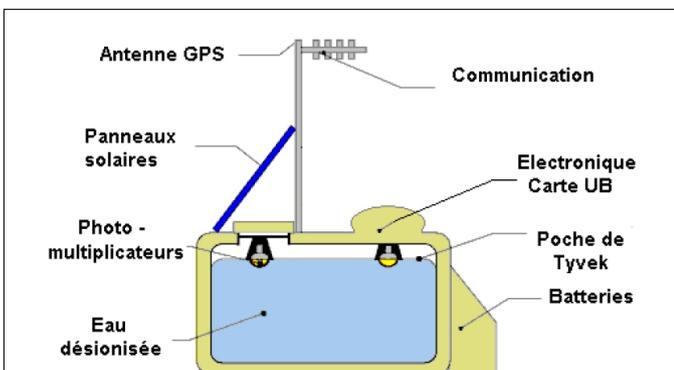


FIG. 2 – Schéma d’une cuve ČERENKOV avec ses principaux éléments.

## Les triggers physiques & l’acquisition

Le signal des PM est décuplé sur deux canaux : un issu de la dernière dynode et l’autre de l’anode, avec un facteur d’amplification  $\times 32$  entre les deux. Ce signal est discrétisé en bins de 25 ns, codé et enregistré par un FADC (*Fast ADC*) le tout est géré par l’*Unified Board UB* qui supervise toute la cuve. Cette carte discrimine les événements potentiellement intéressants du bruit de fond :

- T1 type 1, ou *T1 threshold*, qui déclenche dès que le signal des trois PM dépasse le seuil de 1,75 VEM,
- T1 type 2, ou *trigger TOT*, est déclenché quand au moins 13 bins de 120 bins d’échantillon (soit 3  $\mu$ s) dépassent 0,2 VEM.
- T2 qui déclenche dès que des T1 TOT apparaissent mais ne fait passer un T1 *threshold* uniquement quand il dépasse 3,2 VEM.

Les signaux du type *threshold* correspondraient au cœur de la gerbe ceux de type *TOT* plutôt aux bords de celle-ci. Au niveau des traces ADC on peut distinguer les différentes particules qui sont passées dans la cuve par l’amplitude et le temps de montée du signal, cf. Fig-3

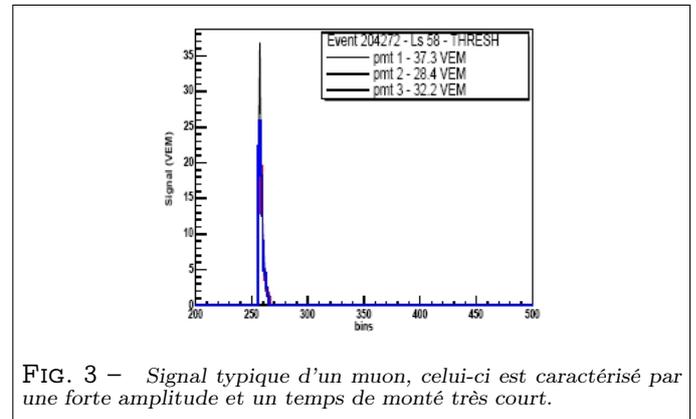


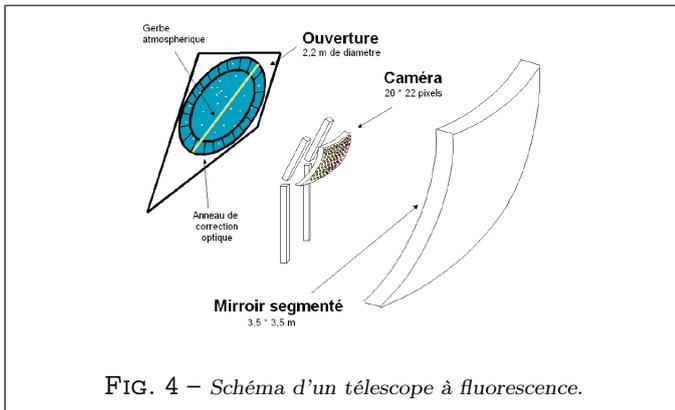
FIG. 3 – Signal typique d’un muon, celui-ci est caractérisé par une forte amplitude et un temps de montée très court.

