Estimation de rayon de courbure des gerbes atmosphériques par la méthode de radiodétection avec CODALEMA

A. Rebai[1] and the CODALEMA collaboration[2]
[1] **SUBATECH, IN2P3-CNRS, Université de Nantes, Ecole des Mines de Nantes ; 4 rue Alfred Kastler, BP20722, 44307 Nantes, France**
E-mail : ahmed.rebai@subatech.in2p3.fr
[2] **LESIA, Observatoire de Paris-Meudon - Station de Radioastronomie de Nançay - LAL, IN2P3-CNRS/Université de Paris Sud Orsay - LPSC, IN2P3-CNRS/UJF/INPG Grenoble - ESEO, Angers - LAOB, INSU-CNRS Besançon - LPCE, SDU-CNRS Université d'Orléans, France ; http ://codalema.in2p3.fr**

Résumé

La détection des transitoires radio associés aux grandes gerbes atmosphériques constitue une méthode nouvelle de mesure des rayons cosmiques d'ultra haute énergie (UHECR). Aprés une bréve description de l'expérience de radiodétection CODALEMA, une méthode de calcul des rayons de courbure des fronts d'onde radio est présentée. Les performances de cette méthode d'estimation appliquée à des données simulées et à des données collectées par CODALEMA sont discutées.
(The detection of radio transients associated with air showers is a new method for measuring cosmic rays of very high energies (UHECR). After a brief description of the experience CODALEMA, a method for calculating the radii of curvature of the fronts of radio waves is presented. The performances of this method applied to simulated data and on data collected by the CODALEMA setup are discussed.)
Mots clés : gerbes atmosphériques, antennes, radiodétection, rayons de courbures.

Introduction

Malgré les efforts expérimentaux intenses au cours des 20 derniéres années, l'origine et la nature des rayons cosmiques d'ultra haute énergie (>PeV) restent encore mal comprises. Les incertitudes sont liées pour partie au flux extrêmement faible de rayonnement (1 particule/siécle/km^2 à 10^{20} eV) mais aussi aux erreurs expérimentales systématiques inhérentes aux différentes techniques de détection utilisées [**?**]. L'une des améliorations possibles des mesures pourrait être donnée par l'exploitation des signaux radioélectriques produits par le mouvement des particules secondaires dans la gerbe atmosphériques. Cette méthode de détection, qui se trouve à mi chemin entre les techniques utilisées en physique des particules et en radioastronomie, a été proposée par Askaryan en 1962 [**?**] et étudiée jusqu'à la fin des années 60, puis abondonnée en raison des difficultés d'interprétations des résultats expérimentaux [**?**]. La nécessité de détecteurs plus performants [**?**], la sensibilité au développement longitudinal de la gerbe, le cycle utile proche de 100%, le coût faible des capteurs, ont rendu cette alternative de détection attractive avec les technologies actuellement disponibles. Cette activité a été relancée au début des années 2000 notamment par la collaboration CODALEMA [**?**] en France et LOPES [**?**] en Allemagne.
Depuis 2002, l'expérience de radiodétection, CODALEMA [**?**], hébergée sur le site de l'observatoire de Nançay, vise à étudier l'ensemble des potentialités de cette détection dans la gamme d'énergie de 10^{16} eV (seuil de détection) à 10^{18} eV (limite supérieure imposée par la surface instrumentée). Elle est constituée d'un réseau de 17 détecteurs de particules, du réseau décamétrique DAM, ainsi que d'un réseau de 24 antennes dipoles actifs réparties sur une surface d'environ 1/4 km^2 (figure **??**).

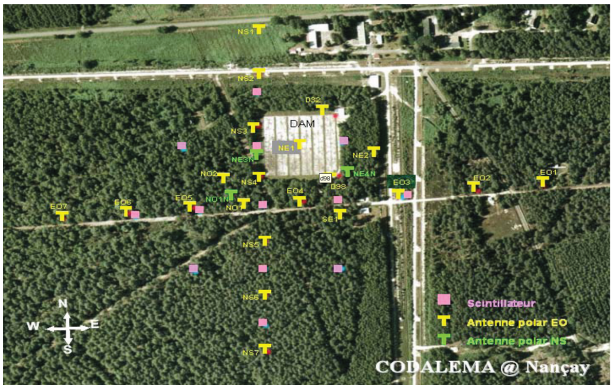


Figure 1 – Set up de l'expérience CODALEMA montrant la disposition du réseau des détecteurs de particule (rouge) et du réseau d'antennes (jaune) utilisés pour cette étude.

