



HAL
open science

Le projet CODALEMA

Richard Dallier, Pascal Lautridou

► **To cite this version:**

Richard Dallier, Pascal Lautridou. Le projet CODALEMA. P. Zarka. Radioastronomie Basses Fréquences : Instrumentation, Thématiques scientifiques, Projets, 2007. hal-01114714

HAL Id: hal-01114714

<https://hal.science/hal-01114714>

Submitted on 10 Feb 2015

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial 4.0 International License

Le projet CODALEMA

Richard DALLIER, Pascal LAUTRIDOU

et le travail de la collaboration CODALEMA

(voir aussi la thèse d'Arnaud BELLÉTOILE [1])

SUBATECH - Nantes

Abstract. This chapter presents the methodology of the radio detection of cosmic ray extensive air showers developed for the CODALEMA experiment. We illustrate the performances and results obtained in the first four years of operation of CODALEMA.

Table des matières

| | |
|---|-----------|
| 1. Introduction | 2 |
| 2. Présentation de l'expérience | 3 |
| 3. Les performances instrumentales | 4 |
| 3.1 Qualité du ciel | 5 |
| 3.2 Reconstruction des directions d'arrivée des fronts d'onde | 5 |
| 3.3 Estimation de la résolution angulaire | 7 |
| 3.4 Etalonnage des réponses des antennes | 12 |
| 4. Principaux résultats | 17 |
| 4.1 Reconnaissance des signaux : la coïncidence temporelle et angulaire | 17 |
| 4.2 La topologie du champ électrique | 20 |
| L'empreinte radio des événements gerbes | 20 |
| Le profil du champ électrique | 21 |
| 4.3 Corrélation du signal radio avec l'énergie de la gerbe . . | 22 |
| 5. Conclusion | 22 |

1. Introduction

L'objectif de ce cours est de présenter la méthode utilisée et les performances de l'expérience CODALEMA de radio-détection des gerbes atmosphériques de particules induites par les rayons cosmiques de très haute énergie. Le principe de déclenchement, élément premier de la méthodologie adoptée, est déjà décrit dans le cours de P. Lauthridou dans ce même ouvrage ("De la radiodétection des rayons cosmiques à la radioastronomie impulsionnelle"). Nous y expliquons comment ce concept peut être décliné "off line" pour la recherche de transitoires dans les signaux enregistrés sur n'importe quel type de déclenchement. Nous nous concentrerons ici sur les performances techniques atteintes par CODALEMA en termes de reconstruction des directions d'arrivée des fronts d'onde, sur les procédures d'étalonnage des récepteurs et sur les principaux résultats physiques obtenus à l'aide de cette méthode au cours des 4 premières années d'exploitation de l'instrument. Les performances instrumentales peuvent être considérées comme "génériques" à tout système de détection radio impulsionnelle fondé sur l'utilisation d'un réseau d'antennes.

Contrairement aux techniques conventionnelles de mesure des distributions des particules secondaires au sol ou de fluorescence, l'avantage de la radio-détection réside à la fois dans le fait qu'il n'est plus indispensable que la gerbe "tombe" directement sur le détecteur au sol et dans le fait que les ondes radio se propagent loin de leur source d'émission avec une atténuation nettement plus faible que dans le visible. Le capteur devient sensible à un large volume de l'atmosphère (quelques dizaines de km^3) et la détection de gerbes horizontales devient possible (par exemple celles induites par des gerbes rasantes de neutrinos). De plus, comme chaque signal d'antenne est le reflet complet du développement longitudinal de la gerbe, les fluctuations de ces signaux ne dépendent plus du détecteur mais seulement des fluctuations inhérentes au développement de la gerbe (altitude de la première interaction, fluctuation du nombre de secondaires). Une grande efficacité de détection est aussi attendue parce que chaque capteur possède un cycle utile de détection voisin de 100%. En outre, dans ce domaine de longueur d'onde, les antennes sont des capteurs simples et robustes donc extrêmement fiables (le réseau décimétrique de Nançay actuel a été construit il y a plus de 30 ans [2]). Enfin, compte tenu du faible taux de transitoires dans le ciel, chaque antenne pourrait être utilisée en détecteur autonome, simplifiant fondamentalement la complexité et le coût d'un tel dispositif. L'idée de départ a donc été de construire un petit réseau d'une surface inférieure à 1 km^2 , qui sera équipé au final de quelques dizaines d'antennes, et qui permettrait de démontrer sans trop de conditions restrictives que cette méthode

nouvelle pourrait fournir une contribution intéressante en performances (cycle utile de détection, énergie, direction et nature de ces corpuscules) et en coût, complémentaire aux dispositifs existant actuellement (par exemple l'Observatoire Pierre Auger [3] : 3000 km², 1600 détecteurs au sol, 4 télescopes détectant la trace de fluorescence atmosphérique). Les données de CODALEMA permettent déjà d'accéder à la direction d'arrivée de la gerbe, et pour la première fois au profil transversal de champ électrique dans la gerbe en fonction de la distance au coeur, avec un seuil bas de détection en énergie (6×10^{16} eV). L'estimation de l'énergie donnée par la radio, comparée avec celle donnée par les détecteurs de particules, est également en cours. Nous en aborderons ici les premières pistes d'analyse.

2. Présentation de l'expérience

Le démonstrateur CODALEMA doit permettre de détecter le transitoire radio-électrique engendré au passage d'une gerbe de particules. Dans une phase de développement de la méthode, il est indispensable de pouvoir identifier de manière formelle l'origine du signal radio mesuré. Pour cela, l'acquisition d'un réseau d'antennes doit être pilotée par un réseau de détecteurs de particules qui validera la présence d'une gerbe atmosphérique en coïncidence avec la mesure du signal radio transitoire pour identifier de façon non ambiguë l'origine du champ électrique mesuré. L'instrument mentionné dans ce paragraphe est le résultat d'un développement progressif qui s'est étalé sur plusieurs années. Les premières mesures réalisées sur le site de Nançay ont débuté en 2002, elles ont consisté à mettre en place le système d'un point de vue pratique : câblage des antennes, installation du système d'acquisition, repérage des bandes de fréquences utilisables. Par la suite, entre 2003 et 2004, une première version du réseau utilisant 6 antennes spirales log-périodiques du réseau décimétrique a été déployée pour mener des études sur le ciel radio en impulsionnel. Les mesures effectuées durant cette période ont permis de développer les méthodes d'analyses, d'identifier nos limitations techniques puis d'optimiser, à partir de 2004, les différents aspects du réseau d'antennes pour parvenir à une version instrumentale opérationnelle pour les premières mesures des caractéristiques du signal radio associé aux gerbes. Après octobre 2005, l'expérience CODALEMA a encore fait l'objet de nombreuses améliorations, jusqu'à la version actuelle (Fig. 1). Les prises de données et les analyses finales doivent se poursuivre jusqu'à fin 2008.

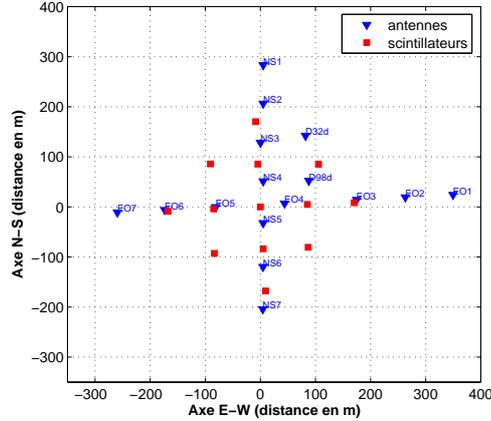


Figure 1.: Le réseau CODALEMA actuel. Le trigger est maintenant constitué par un réseau de 13 scintillateurs (carrés), le réseau d'antennes est composé de 14 antennes (dipôles courts actifs) développées à SUBATECH et disposées en croix selon un axe Nord-Sud et un axe Est-Ouest. Deux autres antennes en polarisation croisée ont été également ajoutées pour des études spécifiques de polarisation de l'onde.