L’UB stocke tous les événements T1, et transmet tous les temps des T2 au *Système Central d’Acquisition des Données CDAS*. Si celui-ci voit des corrélations spatio-temporelles (T3) entre les différentes cuves, il commande le rapatriement des données. La bande passante pour les télécommunications étant limitée à 1200 bits par seconde, le temps pour transmettre toutes les données d’un événement au CDAS est de quelques minutes. La sélection des événements due au T3 est telle qu’il n’y a pas d’engorgement du réseau. L’analyse des données sera effectuée ultérieurement, et conjointement avec les données des télescopes, par un système de reconstruction d’événements.

## B. Les détecteurs de fluorescence

Ces détecteurs sont sensibles à la lumière de fluorescence émise lors du passage des particules chargées de la gerbe dans l’atmosphère. En effet, il y a interaction de ces particules avec le diazote qui, en se désexcitant ( $\tau$  compris entre 10 et 50 ns), émet de la lumière de fluorescence dans l’ultra-violet (environ 80% est émise entre 300 et 450 nm). La faiblesse de ce processus est compensée par

la grande quantité de lumière produite. Elle est émise de façon isotrope ; le nombre de photons est proportionnel au nombre de particules chargées.



Il y a quatre détecteurs à fluorescence (yeux de mouche) encadrant le réseau de cuves. Chacun comporte six télescopes qui voient un champ de  $30^\circ \times 30^\circ$ , soit  $180^\circ \times 30^\circ$  au total. Ces télescopes sont composés d'une matrice de  $20 \times 22$  PM située dans le plan focal d'un miroir sphérique ( $3.5 \text{ m} \times 3.5 \text{ m}$  avec un rayon de courbure de  $3.4 \text{ m}$ ) qui collecte la lumière, ainsi que d'un filtre UV permettant de réduire le bruit de fond lumineux. Un événement de  $10^{19}$  eV est enregistré par au moins un détecteur et dans 60% des cas par deux ou plus (on parle alors de détection stereo). Cependant, cette technique ne fonctionne que lors des nuits sans lune, soit 10% du temps.

La quantité de lumière émise étant proportionnelle à l'énergie déposée par les particules chargées de la gerbe (cette énergie est elle même proportionnelle au nombre de particules), la mesure du nombre de photons de fluorescence en fonction de la direction et du temps nous permet de déterminer le profil de la gerbe en termes du nombre de particules chargées. Pour cela, il faut tenir compte de la propagation de la lumière à travers l'atmosphère, ainsi que du bruit ČERENKOV produit par la gerbe. Cette lumière peut arriver directement au détecteur ou bien après avoir été diffusée par les aérosols de l'air. Le premier cas peut être estimé par la distribution des électrons dans la gerbe, le second va dépendre du profil de densité des aérosols dans l'air (qui peut être obtenu à l'aide du LIDAR).

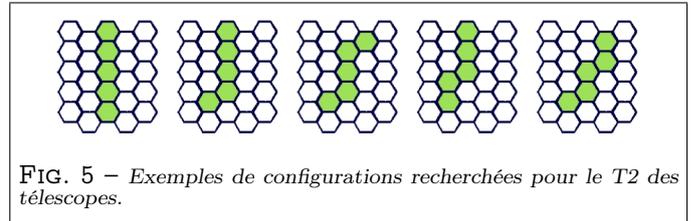
Une gerbe va apparaître sur le détecteur comme une trace qui permettra de reconstruire le plan déterminé par l'axe de la gerbe et le détecteur lui même. Ce sont les temps d'arrivée des photons dans les différents PM qui fixeront l'axe de la gerbe, sachant qu'elle se déplace à une vitesse proche de celle de la lumière.

Les signaux des PM, échantillonnés à la fréquence de 10 MHz, ont trois niveaux de trigger, les deux premiers électroniques, le dernier étant logiciel :

- Le premier (T1) est déclenché lorsque le signal d'un PM dépasse une valeur seuil ajustable pour que le taux

d'événements soit de l'ordre de 100 Hz.

