

UNIVERSITÉ DE NANTES
FACULTÉ DES SCIENCES ET TECHNIQUES

ÉCOLE DOCTORALE
MATÉRIAUX, MATIÈRE ET MOLÉCULE DES PAYS DE LA LOIRE

Année : 2011

N° attribué par la bibliothèque

--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

Vers la radiodétection autonome des rayons cosmiques de très haute énergie

THÈSE DE DOCTORAT
Discipline : Physique Nucléaire
Spécialité : Physique Subatomique et Applications

Présentée et soutenue publiquement par

Thibault Garçon

Le 16/12/2010, devant le jury ci-dessous

<i>Président</i>	M. Plagnol Eric <i>Directeur de Recherche CNRS</i>
<i>Rapporteurs</i>	M. Busto José , <i>Professeur de l'Université de la Méditerranée</i> M. Urban Marcel , <i>Directeur de Recherche CNRS</i>
<i>Examineurs</i>	M. Gerard Eric , <i>Directeur de Recherche CNRS</i> M. Lautridou Pascal, <i>Directeur de Recherche CNRS</i> M. Martin Lilian , <i>Chargé de Recherche CNRS</i> M. Plagnol Eric, <i>Directeur de Recherche CNRS</i>

Directeur de thèse : M. Lautridou Pascal

Co-encadrant : M. Martin Lilian

N° ED

A mon grand-père,

Remerciements

La page de remerciements est l'ultime pierre à apporter à l'édifice d'une thèse. Ce n'est pas forcément la moins risquée, ni la moins sensible. Le lecteur (trop ?) curieux n'y trouvera pas de sous-entendus ou d'anti-remerciements. Je ne vois dans ces quelques lignes que l'occasion unique d'exprimer ma gratitude envers un certain nombre de personnes, à mes côtés depuis quelques mois, quelques années, voire bien plus.

Je remercie en premier lieu les membres de mon jury, José Busto, Marcel Urban, Eric Gérard, et Eric Plagnol, d'avoir accepté d'évaluer ce travail de trois ans, à travers ce manuscrit et ma soutenance. Merci de vos questions et remarques qui m'ont permis d'apporter d'ultimes améliorations. Mes remerciements s'adressent évidemment à Jacques Martino pour m'avoir accueilli à Subatech en 2007, et aux deux directeurs qui lui ont succédé : Pascal Lautridou, et Bernd Granbow.

Pascal a également accepté de diriger ma thèse et, malgré ses responsabilités administratives, il a su m'encourager à surmonter un certain nombre d'obstacles que je présumais infranchissables, et je l'en remercie. Merci Lilian d'avoir su encadrer mon travail au quotidien, d'avoir cru en mes capacités et de m'avoir largement soutenu, particulièrement durant les derniers mois de rédaction et de préparation de soutenance. Je remercie l'ensemble du groupe astrophysique de SUBATECH. Je n'ai pas pu travailler longtemps avec Daniel, Jacob et Thierry, mais ils ont toujours su répondre aux questions que je n'ai pas manqué de leur poser. Merci à Olivier, avec qui j'ai pu mener une partie de mon travail de thèse. Benoît, roi de l'analyse des données, et des estimations d'erreurs, hispanophone et Auger-connaisseur, tu as su m'apporter une aide précieuse dans la pampa argentine, ou devant, au choix, une corrélation en énergie, une trajectoire d'avion, des orages. Richard, tu as été un appui scientifique et humain très important pour moi. Ton départ pour l'Argentine au mois de novembre a rendu bien vide un fauteuil de l'amphi Besse, lors de ma soutenance, mais tes mots de soutien puis de félicitations m'ont beaucoup touché. J'ai eu l'opportunité durant mon doctorat de travailler avec plusieurs autres personnes de SUBATECH, liées au groupe Astrophysique, et je tenais à les remercier : Didier, tes connaissances dans les antennes, ont été un peu - je l'espère - retranscrites dans la thèse. De nombreuses simulations ont été validées par ton œil bienveillant. Tes explications, longues et patientes m'ont beaucoup apporté. L'étude des stations autonomes m'a permis de travailler avec Stéphane et Jean-Luc. Entre informatique et électronique de la station, j'ai pu longuement squatter vos bureaux. Plusieurs thésards se sont succédé pendant ces trois ans, avec qui j'ai pu travailler : Arnaud, revenu depuis en post-doc, dont j'ai hérité le bureau, Thomas et Sandra, mes aînés sur CODALEMA, puis maintenant, Ahmed et Diego. Des remerciements particuliers à Vincent avec qui j'ai pu partager de nombreuses missions sur le terrain en Argentine ou à Nançay (profitons-en pour remercier le Bife de Chorizo, les plateaux de fromage et les quelques verres de vins des différentes missions sur le terrain), et discuter de nombreux résultats.

Petite pause dans le bureau H115 : pensée pour les deux 'longue durée', Sam (qui a su garder deux semaines d'avance sur moi durant la fin de sa thèse, précieux pour connaître les formalités à réaliser) et Tuk (ça avance la rédaction ?). D'autres se sont succédé pour des durées plus ou moins longues (Cyril, Yoro, Jonathan, Cécilia, ...). Pour le reste des thésards, pas encore cités, entre les anciens, Thomas, Jérôme, Sarah, Guénolé, Mickaël, Nicolas, Sandra, Julie et Olivier, avec qui j'ai pu partager quelques pintes, et les actuels, Eric, Van Minh, JB, Ludivine, et tous les autres, je n'oublierai pas les cafés, repas (11h30, c'est 11h30), les soirées et autres. J'ai eu l'occasion de tisser des liens d'amitié avec plusieurs personnes du laboratoire, liste dont je n'assure aucune exhaustivité : Fred, Nico, Arnaud, Yoann, Louis-Marie, Xavier, ...

Enfin, je remercie l'équipe des footaux d'avoir supporté mes chevauchées improbables sur l'aile droite ou gauche du gymnase de l'EMN, mes centres au neuvième poteau. Merci donc tout spécialement aux plus assidus d'entre eux : Hervé, Jim, Francis, Laurent, Mario, Patrick, Abdel, ...

Remontons un peu dans le temps, et j'adresse mes pensées à différentes personnes, qui ont éveillé ou confirmé ma passion pour les sciences : Françoise Geffraye, Benjamin Trocmé, Yannick Arnoud, Etienne Klein, ...

Je tiens à remercier ma famille, dont le soutien matériel (orthographe comprise) et affectif m'ont permis et me permettent toujours de surmonter les difficultés.

Merci enfin, à la plus belle découverte de mes trois dernières années, Alona.

Table des matières

Introduction	1
1 Des rayons cosmiques aux gerbes atmosphériques détectées en radio	5
1.1 Un rapide historique	5
1.2 Les gerbes atmosphériques	7
1.2.1 Les propriétés et les caractéristiques de la gerbe	7
1.2.2 Les principales techniques de détection	11
1.2.3 Un aperçu historique des expériences	15
1.2.4 De la controverse au détecteur géant Pierre Auger	16
1.3 La radiodétection	19
1.3.1 De la cohérence à l'énergie	19
1.3.2 L'effet géomagnétique	20
1.3.3 Le profil latéral du champ radio	21
1.3.4 Les modèles et simulations	23
2 CODALEMA : Historique et présentation	27
2.1 L'Observatoire de Nançay	27
2.1.1 Le radiotélescope	28
2.1.2 Le radiohéliographe	29
2.1.3 Le Réseau Décamétrique	29
2.1.4 Les nouvelles expériences et projets	30
2.2 CODALEMA-I	31
2.2.1 Les contraintes expérimentales	31
2.2.2 Les antennes log-périodiques	33
2.2.3 Les scintillateurs	34
2.2.4 Le système d'acquisition	35
2.2.5 Les principaux résultats	36
2.3 CODALEMA-II	38
2.3.1 Les nouveaux scintillateurs	38
2.3.2 Les antennes dipolaires actives	45
2.3.3 Le signal radio au long de la chaîne expérimentale	55

3	CODALEMA-II : Performances et sensibilité de l'expérience	67
3.1	Les principaux résultats	67
3.1.1	Les coïncidences angulaires et temporelles	68
3.1.2	Les directions d'arrivée	72
3.1.3	Les distributions en énergie	80
3.2	Les sensibilités d'antennes	82
3.2.1	Le suivi de qualité	82
3.2.2	La sensibilité au bruit galactique	84
3.2.3	Les effets d'environnement	90
3.2.4	La distribution latérale du champ radio	96
3.3	La corrélation en énergie	104
4	La préparation et mise en œuvre d'un système de radiodétection autonome	111
4.1	L'étude et cartographie des RFI sur le site de Nançay	112
4.1.1	Les sources proches	113
4.1.2	Les sources éloignées	115
4.1.3	Les sources mobiles	115
4.1.4	Conclusions sur les RFI	120
4.2	RAuger : premier prototype de détection autonome	123
4.2.1	Présentation	123
4.2.2	Les principaux résultats	124
4.3	Les nouvelles stations autonomes	128
4.3.1	Les caractéristiques de la station	128
4.3.2	Les tests de compatibilité électromagnétique	135
4.3.3	La sensibilité au bruit galactique	137
4.3.4	La recherche et la mise en évidence de coïncidences	138
4.4	Vers l'étude de l'impulsion radio	147
	Conclusion	153
	Bibliographie	156