3. Les performances instrumentales

Le dispositif expérimental de CODALEMA, schématisé figure 1, est constitué de 2 réseaux distincts : un réseau de détecteurs de particules disposé autour du DAM et un réseau d'antennes. Compte tenu des distances mises en jeu (quelques centaines de mètres), les 2 réseaux sont intégralement câblés jusqu'au système d'acquisition. Celui-ci est centralisé dans un conteneur de marine situé approximativement au centre du réseau d'antennes. Ce conteneur héberge toute l'informatique du système qui enregistre les données puis les transmet via liaison internet vers notre laboratoire. Ses parois en fer intégralement closes et étanches constituent un bon blindage pour empêcher tout rayonnement du système d'acquisition sur le réseau d'antennes très proche. Le réseau de détecteurs de particules, non détaillé ici, constitue le système de déclenchement (ou trigger) de l'expérience. Son rôle est de déclencher l'acquisition qui enregistre l'intégralité des signaux issus des antennes et des détecteurs de particules. Le réseau d'antennes couvre aujourd'hui une surface supérieure à celle du trigger particules pour optimiser les chances de détection du signal radio associé à la gerbe.

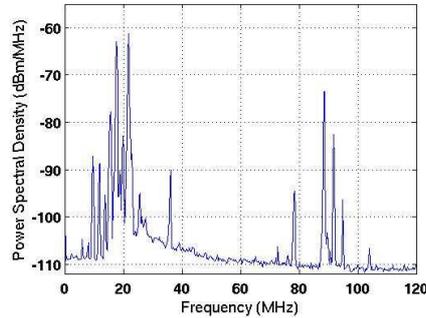


Figure 2.: *DSP des signaux d'une antenne moyennée sur 199 événements. Malgré le filtrage 24-82 MHz, les émetteurs ondes courtes et FM ne sont pas complètement supprimés. Nous utilisons la bande de fréquence 37-70 MHz pour effectuer la détection des transitoires car elle est dépourvue d'émetteurs.*

3.1 Qualité du ciel

Les tensions mesurées en pleine bande (1-100 MHz) à la sortie d'une antenne présentent une variation d'1 V crête à crête, soit près de 3 ordres de grandeurs au dessus de l'amplitude attendue pour un transitoire radio électrique issu d'une gerbe atmosphérique (voir chapitre précédent). Dans la première version de CODALEMA, pour une question de dynamique de numérisation sur 8 bits seulement, nous avons choisi de réduire la bande à l'aide d'un filtre 24-82 MHz placé sur les lignes d'acquisition, qui réduit fortement les contributions des émetteurs les plus puissants, responsables de cette grande excursion (la version actuelle de CODALEMA numérise les signaux sur 12 bits, la dynamique est maintenant suffisante pour l'enregistrement large bande 1-100 MHz). Malgré cela, les signaux observés sont fortement oscillants : ce sont en fait les contributions des émetteurs radio qui restent dominantes malgré le filtre analogique 24-82 MHz. La figure 2 présente une densité spectrale de puissance (DSP) réalisée sur l'une des antennes du réseau. On remarque la présence de nombreux émetteurs ondes courtes et FM plus de 40 dB au dessus du fond malgré l'atténuation du filtre analogique. La bande 37-70 MHz, en revanche, est totalement dépourvue d'émetteurs, c'est donc dans cette portion du spectre que nous effectuons la détection off-line des transitoires (cf. cours P. Lautridou).

3.2 Reconstruction des directions d'arrivée des fronts d'onde

L'étalement maximal du réseau de CODALEMA est de 600 m. Comparé à l'altitude d'émission du champ électrique dans le cas d'une gerbe

atmosphérique dont le X_{max} se situe à plusieurs kilomètres, le réseau peut être considéré comme petit devant la distance parcourue par l'onde depuis le point d'émission. Nous sommes donc dans le cas d'une source ponctuelle située infiniment loin : le front d'onde peut être approché par un plan. Cette hypothèse permet de reconstruire la direction d'arrivée d'un événement à partir de 3 antennes touchées seulement. Chaque antenne touchée par le front d'onde fournit une position (x_j, y_j, z_j) et l'instant de détection du transitoire t_j . Le plan suivant est ajusté à ces données :

$$ct_j = \alpha x_j + \beta y_j + \gamma z_j + ct_0 \quad (1)$$

avec (α, β, γ) les coordonnées du vecteur unitaire normal au plan et t_0 le temps de passage de l'onde à l'origine du repère (x, y, z) . Les antennes du réseau étant situées à une altitude identique ($z_j = 0$), γ ne peut être calculé directement. Les autres paramètres (α, β) et t_0 sont déterminés en minimisant l'erreur quadratique ε^2 définie par :

$$\varepsilon^2 = \frac{1}{n_{Trig}} \sum_j s f_i \times (ct_j - \alpha x_j - \beta y_j - ct_0)^2 \quad (2)$$

avec $f_i = 1$ ou 0 selon qu'un transitoire a été détecté sur cette antenne ou non et n_{Trig} le nombre d'antennes sur lesquelles un transitoire a été détecté. L'erreur résiduelle est donnée par ε lorsque 4 antennes au moins ont été touchées. Pour chaque événement reconstruit, on détermine ensuite le couple d'angle θ , angle zénithal (0° au zénith et 90° à l'horizon) et ϕ , azimut (0° au nord, positif vers l'ouest) en inversant les relations $\alpha = \cos \phi \cdot \sin \theta$ et $\beta = \sin \phi \cdot \sin \theta$. La figure 3 illustre cette reconstruction sur un lot d'événements déclenchés en mode trigger radio. On observe des accumulations d'événements assez basses sur l'horizon pour $\phi = 130^\circ, 170^\circ, 190^\circ$ et 240° . Elles résultent de différentes sources de transitoires parasites sur le site de l'expérience. Deux grandes catégories de sources de RFI sont identifiées. La première est constituée de sources fixes qui provoquent des accumulations dans certaines directions de l'espace. Parmi elles, on peut mentionner le Radiotélescope centimétrique de la station, situé à $\phi = 190^\circ$, dont le miroir plan, orienté par des moteurs électriques, génère des transitoires lorsqu'il est en mouvement. L'hypothèse d'un front plan de l'onde n'est plus valide pour ce type de transitoires étant donnée la proximité de leur source avec le détecteur. Nous avons pu les localiser avec une reconstruction en ondes sphériques. Néanmoins, du fait des réflexions multiples des ondes, ces sources sont généralement reconstruites à un angle zénithal inférieur à 90° . La seconde catégorie de RFI est constituée de sources mobiles dans le ciel, comme celle indiquée sur la figure 3, dont la position azimutale évolue au cours du temps. Pour ces sources

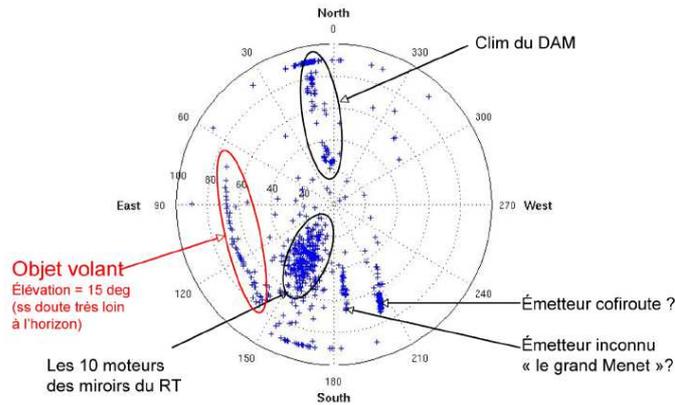


Figure 3.: *Illustration des capacités de reconstruction de trajectoires d'objets volants ou de localisation azimutale de sources parasites par CODALEMA (projection sur le ciel, zénith au centre). Pour les sources fixes, qui sont proches, la notion d'élévation est brouillée par les réflexions multiples que subit le signal parasite dans l'environnement de la station. Seuls les azimuts ont un sens pour ces sources de bruit, qui peuvent ainsi être identifiées.*

distantes, les reconstructions des directions d'arrivées sont efficaces.

La sensibilité de l'instrument à ces RFI en fonctionnement nominal est faible grâce au trigger fourni par le détecteur de particules qui en est complètement décorrélé. Le fait que ces accumulations soient observées indique que ces transitoires sont fréquemment présents. Dans une prochaine étape de développement de la méthode de détection, la gestion de ces RFI sera un enjeu de premier plan. Il faudra être capable d'identifier *en ligne* les fronts d'ondes induits par ces RFI de ceux provenant de gerbes atmosphériques.