- Le deuxième (T2) est déclenché lorsqu'on a une configuration connexe de cinq pixels (PM) triggés par T1 en coïncidence ( $\tau$  compris entre 1 et  $32 \mu\text{s}$ ).
- Le troisième (T3) recherche des coïncidences en temps entre les T2. Cette fois, il doit y avoir une configuration connexe d'au moins six pixels vus en coïncidence ( $\tau$  compris entre 1 et  $32 \mu\text{s}$ ) par au moins deux miroirs. Le taux de T3 est de l'ordre de 0.02 Hz.



Afin de favoriser la détection hybride, un autre trigger est mis en place. Pour chaque T3 de fluorescence, un message est envoyé au CDAS afin de demander la réponse des détecteurs de surface qui devraient être concernés. Les données de fluorescence permettent de faire un *fit* du temps d'arrivée au sol et du point d'impact, ce qui est comparé au signal des cuves. Les événements hybrides donnent une plus grande précision lors de la reconstruction des gerbes et aussi permettent de calibrer les détecteurs de fluorescence avec ceux au sol.

La calibration des détecteurs doit tenir compte des systèmes optiques et électroniques, mais aussi des propriétés atmosphériques qui vont jouer un rôle important dans le développement de la gerbe. La calibration atmosphérique est principalement faite par le CLF (*Central Laser Facility*), placé au centre du réseau de surface, regroupant différentes techniques :

- un LIDAR (*Light Detection And Ranging*) pour mesurer la profondeur optique en fonction de l'altitude,
- l'observation des tirs laser par les détecteur permet de vérifier le synchronisme entre les différents détecteurs de fluorescence et aussi entre eux et les cuves,
- toutes les cinq minutes on mesure la température, la pression, le taux d'humidité, la vitesse et la direction de l'air.

La calibration est réalisée en éclairant uniformément les télescopes par une source connue (flash xenon  $\lambda$  compris entre 300 et 400 nm), le signal dans chaque pixel permet alors de remonter aux caractéristiques des photons reçus.

## C. Les communications

La transmission des données se fait ainsi : à chacun des quatre points où sont implantés les télescopes se trouve une antenne, elle-même découpée en sous-secteurs qui communiquent avec les cuves *via* un lien radio à 902 – 928 MHz (choisi pour sa faible consommation d'énergie). Ces antennes écoutent les cuves les unes après les autres, celles-ci parlent durant un temps fixé (ce qui limite la taille des

données qu'elles peuvent envoyer durant une session). Une puce GPS résidant sur la carte UB et une horloge à 100 Hz permettent la synchronisation du tout à 10 ns près. Sachant qu'elle a un temps de parole limité, la cuve doit construire un message compressé. En premier lieu elle communique les T2 et pour le temps qui lui reste elle y joint, par exemple, des données de monitoring (état de la batterie, ...). Ces quatre antennes communiquent au CDAS, par un lien micro-onde à 34 Mbps (Clark & Nitz 2001), les données qu'elles ont collectées. Celles-ci arrivent au *Post-Master* qui va déterminer par un système de *header* à quoi elles se rapportent. Tous les codes T2 sont envoyés au *Ct* (*Central trigger*) et les autres données, partielles, sont gardées en mémoire et remises bout-à-bout. Une fois complétées elles sont remises au programme adéquat, par exemple, *CMR* (*Central Monitoring Recorder*) pour le monitoring. *Ct* après avoir récupéré les données de toutes les stations ordonne les T2 dans le temps, regarde si trois cuves ont déclenchées dans les deux premiers hexagones centrés sur la cuve ayant le T2 le plus intense (la différence des temps de déclenchement doit être inférieure à 11 $\mu$ s pour la première couronne, 16 $\mu$ s pour la seconde). Si un ensemble de données satisfait à ce critère *Ct* y incorpore les T2 des quatre premiers hexagones s'ils sont respectivement à moins de 11 $\mu$ s, 16 $\mu$ s, 21 $\mu$ s et 26 $\mu$ s. Quand on observe un tel événement le T3 est déclenché (Lachaud 2002), *Ct* dresse alors la liste de stations concernées et leur envoie une requête T3 qui prend tous les T2 et T1 dans une fenêtre de 30 $\mu$ s autour du temps du T2 choisi. *Ct* transmet ces données à l'*Event Builder* (*EB*) qui vérifie la qualité des données, quitte à les redemander si nécessaire, et les converti en fichier ROOT. On dispose encore d'un quatrième niveau de trigger (Maurin 2005) qui vérifie la compatibilité en temps des T3, on distingue deux types de T4 :

- 3 TOT, trois cuves dans le premier hexagone ont déclenchées des T1 de type TOT, caractéristique des gerbes d'énergie inférieur à 10<sup>19</sup> eV,
- 4C1, on a *au moins* trois cuves, dans le premier hexagone centré sur la cuve principale, ayant déclenchées des T2, TOT ou seuil, compatibles en temps.