Liste des figures

1	Spectre en énergie du flux des rayons cosmiques	2
1.1	Taux d'ionisation mesurés par quelques expériences en ballon	6
1.2	Taux d'ionisation mesuré pendant la traversé de l'Atlantique par Pierre Auger	7
1.3	Gerbe atmosphérique simulée et cascade de particules dans des couches de plomb	8
1.4	Développements longitudinaux de gerbes : muons et électrons	11
1.5	Développements latéraux de gerbes : muons et électrons	12
1.6	Exemples de distributions NKG	13
1.7	Exemple de reconstruction hybride à Auger	14
1.8	Corrélation en énergie des détecteurs au sol à Auger	15
1.9	Diagramme de Hillas	17
1.10	Spectre en énergie reconstruit à Auger	18
1.11	Masse des primaires reconstruite à Auger	18
1.12	Corrélation en énergie du signal radio : Expériences de Chacaltaya et de Moscou	20
1.13	Effet du champ magnétique : Expérience de Prescott	21
1.14	Distribution latérale du champ radio : Expérience de Haverah Park	22
1.15	Simulations REAS3-MGMR : Impulsions	25
1.16	Simulations REAS3-MGMR : Spectres en fréquence	25
2.1	Gammes en fréquences observées à l'Observatoire de Nançay	28
2.2	Vue aérienne de l'Observatoire de Nançay	28
2.3	Le Radiotélescope	29
2.4	Le Radiohélographe	30
2.5	Le Réseau Décamétrique	31
2.6	Spectre radio du ciel à Nançay	33
2.7	Configuration du réseau CODALEMA-I	34
2.8	Diagrammes de réception de l'antenne log-périodique	35
2.9	Carte du ciel des directions d'arrivée de CODALEMA-I	36
2.10	Profils reconstruits avec l'expérience CODALEMA-I	37
2.11	Scintillateur de CODALEMA-II	38
2.12	Signaux bruts obtenus par les scintillateurs de CODALEMA-II	39
2.13	Conventions géométriques de l'expérience CODALEMA	42
2.14	Distribution azimutale des directions d'arrivée scintillateurs	42

2.15	Evolution de l'asymétrie azimutale des directions d'arrivée scintillateurs	43
2.16	Distribution zénithale des directions d'arrivée scintillateurs	43
2.17	Schéma simplifié de la carte MATAcq	46
2.18	Capture d'écran du PC d'acquisition antennes	47
2.19	Monitoring temps réel de l'expérience	48
2.20	Distribution des Δt entre deux évènements consécutifs	49
2.21	Spectres en fréquence d'évènements associés à des gerbes atmosphériques	51
2.22	Exemple de filtrage sur un évènement radio	53
2.23	Configuration de l'expérience au 1er janvier 2010	54
2.24	Antennes dipolaires	55
2.25	Intérieur du conteneur d'acquisition	56
2.26	Schéma de la chaîne expérimentale en radio	56
2.27	Intégrales de courant dans un dipôle	58
2.28	Simulation et modèle de la résistance d'antenne	60
2.29	Simulation et modèle de la réactance d'antenne	60
2.30	Diagrammes de réception du dipôle	62
2.31	Gain du dipôle en fonction de la fréquence	63
2.32	Longueur effective du dipôle en fonction de la fréquence	63
2.33	Schéma électrique équivalent de la réponse d'antenne	64
2.34	Atténuation en dB des câbles antennes	65
3.1	Différence temporelle et différence angulaire entre antennes et scintillateurs	69
3.2	Traces radio temporelles avec prédictions scintillateurs	70
3.3	Evolution du $t_{sci} - t_{ant}$ au cours du temps	71
3.4	Angle zénithal moyen en fonction de la multiplicité	71
3.5	$t_{sci} - t_{ant}$ en fonction de l'angle zénithal	72
3.6	Carte du ciel des directions d'arrivée	73
3.7	Construction du modèle géomagnétique	75
3.8	Carte du ciel prédite vs modèle géomagnétique	76
3.9	Distributions angulaires observée et attendue	76
3.10	Carte du ciel de la polarité des signaux	77
3.11	Localisation des 3 antennes sensibles à la polarisation Nord-Sud	77
3.12	Carte du ciel prédite vs modèle géomagnétique en polarisation Nord-Sud	78
3.13	Distributions angulaires observées et attendues en polarisation Nord-Sud	79
3.14	Distributions angulaires observées et attendues : modèles 'raffinés'	80
3.15	Distributions en énergie des deux réseaux	81
3.16	Efficacité de la détection radio en fonction de l'énergie	81
3.17	Evolution du bruit enregistré par une antenne, pour un run	83
3.18	Evolution du bruit enregistré par l'ensemble du réseau, pour un run	84
3.19	Carte du bruit moyen enregistré pour un run	85
3.20	Bruit moyen enregistré par une antenne sur plusieurs mois	85
3.21	Variations galactiques mesurées à CODALEMA	86

3.22	Spectre mesuré pour EO4 à l'analyseur	87
3.23	Spectre mesuré pour EO1 et EO4 avec la MATAcq : intermodulations	88
3.24	Spectre mesuré pour NS4 avec la MATAcq : intermodulations	88
3.25	Spectre mesuré pour EO1 avec la MATAcq : répliques FM	89
3.26	Spectres mesurés pour avec la MATAcq : effet des réjecteurs FM	90
3.27	Environnement proche de NE4N	92
3.28	Spectre mesuré et gain simulé pour NE4N	93
3.29	Environnement de l'antenne NE1	93
3.30	Distribution azimutale détectée par EO3	95
3.31	Distribution azimutale détectée par EO7	95
3.32	Distribution azimutale détectée par NE1	96
3.33	Configuration du réseau NE1-NS3-NS4-D32-D98	96
3.34	Carte du ciel des directions d'arrivée détectées par NE1	97
3.35	Fiche radio d'un évènement	99
3.36	Fiche radio d'un évènement anormal	100
3.37	Extension latérale d_0 du champ radio	102
3.38	Profils en fonction de l'énergie : modèle de Huege	102
3.39	Explication de la variation du d_0 avec l'angle zénithal	103
3.40	Décalage des cœurs particules et radio	104
3.41	Tirage Monte-Carlo : Erreur absolue en Log en fonction de l'erreur relative	107
3.42	Tirage Monte-Carlo : impact des erreurs sur la corrélation	107
3.43	Corrélation en énergie, avec ou sans correction du champ magnétique	108
3.44	Pente déduite de la corrélation en fonction des erreurs radio et scintillateurs	108
3.45	Evaluation d'une contribution indépendante du champ B dans l'émission radio	109
4.1	Cartographie des sources reconstruites pour le premier test de déclenchement radio	113
4.2	Heure des émissions parasites du radiohéliographe	114
4.3	Signal filtré et spectre en fréquence d'un évènement associé au bâtiment du DAM	114
4.4	Histogramme des reconstructions sphériques pour le signal périodique de 1.32 s	115
4.5	Source triangulée du signal périodique de 1.32 s projetée sur une vue aérienne de Nançay	116
4.6	Ensemble des points de la trajectoire de l'avion dans le plan θ - ϕ	117
4.7	Ajustement de la trajectoire de l'avion selon l'axe Nord-Sud	118
4.8	Ajustement de la trajectoire de l'avion selon l'axe Est-Ouest	119
4.9	Ajustement de la trajectoire de l'avion en angle zénithal	119
4.10	Ajustement de la trajectoire de l'avion en angle azimutal	119
4.11	Espaces aériens au-dessus de Nançay	120
4.12	Spectre en fréquence associé au passage d'un avion	121
4.13	Trajectoire dans le ciel d'un avion triangulé	121
4.14	Possibilités de calibrations temporelle et en amplitude avec un évènement avion	122
4.15	Vue aérienne du setup de l'Observatoire Pierre Auger	123
4.16	Setup du réseau de RAuger-1	124
4.17	Vue d'une station de RAuger-1	124