Le déclenchement de l'ensemble du système d'acquisition des données est défini par le passage en coïncidence de particules au travers de chacun des 5 détecteurs de particules centraux. Ce trigger particule définit un seuil de détection en énergie des gerbes d'environ 5.10^{15} eV. La forme d'onde radio de chaque antenne est enregistrée dans une bande de fréquence 0-250 MHz durant une fenêtre temporel de 2.5 μs avec une fréquence d'échantillonnage de 1GS/s. Les événements radio, candidats de gerbes atmosphériques (contrepartie de la gerbe vue par les détecteurs de particules), sont identifiés durant l'analyse offline [**?**] [**?**]. À l'issue de cette étape d'analyse, un jeu de données comportant les paramètres de la gerbe reconstruite à l'aide des informations fournies par les détecteurs de particules (temps d'arrivée, direction d'arrivée, position du pied de gerbe, énergie) ainsi qu'un ensemble d'observables radio pour chaque antennes (temps d'arrivée, amplitude du signal radio) ainsi que les observables de la gerbe reconstruite par l'exploitation des données radio seules (temps d'arrivée, direction d'arrivée, position du pied de gerbe, énergie) sont obtenus événement par événement. Ces observables sont utilisées pour étudier la courbure du front de l'onde radio qui pourrait constituer l'une des variables discriminantes de la nature du primaire (estimation du X_{max}).

1 Principe de la reconstruction du centre d'émission radio

Ce travail repose sur l'hypothèse que le centre d'émission est situé sur la droite définie par la position du pied de gerbe et la direction d'arrivée de l'onde (assimilée à un plan). Ces quantités sont fournies par l'analyse offline [**?**]. La direction d'arrivé de l'onde (d'angles zénithal θ et azimutal ϕ) est déterminée par l'analyse des temps d'arrivées t_i du transitoire radio sur chaque antenne de position (x_i, y_i, $z_i = 0$). Le vecteur du plan d'onde résultant a pour composantes : $u = cos(\phi).sin(\theta)$, $v = sin(\phi).sin(\theta)$. La position du pied de gerbe (x_c, y_c, $z_c = 0$) est déduite de l'analyse du profil latétral du champ électrique.
L'équation du front d'onde sphérique émis à partir du centre d'émission de coordonnées (x_0, y_0, z_0) s'écrit :

$$(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2 = R^2$$

Les coordonnées du centre d'émission (x_0, y_0, z_0) qui se trouve sur la droite définie par (θ, ϕ, x_c, y_c) peuvent s'exprimer par les relations suivantes :

$$x_0 = R.u + x_c$$
$$y_0 = R.v + y_c$$
$$z_0 = R.cos(\theta)$$

Avec $R = c.(t - t_0)$, la distance parcourue au temps t par l'onde qui se propage à la vitesse la lumière et produite à l'instant initial d'émission t_0. Les coordonnées du centre d'émission sont obtenues en utilisant la méthode des moindres carrés construites à partir de la fonction à 4 inconnues :

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^{multiplicit} ((x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + (z_i - z_0)^2 - c^2.(t_i - t_0)^2)^2$$

En écrivant les coordonnées du centre d'émission recherché en fonction des deux seules inconnues R et t_0, l'équation peut se refomuler sous la forme :

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^{multiplicit} ((x_i - R.u - x_c)^2 + (y_i - R.v - y_c)^2$$
$$+(z_i - R.cos(\theta))^2 - c^2.(t_i - t_0)^2)^2$$

Du fait du terme non-linéaire de χ^2, il n'est pas possible de déterminer le minimum par une méthode analytique et une méthode de résolution numérique doit être utilisée (*Matlab Optimization Toolbox*).

2 Résultat de reconstruction du centre d'émission radio

La méthode de résolution numérique a été testée en utilisant un jeu de valeurs d'essais. Pour ce faire, diffèrentes positions du centre d'émission peuvent être

introduites et les temps d'arrivées sur les antennes sont obtenus en calculant les temps de propagation de l'onde sphérique et en tenant compte de la géométrie du réseau. Les erreurs expérimentales sur les temps détectés sont ajoutées par tirages Monte Carlo de distributions gaussiennes d'écart type choisis (entre 0 et 15 ns). La figure **??** montre un résultat de la reconstruction sphérique sur des simulations pour un rayon de courbure égal à 15 km et des erreurs temporelles égales à $0ns$, $1ns$, $2ns$ ou $10ns$. Afin de prendre en compte de la géométrie particulière en croix du réseau, la position en angle zénithale du point d'émission a été fixée mais l'angle azimutal est variable. Les résultats montrent que les erreurs en temps sur les antennes constituent le facteur le plus limitant pour l'estimation du rayon de courbure.

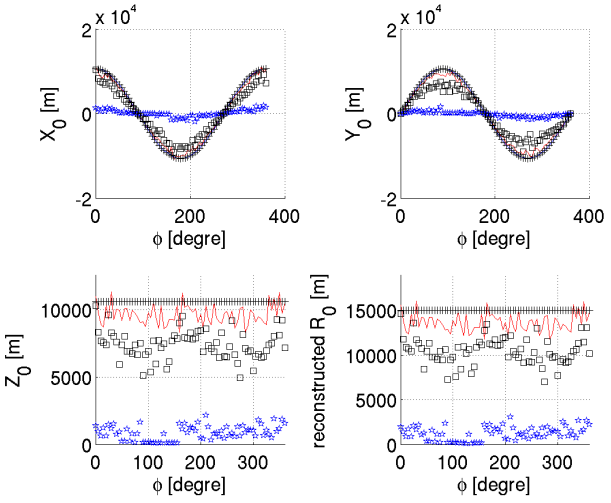


Figure 2 – Reconstruction du centre d'émission fixé à R=15 km pour $\theta = 45$ et ϕ variant entre 0°et 360°pour des temps exacts d'arrivées sur les antennes (en croix noires) et pour des erreurs temporelles de 1 ns (trait continu rouge) et 2 ns (carrés noirs) et 10 ns (étoiles bleues).