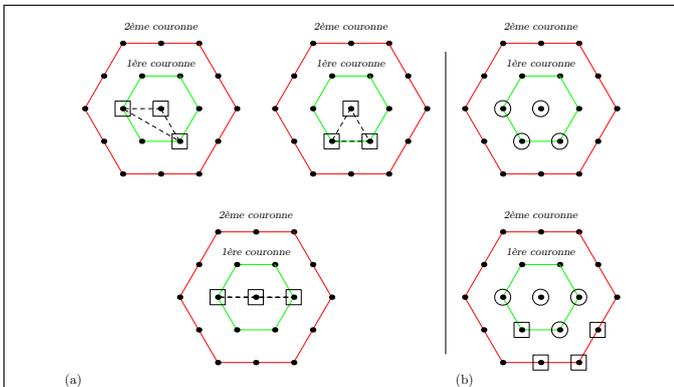


FIG. 6 – Schéma des T4 pour le réseau au sol. La configuration (a) montre les 3 TOT possibles, la seconde configuration (b) donne un exemple de 4C1. Les cercles représentent des triggers de type seuil, les boîtes des triggers de type TOT.

Le CDAS a un lien satellite qui renvoie les données à Buenos Aires puis à Fermilab pour terminer au centre de calcul de l'IN2P3 à Lyon. Dans ces fichiers on a les événements, le monitoring, la calibration et les fichiers de T2 dans lesquels on liste les stations qui apparaissent ou disparaissent (ce qui permet de faire une carte d'acceptance du réseau au sol).

## D. Reconstruction des données du réseau au sol

Une fois que le CDAS a détecté, rapatrié et converti les données d'un événement en fichier ROOT on peut analyser ce dernier pour reconstruire l'événement. En prenant le barycentre des trois cuves les plus touchées on obtient une première approximation du cœur de gerbe ( $x_c$ ,  $y_c$ ) et en estimant que le front d'onde, de la gerbe, est plan on obtient les angles ( $\theta_{\text{plan}}$ ,  $\phi_{\text{plan}}$ ) que fait l'axe de la gerbe avec le zénith. Du signal, total, des cuves on obtient une évaluation de la densité de particules en fonction de la distance au cœur de gerbe par la formule

$$S(d) = S_{1000} \left( \frac{d}{1000} \right)^{\beta + \gamma \ln\left(\frac{d}{1000}\right)} \quad (1)$$

où  $d$  est la distance au cœur de gerbe, estimé, en mètres,  $\beta$  et  $\gamma$  sont des paramètres libres. La grandeur d'intérêt que cet ajustement nous permet d'atteindre est le  $S_{1000}$ , soit le signal à 1000 m du cœur de gerbe. De ces premières valeurs on peut estimer  $T_0$  le temps auquel le centre de la gerbe touche le réseau au sol. De toutes ces données : ( $x_c$ ,  $y_c$ ,  $\theta_{\text{plan}}$ ,  $\phi_{\text{plan}}$ ,  $T_0$ ,  $S_{1000}$ ) on peut reconstruire une meilleure approximation dans laquelle le front d'onde est courbe, ce qui nous donne ( $x_c^{(1)}$ ,  $y_c^{(1)}$ ,  $\theta_{\text{courbe}}^{(1)}$ ,  $\phi_{\text{courbe}}^{(1)}$ ,  $T_0^{(1)}$ ,  $S_{1000}^{(1)}$ ), par itération du processus de reconstruction le système converge vers une valeur finale (avec ses barres d'erreurs) : ( $x_c^{(\infty)}$ ,  $y_c^{(\infty)}$ ,  $\theta_{\text{courbe}}^{(\infty)}$ ,  $\phi_{\text{courbe}}^{(\infty)}$ ,  $T_0^{(\infty)}$ ,  $S_{1000}^{(\infty)}$ ). De ces quantités on peut reconstruire la gerbe et déduire son énergie.