4.18	Description du fonctionnement de RAuger-I	125
4.19	Traces filtrées d'évènements, associés à un orage, pour RAuger-I	126
4.20	Evolution de l'angle azimutal reconstruit lors de l'orage	126
4.21	Carte du ciel des directions d'arrivée mesurée et simulée à RAuger-I	127
4.22	Signaux des 6 voies pour la triple coïncidence à RAuger-I	128
4.23	Vue d'une station autonome	129
4.24	Photos de l'antenne dipolaire et papillon	130
4.25	Confrontation des réponses de l'antenne dipolaire et papillon	131
4.26	Réponse mesurée et simulée de l'antenne papillon	131
4.27	Variation du bruit galactique mesuré par l'antenne papillon	132
4.28	Photo de l'électronique de la station autonome, caisson ouvert	133
4.29	Schéma de l'électronique d'acquisition de la nouvelle station autonome.	134
4.30	Photos des tests CEM réalisés en 2010	136
4.31	Mesure CEM dans la chambre anéchoïde	136
4.32	Mesure CEM du radiohéliographe	137
4.33	Minimum et maximum galactique mesurés avec une station autonome en Argentine	138
4.34	Configuration des réseaux autonomes actuels	139
4.35	Photo d'une station autonome installée à Nançay.	139
4.36	Exemple de taux de trigger mesuré par la première station autonome	140
4.37	Première coïncidence d'une nouvelle station autonome à Nançay	142
4.38	Photo d'une station autonome installée à RAuger	144
4.39	Nombre de triggers par minute pour les trois stations A2 A3 A4 lors d'un orage	145
4.40	Cartes du ciel des directions d'arrivée reconstruites pour l'orage	145
4.41	Histogramme des positions des maximum dans l'enregistrement MATAcq	146
4.42	Décalages en temps entre A2 et A1	147
4.43	Cartes du ciel des directions d'arrivée des coïncidences quadruples	147
4.44	Spectre mesuré et réponse d'antenne pour la coïncidence double en Argentine	148
4.45	Spectres théoriques de gerbes perturbés par la réponse d'antenne, et un signal brut	149
4.46	Spectre déconvolué d'un signal enregistré et simulation SEIFAS	150
4.47	Signaux déconvolués de la réponse d'antenne	150
4.48	Spectre en fréquence des signaux déconvolués de la réponse d'antenne	151
4.49	Futur réseau de CODALEMA-III	154

Liste des tableaux

3.1	Statistique de CODALEMA-II	68
3.2	Temps de retard des câbles sur l'axe Nord-Sud	70
3.3	Identification des intermodulations IP3	88
3.4	Identification des fréquences des répliques FM	89
3.5	Caractéristiques des corrélations en énergie pour différents estimateurs radio.	108
4.1	Comparaison des caractéristiques de l'ancienne et de la nouvelle électroniques frontales.	130
4.2	Comparaison des consommations de l'ancienne et de la nouvelle stations autonomes	134
4.3	Caractéristiques des 3 coïncidences observées à Nançay avec la première station autonome	141
4.4	Caractéristiques des 5 premières coïncidences observées à Nançay avec trois stations autonomes	143

Liste des abréviations

ADC	Analog to Digital Converter, convertisseur analogique-numérique
AERA	Auger Engineering Radio Array
AGASA	Akeno Giant Air Shower Array
AGN	Active Galactic Nucleus, noyau actif de galaxie
AIRES	AIR-shower Extended Simulation
AMIGA	Auger Muons and Infill for the Ground
ANTARES	Astronomy with a Neutrino Telescope and Abyss environmental RESearch
BLS	Ballon Launching Station
CEM	Compatibilité ElectroMagnétique
CERN	Organisation européenne pour la recherche nucléaire
CIC	Constant Intensity Cut
CLF	Central Laser Facility
CMB	Cosmic Microwave Background, fond diffus cosmologique
CODALEMA	COsmic ray Detection Array with Logarithmic ElectroMagnetic Antennas
CORSIKA	COsmic Ray SIMulations for KAscade
DAM	DecAmetric Array, Réseau Décamétrique de Nançay
DAPNIA	Département d'Astrophysique, de Physique des Particules, de physique Nucléaire et d'Instrumentation Associée, Saclay
DAQ	Data AcQuisition
DFT	Direct Fourier Transform
DGAC	Direction Générale de l'Aviation Civile
DLL	Delay Locked Loops
EASTOP	Extensive Air Shower, TOP of spectrum
EMBRACE	Electronic MultiBeam Radio Astronomy Concept
EPTA	European Pulsar Timing Array
FSU	Flux Solar Unity
GPS	Global Positioning System
HEAT	High Elevation Auger Telescopes
HESS	High Energy Stereoscopic System
HIRES	HIgh RESolution fly's eye
KASCADE	KARlsruhe Shower Core and Array DETector
LAL	Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire, Paris

LHC	Large Hadron Collider
LNA	Low Noise Amplifier, amplificateur à bas bruit
LOFAR	LOw Frequency ARray
LOPES	LOFAR Prototype Station
LPC	Linear Predictive Coding
LPSC	Laboratoire de Physique Subatomique et de Cosmologie, Grenoble
LSB	Least Significant Bit
LST	Local Sideral Time
LVDS	Low Voltage Differential Signaling, signalisation différentielle basse-tension
MATACQ	Analog MATrix for data ACQuisition
MGMR	Macroscopic model of GeoMagnetic-Radiation from air showers
Multiplicité	Nombre d'antennes ayant détecté un signal radio
NKG	Nishimura, Kamata, and Greisen
NRT	Nançay RadioTelescop
PM	PhotomultiPlicateur
PSD	Power Spectral Density
RAuger	Radio@Auger
RBW	Resolution BandwidtW
ReAIRES	Radio Emission AIRES
REAS	Radio Emission from Air Showers
RFI	Radio Frequency Interference, ensemble des rayonnements radio parasites
RH	RadioHéliographe de Nançay
RMS	Root Mean Square (racine carrée de la moyenne des carrés)
RT	RadioTélescope de Nançay
SA	Station Autonome
SD	Surface Detector
SDSS	Sloan Digital Sky Survey
SEIFAS	Simulation Electric Field Air Shower
SKA	Square Kilometre Array
SMA	SubMiniature version A
SUBATECH	laboratoire de physique SUBatomique et des TECHnologies associées, Nantes
Tag	Détection d'une impulsion par une antenne
TCP/IP	Transmission Control Protocol/Internet Protocol
Trigger	Déclenchement de l'acquisition
UB	Unified Board
VEM	Vertical Equivalent Muon
VME	Versa Module Eurocard Bus

Introduction

Durant plusieurs millénaires, l'observation du ciel par l'Homme, n'a pu se faire que dans le visible, longtemps avec ses propres yeux puis avec des moyens optiques de plus en plus évolués. Ce n'est que très récemment que le domaine d'observation a été étendu aux domaines radio infrarouge puis ultra-violet et finalement aux rayons X. A l'extrémité du spectre électromagnétique, l'observation des rayons γ est devenue le porte-drapeau de l'étude des astroparticules ou 'rayons cosmiques'. Elles sont étudiées par différentes expériences à travers le monde comme HESS en Namibie pour les γ , ANTARES pour les neutrinos et l'Observatoire Pierre Auger pour les particules chargées. Un siècle d'observation a notamment permis d'établir leur flux en énergie présentant une étonnante régularité sur 32 ordres de grandeurs en flux et 12 en énergie (Fig. 1). L'un des objectifs de l'étude de ces particules est d'identifier leurs sources de production et leurs éventuels mécanismes d'accélération.

Lorsqu'ils pénètrent dans l'atmosphère, les plus énergétiques des rayons cosmiques créent une large cascade de particules secondaires. D'une manière similaire à ce qui est réalisé, à des énergies inférieures, auprès d'accélérateurs géants comme le LHC au CERN, l'étude de cette cascade permet de remonter aux caractéristiques de la particule primaire. La détection dans le domaine radio de ces gerbes atmosphériques a été abordée pour la première fois au cours des années 1960 à 1970. Le signal radioélectrique, produit par les particules secondaires, possédait des atouts séduisants : une puissance reliée au nombre de particules de la gerbe et donc à l'énergie du primaire, une forme portant l'empreinte du développement longitudinal de la gerbe, et enfin une détection possible à grande distance. Avec le recul, la compacité, la simplicité de déploiement, et le coût raisonnable des détecteurs radio permettaient également d'envisager le déploiement sur de grandes échelles. Le cycle utile de la radiodétection semblait a priori très avantageux. Cependant, à l'époque, des résultats contradictoires bien que prometteurs, et l'essor de techniques concurrentes comme la fluorescence, ont poussé à l'abandon de cette méthode de détection inédite.

Au début des années 2000, un groupe de chercheurs de SUBATECH proposa de revisiter la technique de radiodétection des gerbes atmosphériques. L'expérience CODALEMA, initiée en 2001 à l'observatoire de radioastronomie de Nançay, a d'abord été un démonstrateur de la faisabilité de la technique de radiodétection des rayons cosmiques puis elle est devenue un véritable instrument d'analyse. Dans sa première phase, elle était constituée de quelques antennes log-périodiques et scintillateurs. Ses données ont permis d'accéder à certaines caractéristiques de la gerbe telles que sa direction d'arrivée et pour la première fois, événement par événement, au profil latéral du champ radio.