3.3 Estimation de la résolution angulaire

Un aspect fondamental dans la connaissance des performances de détection de ce nouvel instrument réside dans l'estimation de la qualité de reconstruction des directions d'arrivée des fronts d'onde. Nous présentons ici une étude réalisée à partir des données acquises au cours d'une éruption solaire qui nous a permis de déterminer expérimentalement la résolution angulaire du réseau d'antennes.

Le réseau décimétrique (DAM) de Nançay effectue une surveillance des émissions radio du Soleil et de Jupiter. La figure 4 présente l'observation

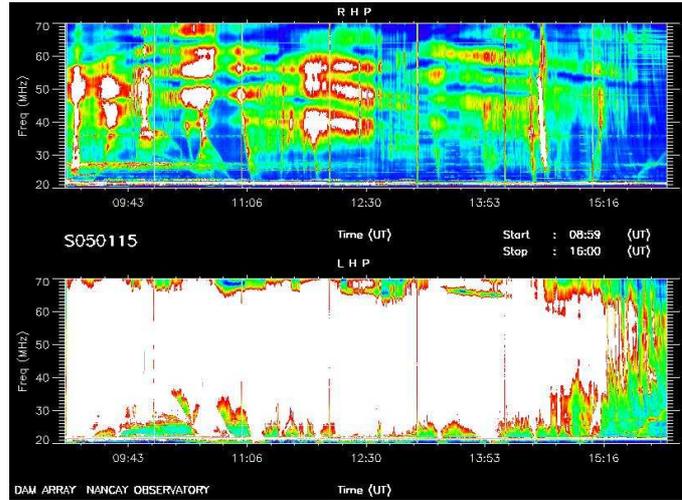


Figure 4.: *Quicklook du Soleil réalisé par l'observatoire de Nançay sur le DAM (accessible sur 2) le 15 Janvier 2005. On remarque une activité radio intense caractéristique d'une éruption solaire importante tout particulièrement sur la partie du réseau de polarisation circulaire gauche (LHP, en bas).*

d'une éruption solaire enregistrée par le DAM le 15 Janvier 2005. L'activité de cette éruption est particulièrement intense et s'étale sur toute la durée de l'observation (de 8h53 à 16h06 UTC). Durant cette période de temps, seulement une partie de l'expérience CODALEMA était en prise de données, elle ne comprenait que 6 antennes sur une base relativement petite, de l'ordre de 250 m. L'instrument, déclenché par le détecteur de particules, a réalisé des enregistrements durant cette éruption solaire à un taux de déclenchement moyen de 0.7 événement par minute. La variation de μ_b , le bruit moyen mesuré dans la bande de fréquence 37 – 70 MHz est présentée figure 5 pour une antenne du réseau sur 2 jours consécutifs. La journée du 15/01/2005 au cours de laquelle a eu lieu l'éruption solaire montre une augmentation de la puissance dans le signal de plus d'un ordre de grandeur par rapport à la journée du 16/01/2005 qui ne présente pas d'activité solaire particulière. L'hypothèse la plus plausible est que cet excès de puissance observé sur les antennes de CODALEMA avait pour origine l'éruption solaire détectée en coïncidence par le DAM. Nous avons cherché dans cette étude à valider cette hypothèse puis, dans un second temps, à mettre à profit le caractère ponctuel de cette source qu'est le soleil au regard du domaine de longueur d'onde décimétrique pour quantifier notre

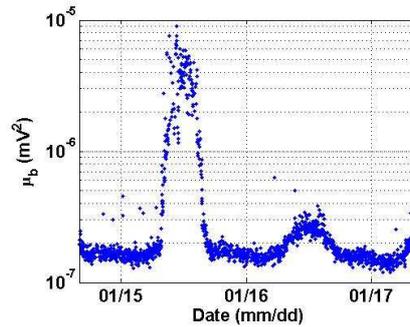


Figure 5.: *Variation de μ_b en fonction du temps. La journée du 15/01/2005 montre une puissance reçue de plus d'un ordre de grandeur supérieure à celle reçue au cours d'une journée typique comme celle du 16/01/2005.*

résolution angulaire.

Dans le cadre de cette hypothèse, le signal mesuré par les antennes doit présenter des caractéristiques qui vont nous permettre de l'identifier :

- il doit être cohérent, par conséquent il doit être similaire entre les antennes du réseau,
- il doit être apériodique, large bande : son spectre de fréquence ne doit donc pas présenter de contribution bande étroite.

La densité spectrale de puissance (Fig 6) pour un événement acquis pendant l'éruption solaire montre un excès significatif de puissance sur toute la largeur du spectre de fréquence. Ce signal peut donc être assimilé à une succession de transitoires rapprochés qui dure pendant toute la période de l'émission solaire. Le traitement habituel des transitoires associés aux gerbes atmosphériques ne peut donc pas être appliqué car la totalité de la fenêtre d'observation est occupée par ce signal, ce qui rend impossible la détermination du temps d'arrivée par seuil du signal. En revanche, une approche s'appuyant sur le produit de corrélation entre 2 signaux d'antennes filtrés dans la bande 37-70 MHz peut permettre de comparer les signaux de chaque antenne. Le produit de corrélation de 2 signaux permet de vérifier le degré de similarité entre 2 formes d'ondes enregistrées sur 2 antennes distinctes : si les 2 formes d'ondes sont effectivement semblables (Fig. 7 à droite), la corrélation, quantifiée par le pic devient importante, ce qui n'est pas dans le cas de signaux non-corrélés (bruit blanc, Fig. 7 à gauche). Dans notre cas, nous utilisons les signaux filtrés dans la bande de fréquence 37-70 MHz pour nous assurer qu'aucun signal périodique résultant d'émetteurs bande

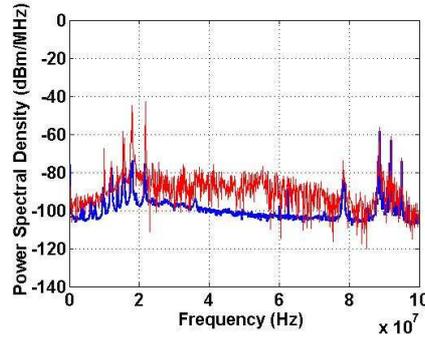


Figure 6.: *Densité spectrale de puissance (dsp) pour un événement acquis pendant l'éruption solaire (trait fin rouge) superposé à une dsp mesurée pendant une période sans activité solaire particulière. On observe un excès de puissance important visible sur toute la largeur de bande.*

étroite n'est contenu dans le signal.

La détection d'un pic de corrélation est validée si la condition suivante est satisfaite :

$$C_{max} \geq \langle C_{xy} \rangle + n \times \sigma_c \quad (3)$$

avec C_{max} la valeur maximale du vecteur de corrélation, $\langle C \rangle$ sa valeur moyenne, σ_c son écart type. La valeur $n = 11$ a été déterminée empiriquement. La position du pic de corrélation sur le vecteur est une image de l'écart en temps qui existe entre les signaux des 2 antennes. La source étant infiniment loin, l'hypothèse d'un front d'onde plan est justifiée et la direction d'arrivée peut être déterminée par une triangulation similaire à celle décrite au paragraphe précédent à l'aide des écarts de temps entre les antennes. Il est à noter ici que, dans le cas d'une émission solaire, en raison des mécanismes sources mis en jeu, les antennes de polarisation circulaire gauche reçoivent un signal plus important comme l'indique la figure 4. C'est donc préférentiellement avec ces dernières que nous réalisons la triangulation afin d'optimiser la reconstruction de la direction d'arrivée.