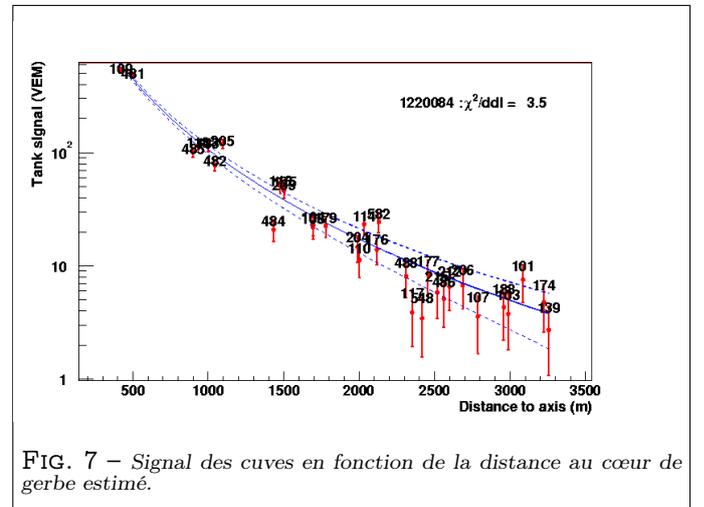


FIG. 7 – Signal des cuves en fonction de la distance au cœur de gerbe estimé.

La correspondance entre les paramètres de la reconstruction et l'énergie du primaire est faite de manière empirique

par un ensemble de simulations. On modélise les gerbes grâce aux simulation CORSIKA et AIRES, les fichiers de sortis de ceux-ci sont passés aux programme de simulation des détecteurs au sol : SDSIM et GEANT4. CORSIKA et AIRES (Sciutto 1999) sont des simulations Monte-Carlo qui suivent les particules lors du développement de la gerbe, ils utilisent des modèles d'interaction (électrodynamique, décroissance de particules instables et processus hadroniques). Les particules sont suivies jusqu'à une fraction ( $\propto 10^{-7}$ ) de l'énergie initiale. Une fois cette énergie atteinte le nombre de particules ne croît plus, mais pour compenser elles sont affectées d'un poids, statistique, supérieur à l'unité. Cet algorithme de *thinning* permet de réduire la taille des fichiers et le temps de calcul. SDSIM et GEANT4 prennent pour paramètres les données des simulateurs de gerbes, ils ré-échantillonnent les particules sur la surface du détecteur ("*unthin*"nent les données) puis suivent les différentes particules dans les cuves. Par conséquent ils doivent simuler l'ensemble des interactions que sont susceptibles de subir les particules. Pour les électrons il s'agit de l'émission ČERENKOV et du rayonnement Bremsstrahlung (dont on tient compte dès qu'ils ont plus de 80 MeV). La composante muonique de la gerbe, d'une énergie d'approximativement 1 GeV, traverse la cuve en ligne droite. Quant aux photons, ČERENKOV ou non, on doit tenir compte de l'effet Compton, de la conversion en paire  $e^+e^-$ , de même on tient compte de leur diffusion (80% des cas) sur les parois en Tyvek ou de leur réflexion (20%). De plus les photons peuvent être absorbés par l'eau de la cuve ou par la paroi. La simulation suit ces derniers jusqu'à ce qu'ils soient collectés par les photocathodes des PM. A ce stade, pour simuler l'électronique, on opère un court-filtrage en temps et on intègre les charges en échantillonnant à 25 ns. Ceci fait au niveau d'une station au sol il reste l'ensemble du réseau à reconstituer, ensuite tout est géré par le programme de reconstruction de données. C'est ainsi qu'on peut lier le  $S_{1000}$ ,  $(x_c, y_c)$ ,  $(\theta_{courbe}, \phi_{courbe})$  à l'énergie du primaire.