Modifiée en profondeur en 2005, l'expérience est aujourd'hui constituée de 24 antennes dipolaires plus compactes et plus adaptées à la radiodétection des gerbes, et de 13 nouveaux scintillateurs permet-

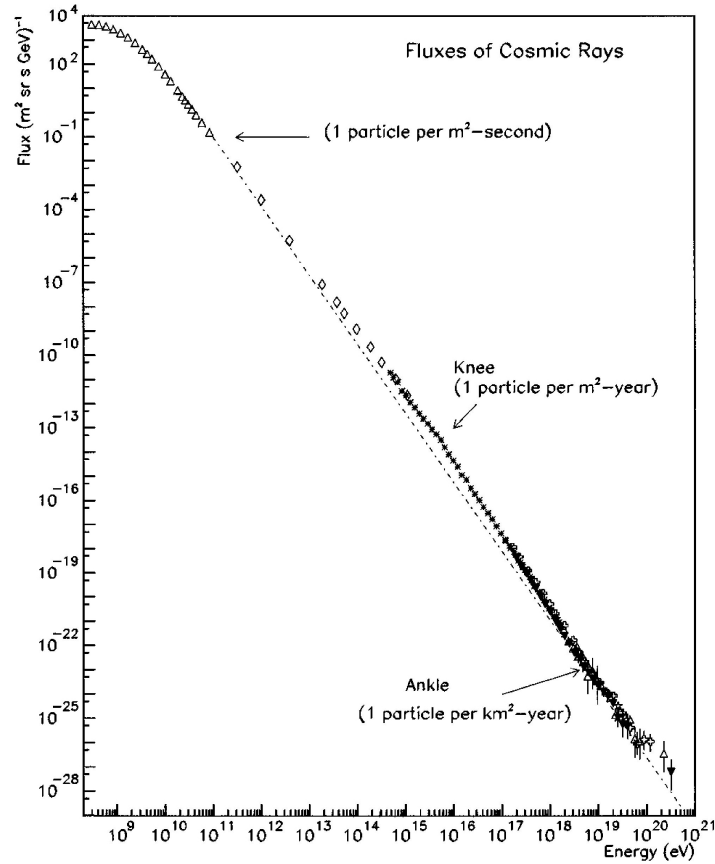


FIGURE 1 – Spectre du flux en fonction de l'énergie des rayons cosmiques au-delà du GeV. Figure tirée de [1].

tant de déduire l'énergie du primaire et la position du pied de gerbe. Ces nouvelles informations ont permis d'établir une première corrélation en énergie et de prouver sans ambiguïté, à travers la carte du ciel des directions d'arrivée, la prépondérance du champ magnétique terrestre dans le mécanisme de création de l'émission radio de la gerbe. Ainsi un modèle géomagnétique permet de reproduire, quantitativement et qualitativement les distributions angulaires de directions d'arrivée observées. Une partie du travail de cette thèse a porté sur l'analyse et l'interprétation des données de cette première expérience.

Le passage à de grandes surfaces de détection est une étape clé du développement de la technique. Elle permettra, à l'image de l'Observatoire Pierre Auger, d'étudier des rayons cosmiques d'ultra haute énergie. Les autonomies de déclenchement, de numérisation, d'alimentation et de communication deviennent alors des éléments cruciaux. Une expérience test de radiodétection autonome a été mise en place en 2005, sur le site d'Auger. Les premiers prototypes formés à partir de composants existants ont permis, dès 2007, les premières détections complètement autonomes de gerbes atmosphériques en radio. Une nouvelle génération de station autonome a en parallèle été développée puis installée, en 2010, sur les sites de Nançay et d'Auger. C'est sur la problématique de ce type de détection qu'a aussi porté ce travail de thèse.

Le premier chapitre de cette thèse rappellera après un rapide historique, la physique des rayons cosmiques et des gerbes atmosphériques associées. Les distributions latérale et longitudinale seront abordées, parallèlement aux deux techniques classiques de détection des gerbes atmosphériques. Dans une deuxième partie, la radiodétection sera présentée de manière historique avec un résumé des résultats des expériences pionnières. Les principaux modèles de simulation d'émission radio de la gerbe et leurs prédictions expérimentales termineront ce premier chapitre.

Le deuxième chapitre sera consacré à la présentation de l'Observatoire de Nançay et de l'expérience CODALEMA. D'une manière globale, la chaîne expérimentale sera décrite, du dipôle jusqu'à la carte d'acquisition. Une partie importante de ce chapitre présentera les antennes actives et les concepts associés de longueur effective, d'impédance d'antenne, et de fonction de transfert. Les procédés d'analyse des signaux seront également expliqués.

Le troisième chapitre abordera le sujet de la sensibilité, au sens large, de l'expérience CODALEMA. Les principaux résultats obtenus seront d'abord résumés. Afin de comprendre ou d'éliminer certaines causes possibles de distributions latérales anormales de champ radio, le suivi de qualité de l'expérience sera introduit. La sensibilité des antennes du réseau sera ensuite évaluée à travers des effets d'environnement tels que l'écrantage ou des interférences. Par la suite, les effets des cartes d'acquisitions sur les spectres en fréquence reconstruits seront largement abordés, ainsi que les solutions proposées et leur impact sur la variation mesurée du bruit galactique. Une corrélation en énergie avec une statistique élargie par rapport aux travaux précédents sera finalement réalisée.

Le quatrième chapitre sera dédié à la radiodétection autonome. Les résultats des prototypes de RAu-ger seront rapidement discutés. La nouvelle station autonome sera décrite et ses premiers résultats (tests CEM et coïncidences) seront présentés. Une campagne de détection autonome du réseau de CODALEMA permettra de réaliser une cartographie des émissions parasites dans l'Observatoire et au-dehors, et d'évaluer ainsi la résolution angulaire atteinte par le réseau. Les premiers pas vers une déconvolution de la réponse d'antenne, et plus généralement de l'ensemble de la chaîne expérimentale, sur les spectres et les formes d'ondes observés clôtureront ce manuscrit.

Chapitre 1

Des rayons cosmiques aux gerbes atmosphériques détectées en radio

1.1 Un rapide historique

Les rayons cosmiques sont des particules se propageant dans l'espace à des vitesses relativistes. Ils sont d'origines solaire, galactique ou extra-galactique. Certains atteignent le voisinage de la Terre et peuvent alors être détectés par différents moyens d'observations : satellites, ballons, détecteurs au sol, voire sous la terre la glace ou l'eau. Leur découverte et leurs premières observations ont eu lieu dans les années 1900. Les plus énergétiques de ces particules, chargées, pourraient être produites et accélérées par des noyaux actifs de galaxie (AGN).

- Dès la fin du 18^{ème} siècle, plusieurs scientifiques observèrent, sans le savoir, les manifestations des rayons cosmiques. Coulomb avec une sphère chargée et isolée, puis quelques dizaines d'années plus tard, Wilson avec une chambre à brouillard ainsi que Curie, Elster et Geitel, avec des électroscopes notèrent une décharge progressive de leur instrument. Quel agent ionisant du gaz de l'appareil était à l'origine de ce phénomène ? La principale cause évoquée était une radioactivité naturelle en provenance du sol, hypothèse appuyée par les travaux contemporains de Becquerel, et de Marie et Pierre Curie.
- Rutherford réalisa un blindage autour d'un électroscope. Le taux de décharge diminuait. Cela excluait que les parois des détecteurs soient les initiatrices du rayonnement.
- Des expériences au milieu de l'océan montrèrent que le taux d'ionisation demeurait détectable. Cela était déjà bien plus surprenant pour l'hypothèse d'une radioactivité naturelle, l'eau formant une épaisseur d'écran non négligeable.
- En 1909, le père jésuite T. Wulf, physicien amateur et constructeur d'électromètres de génie mesura le taux d'ionisation en bas ($6 \text{ ions/cm}^3/\text{s}$) puis en haut ($3.5 \text{ ions/cm}^3/\text{s}$) de la Tour Eiffel [2]. Si le taux diminuait bien avec l'altitude, il était 9 fois supérieur à la valeur prévue pour une hauteur de 300 mètres.

- Dans les mois et les années qui suivirent, Göckel, Hess [3], puis Kolhörster [4], effectuèrent de périlleux voyages en ballon (sans être périlleuse, la détection en ballon est également un projet de CODALEMA), pour mesurer la variation de ce rayonnement avec l'altitude (jusqu'à 9200 mètres). Diminuant jusqu'à une altitude de 700 mètres, le rayonnement augmente ensuite (Fig 1.1). Victor Hess conclut que l'hypothèse la plus naturelle à ces phénomènes est que le rayonnement vienne 'par-dessus'. Robert Milikan qualifia ce rayonnement de 'rayons cosmiques' et affirma qu'il s'agissait de rayons gammas de très haute énergie [5]. Compton proposa une autre vision selon laquelle les rayons cosmiques seraient des particules chargées.