Dans une deuxiéme étape, les résultats de la minimisation ont été analysés et comparés à ceux obtenus avec des données réelles. Pour exemple, trois fonctions du χ^2 sont présentées figure **??**, l'une pour des données simulées et les deux autres pour des données réelles. Il ressort que concernant les données expérimentales, le minimum global peut être difficile à localiser précisément et qu'en conséquence l'estimation du rayon de courbure sera moins robuste.

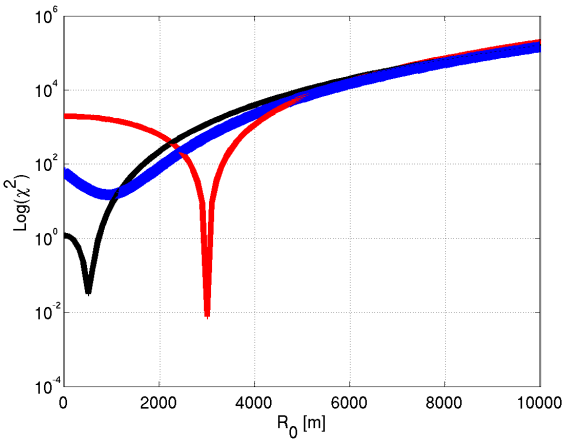


Figure 3 – Fonctions de χ^2 obtenues pour un événement réel (courbe noire) et un événement similaire simulé avec un centre d'émission à 3 km sur la même direction d'arrivée (courbe rouge). La courbe bleue présente un autre événement réel suggérant que la localisation du minimum peut être plus difficile.

Finalement, un sous ensemble des événements gerbe de l'expérience CODALEMA étiquetés événements centraux [**?**] a été utilisé pour estimer les rayons de courbure. Pour ces événements. l'ensemble des observables de la gerbe (direction d'arrivée, pied de gerbe, énergie) est parfaitement caractérisé à la fois pour le réseau de détecteur de particules et pour le réseau radio. La figure **??** montre la distribution des rayons de courbure obtenue pour ces évnéments.

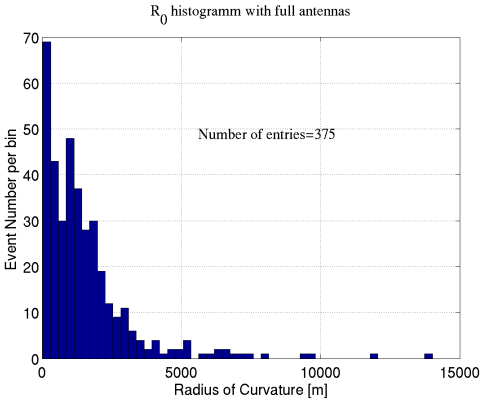


Figure 4 – Histogramme des rayons de courbures

Le résultat est inattendu et diffère de celui obtenu en utilisant une méthode d'estimation diffèrente [**?**]. De plus car compte tenu de la valeur la plus vraisemblable de la distribution, il ne semble pas que ce soit le maximum de la gerbe qui soit observé. Ce résultat peut être la conséquence d'une mauvaise estimation

du temps sur les antennes ou bien d'une évaluation erronée de l'erreur estimée sur la mesure temporelle. A titre d'essai, la variation du rayon de courbure moyen a été tracée en fonction de l'angle zénithal (figure **??**). Il semble que la variation avec l'angle suive mieux l'évolution attendue en indiquant une augmentation de R avec l'angle car le maximum de la gerbe s'éloigne de l'observateur.

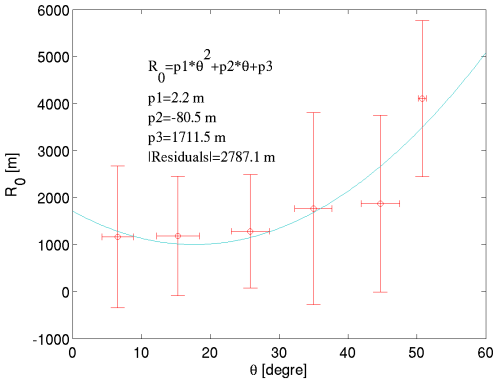


Figure 5 – Corrélation entre le rayon de courbure et l'angle zénithal θ

3 Conclusion

Une méthode de reconstruction du rayon de courbure associé à l'onde radio produit par le développement des gerbes atmosphériques initiées par les UHECR a été présentée. Les simulations indiquent (que pour des rayons inférieurs à 15 km et des erreurs temporelles inférieures à 5 ns) la méthode fournit des estimations correctes du rayon de courbure, mais que les résultats dérivés de l'exploitation des données expérimentales restent mal compris.

Ce travail a bénéficié d'un financement de la région Pays de la Loire.