Sur la figure 8, la trajectoire suivie par le Soleil lors de cette journée est superposée aux directions reconstruites des événements durant l'éruption solaire. L'évolution du parcours en hauteur et en azimut en fonction du temps de notre source est en accord avec celui que l'on peut extraire des éphémérides. Un décalage angulaire moyen de 1.44° est déduit en prenant la totalité des événements (154) et cet écart se réduit à 0.76° en enlevant

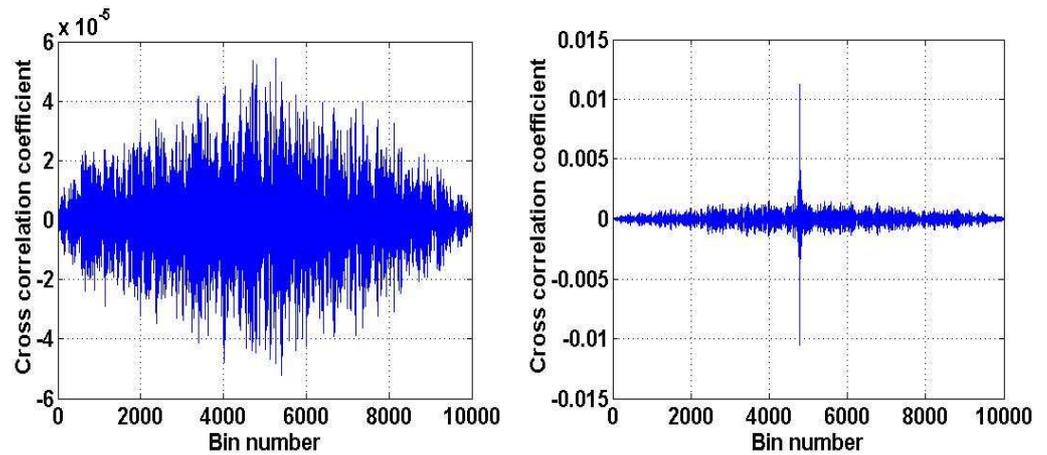


Figure 7.: Résultat du produit de corrélation qui quantifie la similarité des formes d'onde filtrées sur 2 couples d'antennes prises à des moments différents. A gauche, la corrélation au cours d'une période sans activité particulière, les signaux ne présentent pas de similarité. A droite, la corrélation lorsque l'éruption est présente sur le signal. Un pic ressort très nettement, sa position permet de mesurer le décalage temporel entre les signaux.

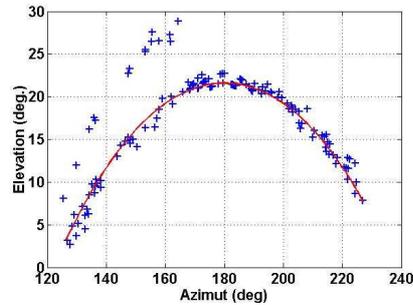


Figure 8.: Superposition des directions reconstruites et de la position du Soleil après correction des erreurs systématiques. Le lot des 16 événements présentant une direction d'arrivée très éloignée de la position du soleil est rejeté du lot de données.

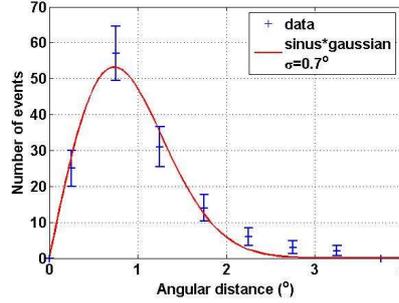


Figure 9.: La distribution des écarts angulaires après correction est correctement décrite par une gaussienne indiquant l'erreur de reconstruction multipliée par un sinus pour prendre en compte l'effet d'angle solide. La résolution de l'instrument est l'écart-type de la gaussienne : $\sigma = 0.74^\circ$.

les 16 événements qui se trouvent complètement hors de la trajectoire. A partir de cette direction d'arrivée reconstruite nous avons estimé la résolution angulaire de notre système en traçant la distribution des écarts angulaire entre la position du soleil obtenue par nos mesures et celle fournie par les éphémérides (Fig 9). Cette distribution est correctement ajustée par la fonction suivante :

$$f(\theta_{diff}) = \alpha \cdot \sin \theta_{diff} \cdot \exp\left(-\frac{\theta_{diff}^2}{2 \cdot \sigma^2}\right) \quad (4)$$

Le terme en sinus permet de compenser l'effet d'angle solide et la gaussienne rend compte de la précision de l'erreur de reconstruction. L'ajustement réalisé donne pour l'écart-type de la gaussienne $\sigma = 0.74^\circ$. Le réseau d'antennes présente donc une résolution angulaire inférieure à 1° . Cette valeur sera, de plus, d'autant plus petite que le nombre d'antennes utilisées sera grand et leur base importante.

3.4 Etalonnage des réponses des antennes

La comparaison des données aux modèles théoriques nécessite de mesurer la valeur du champ électrique détecté avec une précision de l'ordre de grandeur de celle donnée par les modèles. L'étalonnage en champ électrique des antennes est donc l'un des aspects fondamentaux de cette technique de détection. Pour réaliser cette opération, il est nécessaire de disposer d'une source commune qui puisse être observée sur les différentes antennes afin de comparer leur réponses respectives. De plus, cette réponse pouvant varier dans le temps (les antennes actuellement utilisées sont des dipôles actifs, dont l'amplificateur de tête peut voir sa réponse varier en fonction de la température), il serait

souhaitable de disposer d'une source de calibration, sinon événement par événement, du moins exploitant directement les données accumulées chaque jour par CODALEMA. Plusieurs méthodes sont envisageables. Parmi elles, l'utilisation des émetteurs radio fréquence est l'une des voies possibles. En comparant les puissances reçues par les différentes antennes, le gain relatif peut être estimé. Malheureusement, nous ne connaissons pas les directions d'arrivée des signaux de ces émetteurs. Pour ceux de la bande FM, nous savons que l'onde provient de l'horizon, une direction peu favorable par rapport au lobe d'antenne. Pour les émetteurs radio plus basses fréquences, notamment ceux utilisant la propagation par réflexion sur l'ionosphère, la direction d'arrivée est inconnue. Compte tenu des valeurs de champ électrique produit par les gerbes qui doivent être détectées, de quelques $\mu\text{V}/\text{m}$ à quelques dizaines $\mu\text{V}/\text{m}$, et sachant qu'une antenne est un capteur linéaire, nous avons choisi une deuxième voie qui consiste à étalonner en champ électrique nos capteurs à l'aide du signal galactique.

Pour ce faire, nous utilisons la variable $\mu_b = \langle V^2 \rangle$, définie au chapitre précédent, qui est une mesure des conditions de fond radio au moment de l'acquisition d'un événement. Cette variable est proportionnelle à la puissance moyenne de signal contenu dans la bande de fréquence 37 – 70 MHz. Compte tenu de la moyenne nulle de la tension dans cette bande de fréquence, cette variable est aussi la variance de la tension et $\sigma_b = \sqrt{\mu_b}$, l'écart-type de la tension, représente donc le bruit de fond de l'instrument. La figure 10 donne les variations temporelles de σ_b pour une antenne du réseau sur plusieurs mois d'acquisition. On observe des variations de σ_b dont l'amplitude peut atteindre un ordre de grandeur. Celles-ci résultent de l'apparition de sources extérieures qui augmentent ponctuellement le niveau du bruit de fond de l'instrument. Parmi celles-ci ont été identifiés :

- des émetteurs radio fréquences présents dans la bande de fréquence 37 – 70 MHz qui perdurent pendant de courtes périodes de temps. L'origine de ces perturbations peut être due par exemple à la présence de signaux de radio-téléphonie, mobile ou non,
- les activités mécaniques intenses à proximité du réseau d'antennes (travaux de déboisement utilisant des tronçonneuses, *etc...*),
- des phénomènes naturels d'origine atmosphérique, comme des orages, ou astrophysique comme des émissions d'origine solaire.

Cependant, en l'absence de ces perturbations, durant les périodes calmes, le bruit de fond de l'instrument subit tout de même des variations cycliques de plus faible amplitude illustrées figure 10 (à droite). Ce comportement est observé de manière synchrone sur toutes les antennes

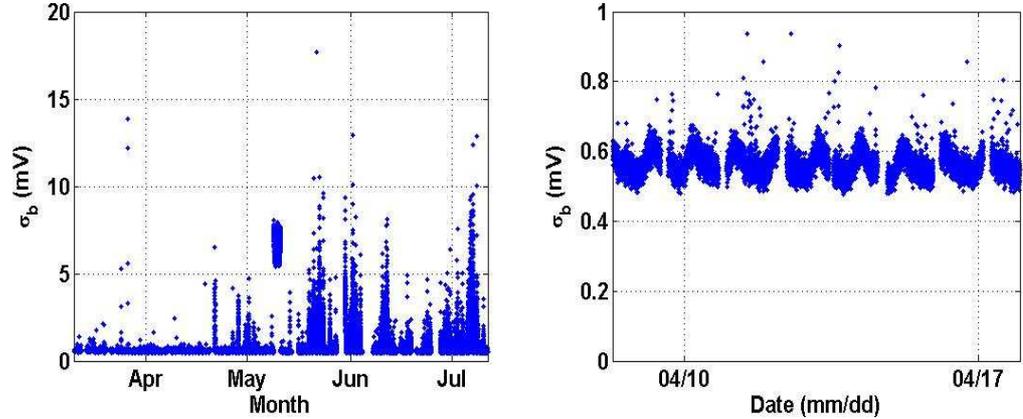


Figure 10.: *A gauche : comportement de la variable σ_b , écart type de la tension induite par le bruit en fonction du temps sur une antenne. A droite : détail révélant le comportement de σ_b sur une semaine pour la même antenne. On constate une variation périodique quasi journalière de σ_b .*

du réseau et l'étude fréquentielle des signaux ne révèle aucun signal présentant une signature spectrale particulière.