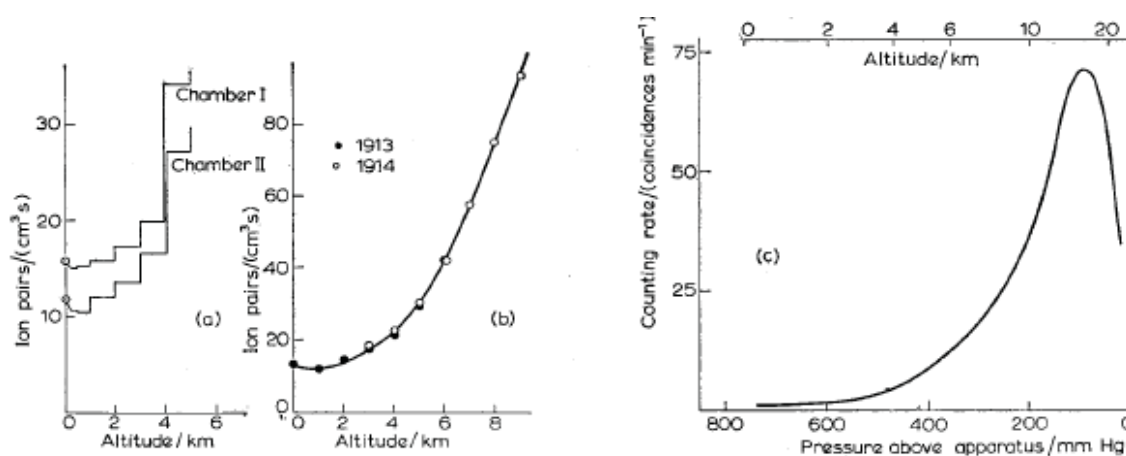


FIGURE 1.1 – Variation de l'ionisation en fonction de l'altitude. A gauche, Hess en 1912. Au centre, les vols compilés de Kolhörster, en 1913 et 1914. A droite, le vol de Pfitzer, à des altitudes atteignant jusqu'à 20 km.

- Un champ magnétique qui dévie les particules chargées était un bon outil pour valider l'une de ces deux hypothèses. Skobelzin, en 1927, observa que les rayons cosmiques étaient déviés par un champ magnétique, dans une chambre Wilson [6]. Le champ magnétique terrestre (lui aussi reviendra plus tard dans ce manuscrit) pouvait également modifier la trajectoire des particules chargées, voire complètement les dévier en fonction de l'énergie du rayon cosmique et de la valeur du champ. Des mesures de taux d'arrivée des rayons cosmiques à plusieurs endroits de la Terre, avec des champs magnétiques locaux différents furent réalisées. Des résultats contradictoires ont d'abord été trouvés. James Clay observa une chute de 14% de l'ionisation entre une latitude de 45° et l'équateur [7], résultats confirmés par Auger et Leprince-Ringuet [8] (Fig 1.2), mais contradictoires de ceux de Milikan, et Bothe. Compton réalisa la première expérience de physique à l'échelle mondiale. Les 69 stations de l'expérience dispersées sur l'ensemble du globe mesurèrent des taux d'ionisation corrélés à l'intensité du champ magnétique terrestre [9].

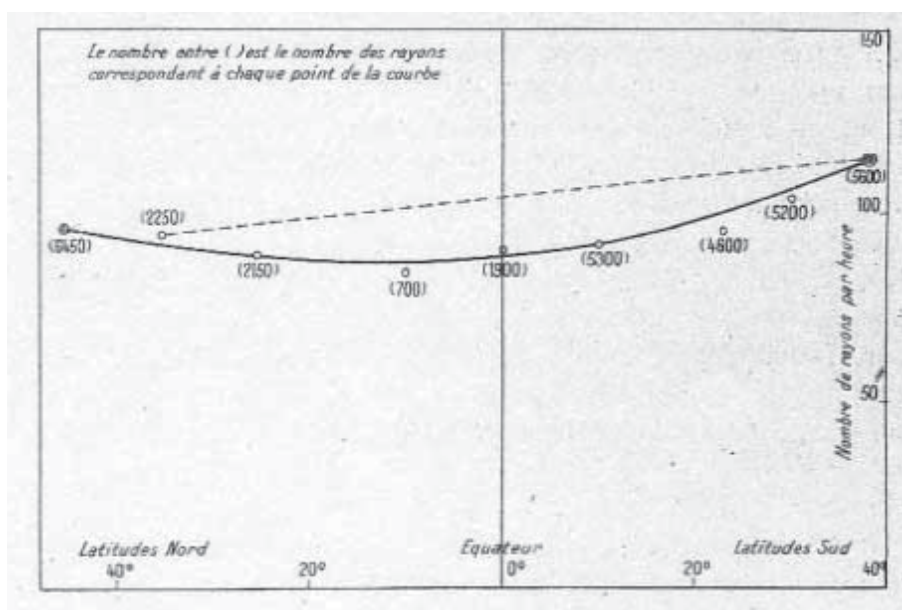


FIGURE 1.2 – Compilation des données collectées par Pierre Auger et Louis Leprince-Ringuet pendant leur traversée en paquebot entre Hambourg et Buenos Aires.

1.2 Les gerbes atmosphériques

1.2.1 Les propriétés et les caractéristiques de la gerbe

C'est en 1938 que Pierre Auger découvrit le phénomène des gerbes atmosphériques [10]. Des compteurs Geiger éloignés de 1 à 70 m mesuraient des taux d'ionisation diminuant avec la distance mais avec un taux de fortuits toujours trop élevé. Ces résultats en rappelaient d'autres, notamment le taux de comptage des décharges observées à ultra-haute altitude des rayons cosmiques obtenus par Pfitzer. Au-delà de 15 km, le nombre d'événements détectés diminue (Fig 1.1). Avec une simple épaisseur de plomb variable, Rossi obtenait des résultats similaires, c'est-à-dire un nombre de décharges augmentant (correspondant à des altitudes allant de 20 à 15 km), puis diminuant (15 km jusqu'au niveau de la mer) avec l'épaisseur [11]. Pierre Auger émit alors l'hypothèse que les particules détectées au sol n'étaient que les particules secondaires d'une particule primaire d'énergie exceptionnelle, interagissant de manière inélastique avec les hautes couches de l'atmosphère. Une cascade de particules se forme alors (Fig. 1.3). L'atmosphère agit finalement comme un gigantesque calorimètre. De ce point de vue, la planète Terre est un détecteur de particules de l'immense accélérateur qu'est l'Univers. C'est également Pierre Auger qui observa la décroissance du spectre de la distribution en énergie des rayons cosmiques. C'est à partir de cette époque que la physique des particules a fortement progressé, grâce à l'observation et l'identification des rayons cosmiques (positron, muon, pion) puis via les accélérateurs.

Depuis cette époque pionnière, la compréhension de la gerbe a beaucoup progressé. L'image actuelle permet de séparer la gerbe en trois composantes. Les distances de propagation des gerbes sont le plus souvent exprimées en g.cm^{-2} , homogène à une densité (de l'air pour le cas de la propagation des gerbes dans l'atmosphère), multipliée par une longueur. La profondeur totale d'atmosphère traversée par une

gerbe verticale atteignant le sol est d'environ 1000g.cm^{-2} , équivalent à 'une épaisseur d'atmosphère'. Le schéma suivant est valable pour des énergies supérieures à 10^{14} eV.

- La composante hadronique est la première à se peupler. Elle est formée des hadrons, nucléons et fragments nucléaires résultant de la première interaction. Elle se propage sur quelques dixièmes d'épaisseur d'atmosphère et n'atteint donc pas le sol.
- La composante muonique est alimentée par la décroissance des pions chargés issus de la composante hadronique. C'est la partie de la gerbe qui va se propager sur les plus grandes distances, et durer le plus longtemps, avec quelques émissions de photons ou de décroissances en électrons.
- La composante électromagnétique est celle portant la plus grande partie de l'énergie de la gerbe. Elle se propage sur un peu plus d'une épaisseur d'atmosphère et est donc détectable au sol. Elle résulte de la production des paires d'électron-positron par les photons. Par Bremsstrahlung, ces particules chargées produisent à leur tour des photons qui vont créer à nouveau des paires e/e- auto-alimentant cette dernière composante.