### III. CONCLUSION

En Novembre 2005 le site sud de l'observatoire Pierre AUGER sera inauguré. A ce jour plus de 600 cuves sur 1600 sont installées, et deux télescopes sont opérationnels ce qui en fait le plus grand observatoire du monde de rayons cosmiques de haute énergie. La collaboration prend déjà des données avec le réseau en place, celles-ci seront<sup>3</sup> rendues publiques lors de l'ICRC 2005 et elles permettront de se rattacher aux précédentes observations. En guise de conclusion nous aimerions rappeler, et appuyer, le fait que pour une expérience AUGER la difficulté réside non pas dans la conception des détecteurs (qui est basée sur des techniques bien maîtrisées), mais dans son gigantisme qui induit des contraintes nouvelles quant à la gestion de l'énergie, des communications et à la fiabilité extrême dont les équipements doivent faire preuve.

<sup>3</sup>Du moins pour les spectres à basse énergie.

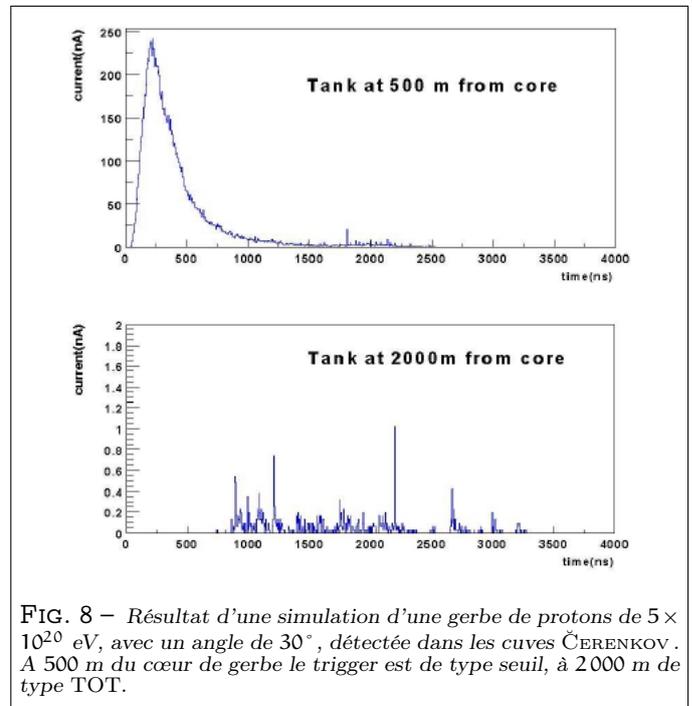


FIG. 8 – Résultat d'une simulation d'une gerbe de protons de  $5 \times 10^{20}$  eV, avec un angle de  $30^\circ$ , détectée dans les cuves ČERENKOV. A 500 m du cœur de gerbe le trigger est de type seuil, à 2000 m de type TOT.

### Remerciements

Nous tenons à exprimer toute notre gratitude envers Jean-Michel BRUNET pour nous avoir proposé ce sujet, nous avoir encadré et avoir relu les diverses versions de ce rapport de stage. De même nous remercions Sylvie DAGORET-CAMPAGNE, Cyril LACHAUD, Gilles MAURIN, et Benoît REVENU qui ont su nous éclairer sur les différents points d'AUGER auxquels ils ont contribué.

### RÉFÉRENCES

- Bertou, X., Boratav, M. & Letessier-Selvon, A. (2000), 'Physics of extremely high energy cosmic rays', *Int. J. Mod. Phys. A* 15 pp. 2181–2224. astro-ph/0001516.
- Clark, P. & Nitz, D. (2001), Communications in the auger observatory, in 'ICRC 2001', pp. 765–768.
- Eidelman, S. & al (2004), 'Review of Particle Physics', *Physics Letters B* 592, 1+.
- Lachaud, C. (2002), Pierre auger observatory, overview of the acquisition systems, Technical report.
- Maurin, G. (2005), Etude de la composition des rayons cosmiques de très haute énergie à l'aide des données de l'observatoire Pierre Auger, PhD thesis, Université Paris 7-Denis Diderot.
- Nagano, M. & Watson, A. A. (2000), 'Observations and implications of the ultrahigh-energy cosmic rays', *Reviews of Modern Physics* 72(3), 689–732.
- Sciutto, S. (1999), Air shower simulations with the aires system, in 'ICRC 1999'. astro-ph/9905185.
- The Auger Collaboration (1997), Pierre auger project design report, Technical report. <http://www.auger.org/admin/DesignReport/>.