Afin de déterminer l'origine de cette modulation, le bruit de fond σ_b est tracé en fonction du temps sidéral (ou heure LST pour Local Sidereal Time) pour toutes les antennes et sur plusieurs mois d'acquisition. Les variations du bruit de fond indiquées figure 11 sont superposables. Le comportement étant identique tout au long de l'année, nous sommes donc en présence d'une source, ou de l'accumulation de sources, dont les coordonnées sont constantes dans le repère galactique. Hormis pour l'antenne L1 pour laquelle nous utiliserons uniquement la partie de signal comprise entre 15 et 24 h LST, le comportement de σ_b au cours du temps LST est très similaire entre toutes les antennes. En revanche, sa valeur moyenne est dispersée. Nous nous sommes placés dans l'hypothèse que ce signal provient de l'émission radio de la galaxie. Dans ce cas, la température d'antenne due au bruit galactique de température T_{gal} est donnée dans [4] par :

$$T_{ant} = \frac{1}{\Omega_{ant}} \int_0^\pi \int_0^{2\pi} T_{gal}(\theta, \phi) \cdot G_{ant}(\theta, \phi) \cdot d\Omega \quad (5)$$

avec $T_{gal}(\theta, \phi)$ la température de la galaxie dans chaque direction du ciel, $G_{ant}(\theta, \phi)$ le gain de l'antenne, Ω_{ant} le lobe de l'antenne. Le système complet (câbles, amplificateur, etc...) amène une contribution de bruit

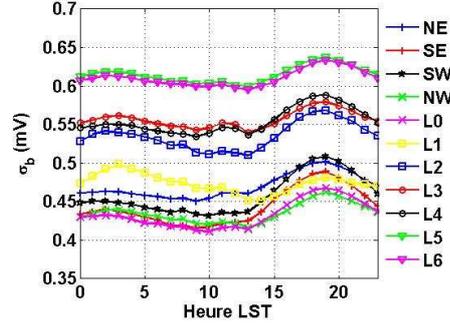


Figure 11.: Comportement de σ_b en fonction de l'heure LST pour 11 antennes du réseau sur plusieurs mois d'acquisition. L'écart-type de σ_b est similaire entre toutes les antennes, en revanche, sa valeur moyenne présente des disparités dues aux légères différences de gain entre les chaînes électroniques. L'antenne L1, en jaune présente un comportement différent des autres antennes qui pourrait être attribuée à une pollution électromagnétique résiduelle venant du site de Nançay.

supplémentaire T_{sys} qui s'ajoute à la température d'antenne. On obtient pour la température totale :

$$T_{tot} = T_{sys} + T_{ant} \quad (6)$$

La puissance mesurée est donnée par :

$$P_{tot} = k.T_{tot}.\Delta f \quad (7)$$

avec k , la constante de Boltzmann et Δf la bande de fréquence d'intégration. Dans notre cas, le signal n'est pas intégré par rapport au temps, mais échantillonné à F_e , la fréquence d'échantillonnage. Chaque point du signal correspond à une intégration de la puissance pendant l'intervalle de temps séparant deux points de mesures $\Delta t = \frac{1}{F_e}$. Par conséquent, nous avons estimé que la bande de fréquence d'intégration de (7) correspond à la fréquence d'échantillonnage du système $F_e = 500$ MHz. On obtient alors comme expression de σ_b :

$$\sigma_b = \frac{1}{R} \cdot \sqrt{P_{tot}} = \frac{1}{R} \sqrt{k \cdot \Delta f \cdot (T_{sys} + T_{ant})} \quad (8)$$

avec T_{sys} un terme constant qui définit le bruit du système et la température d'antenne T_{ant} qui sera fonction de la zone de ciel couverte par le lobe d'antenne à chaque instant. La compilation numérique de la carte du ciel à 408 MHz publiée dans [6] accessible à [5] permet d'estimer

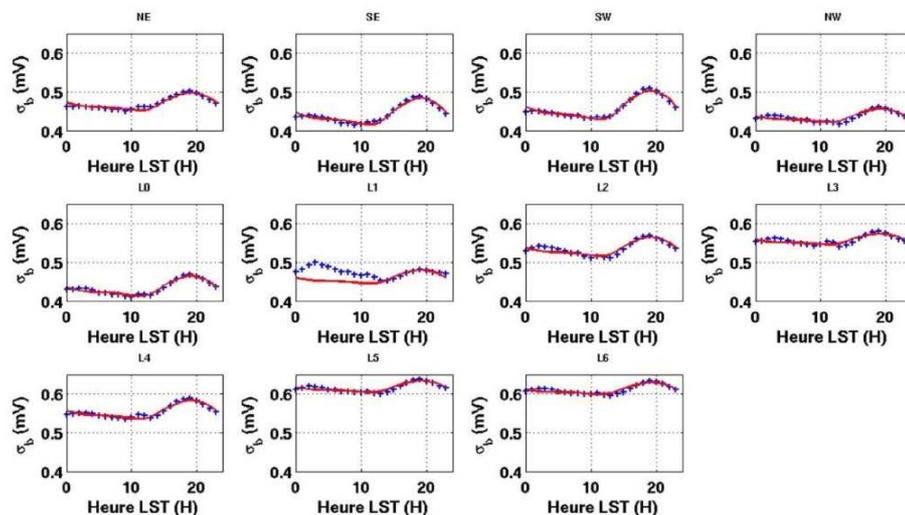


Figure 12.: La fonction 9, en rouge, reproduit bien le comportement de σ_b pour toute les antennes du réseau en fonction de l'heure LST, exceptée l'antenne L1 pour laquelle le paramétrage est réalisé sur l'intervalle de temps 15h-24h LST.

la température de bruit galactique en relatif à $f = 50$ MHz en supposant un indice spectral α constant tel que $T_{gal} \propto f^{-\alpha}$. La contribution dominante provient du centre et du plan galactique, c'est donc lorsque le lobe d'antenne pointe vers cette zone que le bruit de fond doit être maximal, il doit être minimal lorsque les antennes voient le pôle galactique. La puissance reçue par une antenne à chaque instant est obtenue en projetant le lobe des antennes dans le repère galactique. On estime ensuite la puissance reçue par une antenne $P_{gal}(t)$ en convoluant le lobe projeté dans le repère galactique avec la puissance émise par la galaxie pour chaque instant. La fonction suivante est ajustée aux données pour toutes les antennes du réseau (Fig. 12) :

$$f(t) = \sqrt{K_i + \alpha_i \cdot P_{gal}(t)} \quad (9)$$

avec K_i et α_i les deux paramètres ajustés. Cette fonction reproduit correctement le comportement du bruit de fond mesuré sur l'instrument. La source peut être attribuée à l'émission du disque galactique. Cette source étant vue par toutes les antennes du réseau, nous l'avons utilisée pour ajuster précisément les réponses de chacune des antennes à cette contribution. La correction appliquée aux signaux est donnée par un coefficient

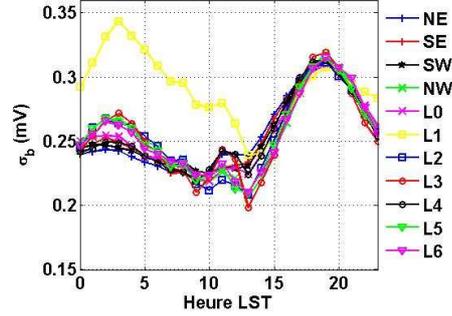


Figure 13.: Réponses des différentes antennes après correction des différences de gain dans l'ensemble de la chaîne d'acquisition du signal.

multiplicatif sans dimension :

$$a_i = \frac{\langle \alpha \rangle}{\alpha_i} \quad (10)$$

L'ajustement réalisé est donc relatif entre les antennes autour de la valeur moyenne mesurée du signal. Le paramètre K_i traduit le bruit induit par les divers éléments qui composent le système. La figure 13 illustre la correction finale de σ_b pour toutes les antennes du réseau avec les paramètres de l'ajustement. La précision obtenue sur la réponse des antennes est de l'ordre de 1 %.