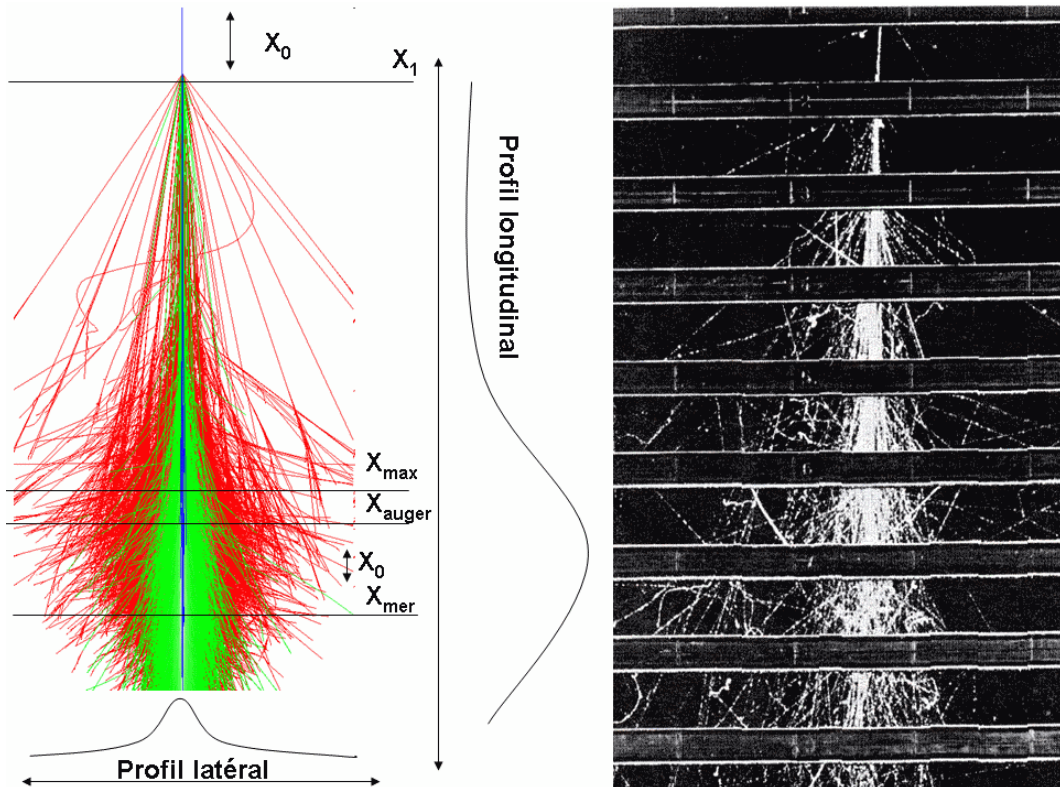


FIGURE 1.3 – A gauche, une gerbe simulée par CORSIKA. En bleu la composante hadronique, en rouge la composante électromagnétique, en vert la composante muonique. A titre d'illustration et de définitions, X_0 , X_1 , X_{max} , X_{auger} , X_{mer} , sont indiquées. A droite, développement d'une cascade de particules dans des chambres à brouillard, séparées par des couches de plomb.

La mesure individuelle de toutes les particules de la gerbe dont la durée de développement est de l'ordre de quelques μs est impossible. Ce sont les distributions globales, à savoir le profil longitudinal et le profil latéral, qui vont nous renseigner sur les propriétés du primaire.

Les modèles de Heitler et GIL

Un modèle simplifié permet de retrouver certaines grandeurs de la gerbe : le modèle de Heitler ([12], [13]). Il est à la base d'autres modèles plus élaborées qui reproduisent de manière satisfaisante les résultats de simulations que nous introduirons plus tard.

Le modèle de Heitler décrit le développement de la composante électromagnétique de la gerbe. Il considère les créations de paires e^+e^- et le rayonnement Bremsstrahlung, comme des étapes intermédiaires du développement de la gerbe. Le nombre N_e de particules de la composante électromagnétique (photons et électrons) varie comme 2^N avec N le nombre d'étapes. Ce nombre d'étapes étant proportionnel à l'épaisseur d'atmosphère traversée X , et inversement proportionnel à la longueur de radiation $X_0=37\text{g.cm}^{-2}$, on obtient $N_e = 2^{X/X_0}$. Ces particules ont donc une énergie individuelle de $E_e = \frac{E_p}{2^{X/X_0}}$. La composante électromagnétique arrête de s'auto-alimenter lorsque l'énergie E_e devient inférieure à $E_c = 80\text{ MeV}$ l'énergie critique de production de paires et de Bremsstrahlung. Le nombre de particules a alors atteint son maximum, proportionnel à l'énergie du primaire. Il vaut :

$$N_{max} = \frac{E_p}{E_c} \quad (1.1)$$

Ainsi, on trouve dans cette approximation qu'une gerbe de 10^{19} eV aura un N_{max} de 10^{11} particules. La profondeur d'atmosphère X traversée au maximum de développement de la gerbe X_{max} varie également avec l'énergie :

$$X_{max} = X_0 \cdot \ln\left(\frac{E}{E_c}\right) \quad (1.2)$$

Plus la gerbe est énergétique, plus le X_{max} sera proche du sol. Une étude plus complète tenant compte de l'âge de la gerbe et permettant d'explorer des stades de développement au-delà du X_{max} , a été réalisée par K. Greisen ([14] et [15]). J. Linsley l'a complétée dans le cadre de la paramétrisation de GIL (pour Greisen-Ilina-Linsley) [16]. Dans ce modèle raffiné, l'expression du nombre d'électrons est la suivante :

$$N_e = \frac{E_p}{1.45\text{GeV}} e^{t-t_{max}-2t \cdot \ln(s)} \quad (1.3)$$

- t est l'épaisseur d'atmosphère traversée depuis la première interaction X_1 , normalisée à la longueur d'interaction X_0 , soit $t = \frac{X-X_1}{X_0}$
- $t_{max} = (1.7 + 0.76 \cdot \ln \frac{E}{E_c} - \ln A) = \frac{X_{max}-X_1}{X_0}$, avec A la masse du primaire.
- $s = \frac{2t}{t+t_{max}}$, retranscrit l'âge de la gerbe.

Dans ce second modèle, le nombre de particules de la gerbe N_e reste donc proportionnel à l'énergie E_p du primaire. L'expression du t_{max} nous indique que plus la masse du primaire est importante, plus le t_{max} et donc le X_{max} seront faibles. En d'autres termes, la gerbe se développera plus tôt dans l'atmosphère,

et son maximum sera atteint plus haut en altitude. La position du premier point d'interaction dépend de la masse du primaire mais, pour un même primaire, elle varie également d'une gerbe à l'autre. C'est à ce niveau que les 'fluctuations gerbe à gerbe' interviennent principalement. Elles vont se répercuter sur l'ensemble du développement de la gerbe, et causer notamment des variations de l'ordre de 20% dans le nombre de particules au sol. La nature de la particule n'est donc déductible qu'avec un grand nombre de mesures du X_{max} . Pour une énergie de 10^{19} eV, le modèle de Heitler donne un $N_{max} = \frac{10^{19}}{E_c} \cdot 0.66$ soit un peu moins de 10^{11} électrons/positrons contre un peu moins de 10^{10} obtenues par les simulations et la paramétrisation de GIL (Fig. 1.4).

Les simulations Monte-Carlo

Des programmes Monte-Carlo peuvent être utilisés pour une description encore plus précise de la gerbe. Les particules sont simulées individuellement, un tirage aléatoire reproduisant les différentes interactions auxquelles elles peuvent être soumises. Deux principaux programmes Monte-Carlo de simulation de gerbe existent : AIRES pour AIR-shower Extended Simulation [17] et CORSIKA pour COsmic Ray Simulations for KAScade [18], sur lesquels, on le verra, s'appuient certains modèles de simulation d'émission radio. CORSIKA et AIRES montrent des résultats similaires. Leurs quelques différences résident dans les modèles hadroniques utilisés à très haute énergie, extrapolés car pour le moment jamais sondés par les accélérateurs. Elles ont été en partie réduites durant ces dix dernières années[19].

La paramétrisation de GIL reste cependant une très bonne approximation jusqu'au changement de composante [16]. Pour les gerbes peu énergétiques ou inclinées (60° pour une gerbe à 10^{16}), le changement de composante entre électromagnétique et muonique est visible avant que la gerbe atteigne le sol¹. Les gerbes verticales d'énergie supérieures à 10^{15} sont toujours dominées par la composante électromagnétique.

La distribution NKG

Les distributions Monte-Carlo CORSIKA ou AIRES permettent de simuler le développement de la gerbe et donc la distribution au sol des particules (Fig. 1.5) : la distribution des électrons est dominante sur celle des muons jusqu'à une très grande distance de l'axe (800 mètres pour une gerbe verticale à 10^{15} eV, 2000 m pour une gerbe verticale à 10^{20} eV).

Une paramétrisation de la distribution latérale a été effectuée par Nishimura, Kamata et Greisen ([22] et [14]). Légèrement modifiée² pour l'analyse des données de CODALEMA, elle donne :

$$NKG(r) = \rho(r) = N_e \frac{c(s)}{r_0^2} \left(\frac{r_0}{r}\right)^{s-2} \left(1 + \frac{r}{r_0}\right)^{s-4.5} \quad (1.4)$$

$$\text{avec } c(s) = 0.366s^2(2.07 - s)^{1.25}$$

¹Dans le cadre de CODALEMA, la paramétrisation de GIL a été un temps utilisée pour obtenir une estimation de l'énergie. Pour les gerbes âgées (très inclinées ou peu énergétiques), cette grandeur était donc faussée.

²la formule initiale peut être trouvée dans les deux renvois bibliographiques

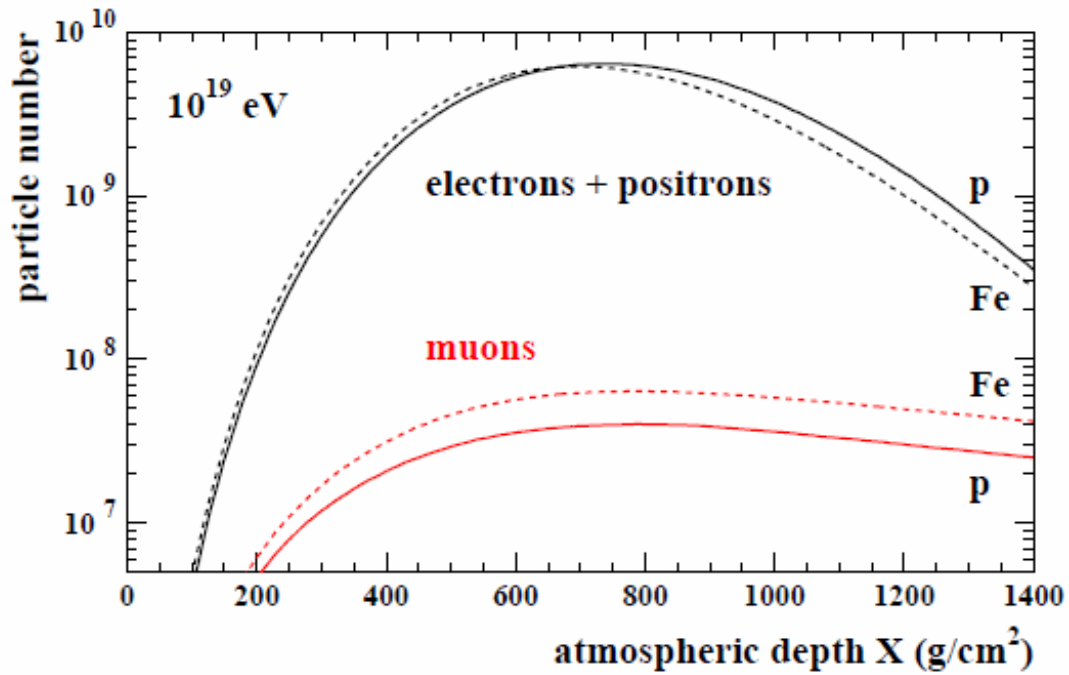


FIGURE 1.4 – Développements longitudinaux de gerbes obtenus par simulations : contribution des parties muoniques et électroniques pour des primaires proton, et noyau de fer. La composante muonique ne deviendra dominante que pour des profondeurs d’atmosphère supérieures. Figure tirée de [20].

$$\text{et } s = \frac{3t}{t + 2t_{\max}}$$

N_e est le nombre d’électrons-positrons. ρ est la densité d’atmosphère. α la constante de structure fine. La valeur r_0 , rayon de Molière correspond à la dispersion latérale de la gerbe. Au niveau de la mer, elle vaut 80 mètres. s est une nouvelle expression de l’âge de la gerbe.

Cette distribution ne concerne que les électrons et les positrons. Comme nous venons de le voir, la partie muonique n’est dominante qu’à grande distance et/ou pour des gerbes inclinées ou peu énergétiques. Pour des détecteurs relativement petits travaillant à 10^{16} eV comme CODALEMA, cette approximation est donc justifiée. 90% de l’énergie est contenue dans une distance r_0 de l’axe de la gerbe, 99% à $3 r_0$. Des exemples de distributions NKG ajustées sur les données sont présentés dans la figure 1.6.

1.2.2 Les principales techniques de détection

Avant de présenter la technique de la radiodétection, nous allons expliquer les deux principales techniques de détection des gerbes atmosphériques que sont la fluorescence et la détection au sol des particules.

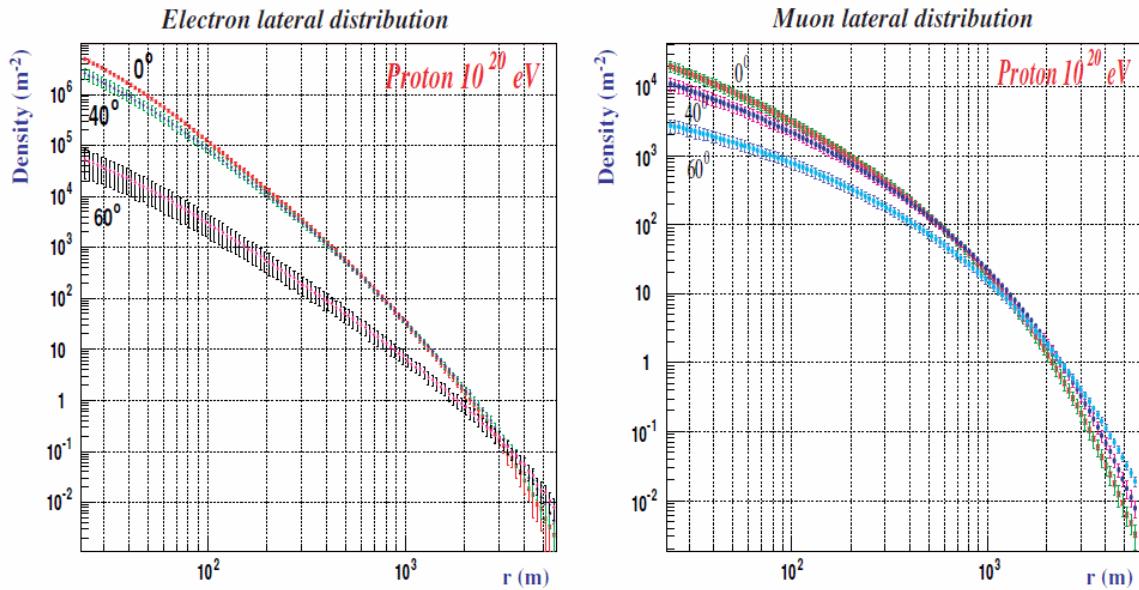


FIGURE 1.5 – Développements latéraux de deux gerbes à 10^{20} eV. A gauche, la distribution des électrons, à droite, la distribution des muons. La distribution des électrons est plus ramassée, et dominante jusqu'à 3000 mètres pour cette gamme d'énergie. Figure tirée de [21]

La fluorescence

La détection d'une partie du profil longitudinal permet notamment de mesurer directement le X_{max} et le N_{max} , reliés à la nature et à l'énergie du primaire. C'est le cas de la fluorescence, principale technique de détection des profils longitudinaux. Une lumière de fluorescence est émise dans l'ultra-violet par les molécules de diazote qui se dés excitent après le passage des particules ionisantes de la gerbe. Intégrée, l'émission résultante est de quelques watts, soit la puissance d'une ampoule émettant dans l'ultra-violet et traversant l'atmosphère en quelques dizaines de micro-secondes. Plusieurs capteurs en coïncidence permettent de contraindre la distance à la gerbe, puis de remonter à ses caractéristiques. L'émission étant calorimétrique, la puissance reçue est directement proportionnelle à l'énergie du primaire. Son acceptance en volume d'atmosphère (Fig. 1.7) est largement supérieure à celle d'un détecteur au sol.

La fluorescence possède un certain nombre de limites. Son cycle utile est bas, de l'ordre de 10% dans les meilleures conditions. Limitée aux nuits sans lune, le ciel doit également être complètement dégagé. L'analyse et la correction des effets d'atmosphères sont également complexes, mais primordiales. La diffusion de Rayleigh sur les molécules d'air et la diffusion de Mie sur les aérosols doivent être constamment mesurées. Des faisceaux lasers sont par exemple utilisés pour sonder les propriétés de l'atmosphère sur le site d'Auger [23]. Le rendement de la fluorescence, également fortement impacté par la température et la pression, doit également être pris en compte. Il est donc nécessaire de réaliser un suivi permanent des propriétés de l'atmosphère.