4. Principaux résultats

Nous présentons ici les observables majeures dégagées par les analyses des données, concernant l'identification des signaux gerbes cosmiques, la topologie du champ électrique produit par une gerbe et enfin les estimations statistiques de dépendance en énergie du signal radio.

4.1 Reconnaissance des signaux : la coïncidence temporelle et angulaire

La stratégie que nous avons choisie en utilisant un trigger « particules » est de valider la détection radio de gerbes atmosphériques en utilisant au maximum l'information fournie par le détecteur de particules pour identifier sans ambiguïté les candidats gerbes radio. Les signaux des scintillateurs sont triangulés par la méthode du temps de vol de façon identique à celle décrite précédemment pour les antennes. Nous disposons donc à l'issue de la triangulation d'une information sur le temps d'arrivée de la gerbe, donnée par le paramètre t_{0scint} évalué par commodité au centre du réseau, ainsi que de sa direction $(\theta_{scint}, \phi_{scint})$.

La distribution des écarts de temps entre le front d'onde radio et le front de particules (Fig. 14) permet d'identifier deux populations. La première contribution est distribuée de façon uniforme sur tout l'intervalle de temps, les événements radio qui la composent ne présentent donc pas de corrélation avec l'instant d'arrivée du front de particules, leur répartition sur l'intervalle de temps est aléatoire. Ce sont des événements fortuits. La seconde population est distribuée dans un pic étroit d'une largeur inférieure à 200 ns, ces événements radio sont clairement liés à l'instant d'arrivée du front de particules. En l'absence de pollution électromagnétique des scintillateurs sur les antennes, ce sont donc les candidats gerbes radio. Une coupure en temps $|\Delta t| < 100$ ns est appliquée aux données pour ne conserver que la population d'événements présents dans le pic de corrélation. Nous évaluons ensuite, pour chaque événement, l'écart angulaire θ_{diff} entre la direction d'arrivée reconstruite avec les antennes et celle obtenue avec les scintillateurs, donné par :

$$\cos \theta_{diff} = \frac{\vec{u}_{ant} \cdot \vec{v}_{scint}}{||\vec{u}_{ant}|| \cdot ||\vec{v}_{scint}||} \quad (11)$$

avec \vec{u}_{ant} le vecteur directeur du front d'onde et \vec{v}_{scint} celui du front de particules. La distribution obtenue pour la variable θ_{diff} (Fig. 15, à gauche) exhibe une corrélation très nette entre les 2 directions d'arrivée pour une grande partie des événements. La dernière coupure, effectuée pour un écart angulaire $\theta_{diff} < 15^\circ$, distingue alors les événements dont la direction d'arrivée radio est corrélée à la direction d'arrivée du front de particules et les événements fortuits. A cette étape, la détection radio de gerbes atmosphériques avec le démonstrateur CODALEMA est validée.

La résolution angulaire du système est estimée à partir de la distribution des θ_{diff} pour les gerbes détectées en radio. Cette distribution peut être décrite par une fonction du type (Fig. 15, à droite) :

$$f(\theta_{diff}) = \alpha \cdot \sin \theta_{diff} \cdot \exp\left(\frac{\theta_{diff}}{2 \cdot \sigma^2}\right) \quad (12)$$

avec α un coefficient de normalisation. Le terme $\sin \theta_{diff}$ permet de tenir compte de l'effet d'angle solide entre les 2 directions d'arrivées, et σ , l'écart type, fournit une estimation de la résolution angulaire cumulée des 2 instruments, le réseau d'antenne et le réseau de détecteurs de particules. Pour ces données, la paramétrisation donne une résolution de l'instrument $\sigma = 2.3^\circ$. Compte tenu des résultats présentés au paragraphe 3.3 (la précision de reconstruction de la direction d'arrivée par les antennes y est estimée à 0.7°), nous estimons qu'une grande partie de l'erreur sur la direction d'arrivée peut être imputée au réseau de scintillateurs, moins étendu que celui d'antennes.

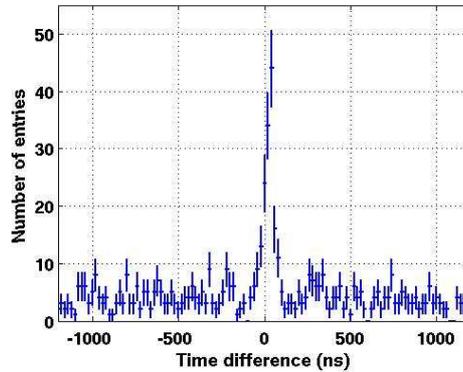


Figure 14.: *Distribution des écarts de temps entre le front d'onde radio et le front de particules par bin de 20 ns. On observe un pic d'une largeur de 100 ns indiquant une corrélation entre les 2 temps d'arrivée.*

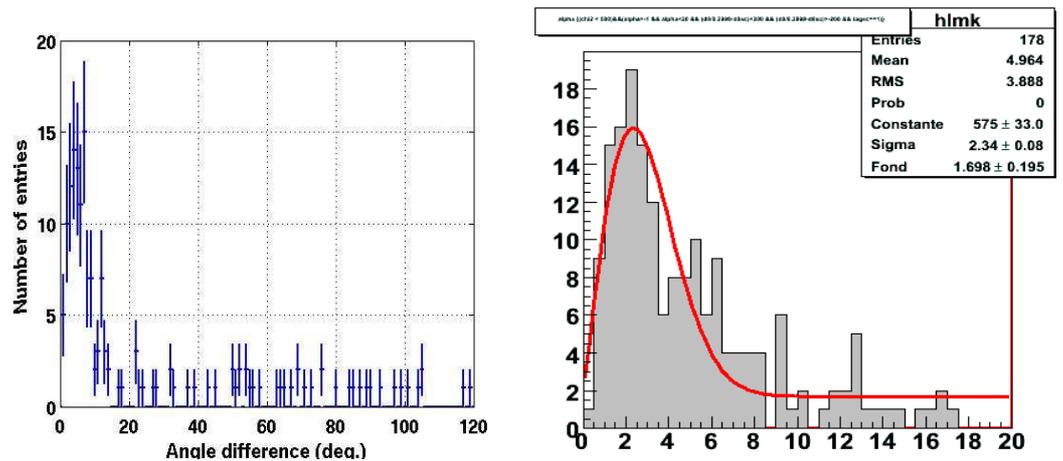


Figure 15.: *A gauche : distribution de l'écart angulaire entre les directions d'arrivée reconstruites avec les détecteurs de particules d'une part et avec le réseau d'antennes d'autre part pour les événements présents dans le pic de corrélation temporelle de la figure 14. A droite : pour les écarts angulaires inférieurs à 15° (en abscisse), la distribution des gerbes détectées en radio est correctement paramétrée (trait continu) par une gaussienne de moyenne $\mu = 0$ et d'écart-type $\sigma = 2.3^\circ$ multipliée par un sinus pour rendre compte de l'effet d'angle solide.*

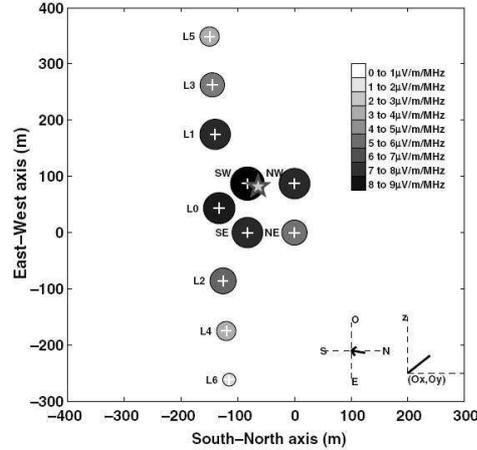


Figure 16.: *Exemple de l’empreinte d’un événement gerbe radiodétekté sur le réseau CODALEMA. Les antennes sont symbolisées par des croix blanches et le champ électrique mesuré sur les antennes est symbolisé par un cercle dont la taille et le niveau de gris sont proportionnels à sa valeur. La direction d’arrivée reconstruite (θ, ϕ) est indiquée en bas à droite. L’étoile symbolise la position du coeur de gerbe estimée à partir du barycentre des 2 distributions de la figure 17.*

4.2 La topologie du champ électrique

Afin de mettre à profit la qualité de notre système de détection, nous avons cherché à développer une analyse des signaux radio événement par événement. En effet, l’étendue spatiale du réseau d’antennes de CODALEMA offre pour la première fois la possibilité d’observer sur des distances significatives le comportement du champ électrique engendré par une gerbe.

L’empreinte radio des événements gerbes La figure 16 illustre l’empreinte sur le réseau d’antennes (à l’époque ne comprenant qu’une ligne E-W augmentée de 4 antennes en carré) d’une gerbe atmosphérique détektée en radio. Dans cet exemple, toutes les antennes du réseau ont été touchées. La distribution des amplitudes du champ électrique en fonction de la position des antennes dans la bande 37-70 MHz présente une variation sur un ordre de grandeur en amplitude : il est proche de $10 \mu\text{V}/\text{m}/\text{MHz}$ au centre du réseau où se situe le détecteur de particules puis décroît avec la distance, jusqu’à la limite d’analyse des signaux située à $1 \mu\text{V}/\text{m}/\text{MHz}$.

Sur la figure 17, le même événement est représenté selon l’axe d’antennes Nord-Sud et Est-Ouest. A titre de comparaison, le champ électrique as-

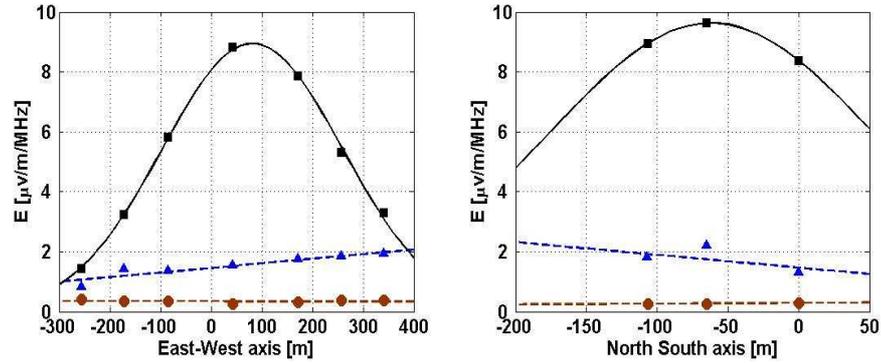


Figure 17.: Evolution de l'amplitude crête du champ électrique mesuré pour l'événement de la figure 16 selon l'axe d'antennes Est-Ouest à gauche et l'axe Nord-Sud à droite (antennes NW, SW, L0) en ligne pleine et carrés noirs. Pour chacun de ces axes sont superposés un exemple de RFI (tirets et triangles bleus) et le seuil de détection de l'instrument (tirets et cercles rouges).

socié à un RFI ainsi que le seuil de détection de l'instrument ont été superposés à ces 2 distributions. Le champ électrique associé à la gerbe atmosphérique présente une amplitude de variation nettement plus importante que celui engendré par la source parasite de transitoire radio. La distribution des amplitudes du champ électrique sur les antennes constitue un point fondamental pour la technique de détection radio. A l'échelle d'un réseau plus dense d'antennes, l'empreinte radio laissée sur les antennes par une gerbe atmosphérique doit pouvoir être discriminée de celle laissée par un RFI à partir d'un critère sur la topologie particulière, "en cloche", du champ électrique. Cette configuration singulière doit permettre à terme d'identifier *a posteriori* des événements gerbes sur des critères purement radio dans la mesure ou une majorité de ces RFI trouvent leur source à l'extérieur du réseau d'antennes et, dans ce cas, ne pourraient pas présenter cette empreinte. Par ailleurs, un RFI dont la source se trouverait à l'intérieur du réseau serait quant à lui identifié par l'analyse des temps de vol sur les antennes qui présenteraient un épicycle en temps centré sur un point source.

Le profil du champ électrique Cette topologie particulière confirme les mesures réalisées dans les années 60 pour lesquelles une dépendance exponentielle du champ électrique en fonction de la distance à l'axe avait été trouvée en moyennant ces résultats sur plusieurs événements [7]. En posant l'hypothèse selon laquelle le champ électrique varie de manière

exponentielle avec la distance à l'axe de la gerbe, donc décrit par :

$$E_i(d) = E_0 \cdot \exp(-d_i/d_0) \quad (13)$$

où le paramètre de distance à l'axe d_i est défini pour chaque antenne (x_i, y_i) , on peut alors extraire dans le repère propre de la gerbe les quantités E_0 , d_0 et (x_0, y_0) la position du coeur de gerbe sur le réseau. Par contre, seuls les événements possédant une multiplicité supérieure à 4 peuvent être paramétrés par cette fonction. Le paramétrage est réalisé en minimisant l'expression du χ^2 .

Le résultat de ce paramétrage est illustré figure 18 pour 4 événements. Les antennes sur lesquelles aucun transitoire n'a été détecté permettent de fournir une contrainte supplémentaire sur le paramétrage : le transitoire n'ayant pas été détecté, son amplitude doit être inférieure ou égale au signal mesuré sur l'antenne. Les barres d'erreur sont données par l'écart-type sur le bruit. Les 4 événements sélectionnés sur cette figure permettent d'illustrer la variété des comportements du champ électrique tant sur l'amplitude maximum que sur son extension latérale.

4.3 Corrélation du signal radio avec l'énergie de la gerbe

La distribution en énergie des événements dits "internes" (ceux dont le coeur de gerbe est circonscrit par le détecteur de particules) mesurés par les deux systèmes (particules et radio) est présentée Fig. 19 (à gauche). Seules les gerbes tombées dans un rayon de 200 m du centre du réseau ont été sélectionnées ici. Le seuil en énergie du détecteur de particules est de 10^{15} eV. Les deux distributions convergent quand l'énergie augmente, ce qui signifie un accroissement de l'efficacité de détection de la radio. Le seuil en énergie pour la radiodétection est ainsi estimé à 10 % à $9 \cdot 10^{16}$ eV. La figure 19 à droite présente l'efficacité de détection radio en fonction de l'énergie. En raison de la faible statistique disponible (environ 1 événement par jour reconstruit sur le réseau d'antennes), il est difficile de mesurer l'efficacité à plus haute énergie, mais une extrapolation de la tendance de la figure 19 permet de prédire une valeur de 100 % autour de 10^{18} eV.

5. Conclusion

Nous dressons ici un bilan des résultats obtenus avec l'expérience CODALEMA pour mieux cerner les prochains objectifs à atteindre pour rendre complètement opérationnelle la détection radio des grandes gerbes atmosphériques :

- l'existence d'un champ électrique associé à une gerbe est démontrée.

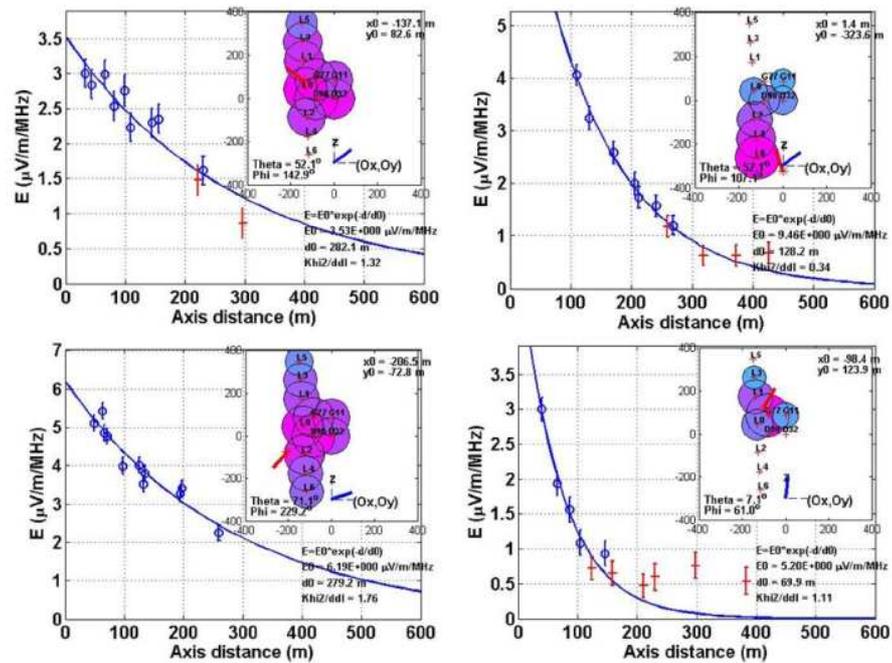


Figure 18.: Résultats de l'ajustement du champ électrique pour 4 événements différents. Sur chacune des figures, les points de mesures sont des cercles bleus lorsque un transitoire a été détecté sur l'antenne et une croix rouge lorsqu'aucun transitoire n'a été détecté. Ces derniers permettent de dimensionner le niveau de bruit pour chaque événement et posent une contrainte haute sur le champ électrique mesuré. La barre d'erreur est donnée par l'écart-type du bruit. La fonction paramétrée est tracée en trait plein bleu et les valeurs des paramètres obtenues sont indiquées en bas à droite. En insert, l'empreinte de l'événement sur le réseau d'antennes similaire à celui de la figure 16.

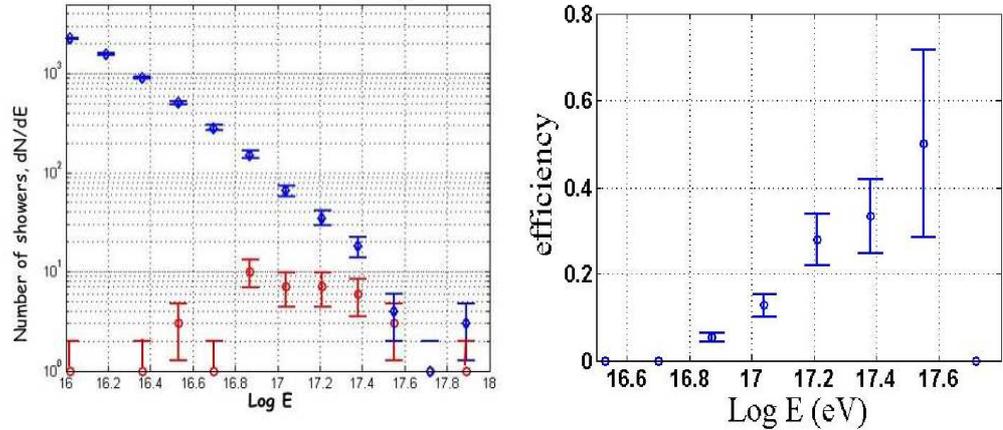


Figure 19.: *A gauche : distribution de l'énergie mesurée par le détecteur de particules (points bleus) et des événements détectés en radio pour les événements internes dont le coeur est localisé dans un rayon de 200 m autour du centre du réseau. A droite : efficacité de détection de la radio en fonction du log de l'énergie de la gerbe (exprimée en eV).*

- Une technique de détection robuste a été développée avec un seuil de détection en énergie de l'instrument inférieur à 10^{17} eV.
- Dans ce domaine d'énergie, les champs électriques mesurés sont de l'ordre de quelques $\mu\text{V}/\text{m}/\text{MHz}$.
- La topologie du champ électrique associé aux gerbes a pu être mesurée pour la première fois événement par événement. Sa distribution singulière en cloche permet d'envisager une reconnaissance du champ électrique basée sur des critères de sélection purement radio.
- La direction d'arrivée des gerbes atmosphériques peut être reconstruite avec une résolution angulaire meilleure que 1° .
- La réponse en champ électrique des antennes peut être calibrée avec une précision de l'ordre de 1%.
- Bien que cela n'ait pas été abordé ici, nous pouvons avancer que le réseau d'antennes présente une acceptance qui semble favoriser les gerbes inclinées, quoique la limite d'acceptance du trigger n'aie pas permis de valider la détection de gerbes d'angle zénithal supérieur à 60° .
- La technique de radiodétection montre que la détection de front d'onde d'incidence horizontale est possible (voir par exemple la détection des transitoires de bruit).

- Le comportement exponentiel du profil du champ électrique en fonction de la distance à l’axe est vérifié. Les données sont particulièrement bien ajustées par ce profil.
- La position du coeur de gerbe est obtenue à partir des données radio.

Tous ces aspects doivent encore être approfondis pour finaliser cette méthode de détection. Le premier enjeu est de parvenir à déterminer l’observable qui va permettre d’estimer l’énergie du primaire. A ce jour, seules des relations moyennées sur des centaines d’événements ont permis d’observer une relation du champ électrique mesuré avec l’énergie du primaire [8]. Cette approche est trop limitative. Le paramètre E_0 , amplitude du champ électrique au pied de gerbe, en particulier, constitue une piste privilégiée pour estimer l’énergie. Pour conforter cette démarche, il est nécessaire de disposer d’un réseau de détecteurs de particules élaboré qui puisse fournir une estimation de l’énergie : ce détecteur est maintenant installé à Nançay et les résultats devraient bientôt apparaître.

De plus, il est nécessaire de poursuivre les efforts techniques pour rendre autonome (en termes d’alimentation, de trigger et d’acquisition des données) cette méthode de détection et pour pouvoir l’utiliser sur des réseaux géants destinés à l’observation des rayons cosmiques d’ultra haute énergie. C’est sans doute là l’un des enjeux pour cette technique dans les années à venir. Un premier effort en ce sens a été engagé en 2007 avec le déploiement de 3 stations autonomes de test auprès de l’Observatoire Pierre Auger en Argentine. Ces stations constituent les prototypes des futurs détecteurs qui seront implantés sur CODALEMA au cours de l’année 2008 en vue de l’extension de la surface du réseau.

Les résultats de CODALEMA ont fait l’objet de nombreuses publications en congrès (pour les plus récentes, voir [9] et [10]) et de deux articles en revue [11, 12], tous disponibles sur le site arXiv/astro-ph. L’antenne dipole actif développée spécialement pour CODALEMA et qui équipe maintenant l’intégralité du réseau est décrite dans [13]. Par ailleurs, la thèse d’Arnaud Bellétoile [1], soutenue en 2007 à l’Université de Nantes, est la première en France sur le sujet de la radiodétection des gerbes de particules initiées par les rayons cosmiques d’ultra haute énergie. Le lecteur y trouvera, détaillée, la méthode de détection de CODALEMA, ses performances et résultats, ainsi que la description complète des premiers tests d’implantation de stations autonomes effectués sur le site d’Auger.

Références

- [1] A. Bellétoile, *Développement et analyse des données d'une expérience de radiodétection des rayons cosmiques d'ultra-haute énergie*, thèse de doctorat de l'Université de Nantes, 2007
- [2] <http://www.obs-nancay.fr/>
- [3] <http://www.auger.org/>
- [4] J. D. Kraus, McGraw-Hill, *Antennas*, 1950
- [5] <http://www.mpifr-bonn.mpg.de/survey.html>
- [6] C. G. T. Haslam, C. J. Salter, H. Stoffel, W. E. Wilson, *Astronomy & Astrophysics*, suppl. 47, pp. 1-140, 1982
- [7] H. R. Allan, in J. G. Wilson S.A. Wouthuysen (Eds), *Progress in Elementary Particle and Cosmic Ray Physics*, North-Holland, Amsterdam, 1971
- [8] H. Falcke et al., *Nature* 435, pp. 313-316, "*Detection and imaging of atmospheric radio flashes from cosmic ray air showers*", 2005
- [9] D. Lebrun and the CODALEMA collaboration, "*CODALEMA : A Cosmic Ray Radio Detection Array*", proceedings of the 30th International Cosmic Ray Conference, Merida, Mexique, 2007
- [10] O. Ravel and the CODALEMA collaboration, "*Radio Detection of UHECR by the CODALEMA Experiment*", proceedings of the 30th International Cosmic Ray Conference, Merida, Mexique, 2007
- [11] D. Ardouin et al., "*Radio-detection signature of high energy cosmic rays by the CODALEMA experiment*", *NIM A*. 555, pp. 148-163, 2005
- [12] D. Ardouin et al., "*Radioelectric field features of extensive air showers observed with CODALEMA*", *Astroparticle Physics* 26, pp. 341-350, 2006
- [13] D. Charrier and the CODALEMA collaboration, "*Design of a low noise, wide band, active dipole antenna for a cosmic ray radiodetection experiment*", proceedings of the IEEE-APS International Symposium, 2007