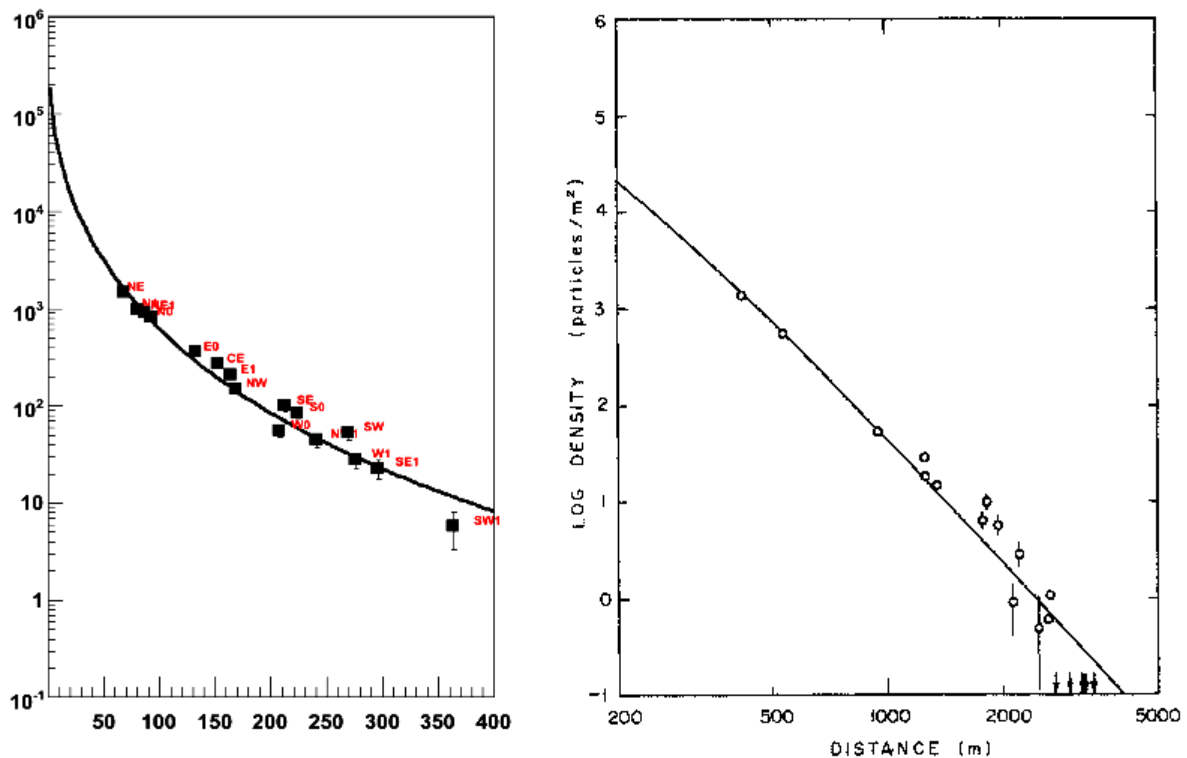


FIGURE 1.6 – A gauche, exemple de distribution NKG ajustée pour un évènement mesuré à 10^{18} eV, par les scintillateurs à CODALEMA. A droite, distribution NKG ajustée pour un des évènements les plus énergétiques jamais mesurés, sur le site de Volcano Ranch, au Nouveau-Mexique. L'énergie déduite de l'ajustement est supérieure à 10^{20} eV.

Le détecteur au sol

La distribution latérale que nous avons introduite nous permet de voir que son extension va croître avec l'énergie. Elle va dépasser la centaine de mètres pour une gerbe de 10^{16} eV, typiquement détectée à CODALEMA pour atteindre plusieurs km de diamètre pour des gerbes d'énergie plus importante de l'ordre de 10^{19} eV. Sur de telles surfaces, il est impossible de mesurer l'ensemble des particules au sol. Le détecteur échantillonne la distribution de particules au sol avec une surface et un maillage correspondant aux énergies recherchées.

- Une énergie élevée permet un maillage plus grand des détecteurs. De quelques dizaines de mètres dans le cas de CODALEMA, pour une expérience à 10^{16} - 10^{17} eV, on passe à 1.6 km pour le réseau de cuves Cerenkov de Auger et un seuil de détection à 10^{18} eV.
- Les gerbes d'énergie élevées étant d'autant plus rares, il est important que la taille du réseau soit compatible avec un taux de comptage raisonnable. C'est la raison pour laquelle le détecteur Auger, s'étale sur 3000 km² soit la superficie d'un petit département français.

Le type de détecteur utilisé a également son importance :

- Un scintillateur est sensible à toutes les particules chargées : électrons, positrons et muons.
- Un scintillateur blindé ou enterré sera principalement sensible aux muons. L'épaisseur de blindage fixe l'énergie minimale des muons à détecter.
- Des cuves Cerenkov permettent de détecter les deux composantes muonique et électromagnétique (notamment les photons, par créations de paires). Ce détecteur en volume possède un autre avantage par rapport à un détecteur plat (type scintillateur). Il permet d'éviter l'effet d'acceptance : en effet, en première approximation la surface apparente d'une cuve est toujours la même quel que soit l'angle de visée . C'est loin d'être le cas pour un détecteur avec une faible épaisseur.

La reconstruction des caractéristiques de la gerbe présentée dans la figure 1.7 se fait de la manière suivante : la direction d'arrivée est obtenue par triangulation avec les temps d'arrivée dans chacun des détecteurs touchés. L'énergie de la gerbe est déduite des densités de particules enregistrées par les détecteurs (à partir, par exemple, de la paramétrisation NKG). Cependant, cette densité est fortement dépendante de la position de première interaction. A énergie et angle d'arrivée égaux, la fluctuation du nombre de particules au sol gerbe à gerbe et donc de l'énergie reconstruite atteint 20%. La calibration absolue entre le nombre de particules détectées et l'énergie peut passer par l'utilisation de simulations ou la comparaison à un second détecteur. Le rapport et la répartition des différentes composantes permet théoriquement de remonter à la nature de la gerbe. De même, contrairement à la fluorescence, la gerbe doit directement 'tomber' sur les détecteurs pour être vue. L'avantage de cette méthode de détection sur la fluorescence est qu'elle possède un cycle utile très élevé.

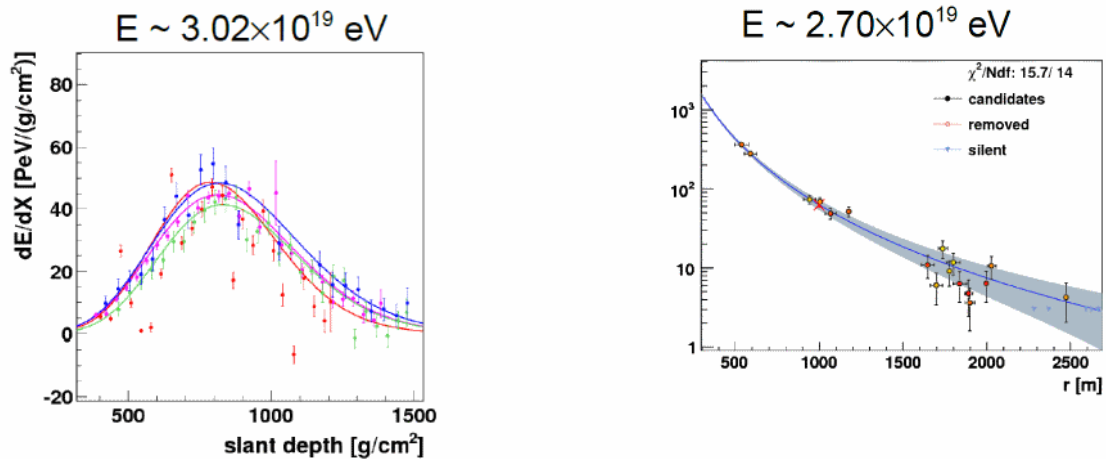


FIGURE 1.7 – Exemple de reconstructions longitudinale et latérale d'une même gerbe avec deux détecteurs à Auger. A gauche, exemple de reconstruction en fluorescence. A droite, reconstruction au sol. Figure tirée de [24].

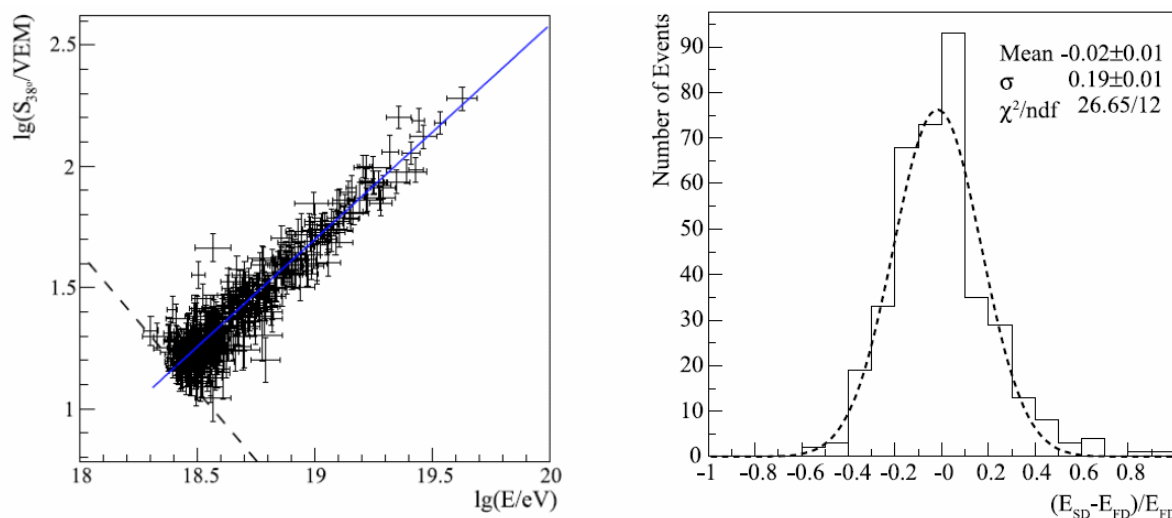


FIGURE 1.8 – Corrélation entre le signal reçu par les cuves et l'énergie déduite des télescopes de fluorescence pour l'expérience Pierre Auger. La ligne pleine indique la meilleure corrélation. Seuls les points au-dessus de la ligne en pointillé sont conservés pour l'ajustement afin de ne pas biaiser l'ajustement. Figure tirée de [25]

1.2.3 Un aperçu historique des expériences

Ces deux techniques de détection ont beaucoup évolué depuis leur première mise en œuvre. Voici une liste non exhaustive des expériences de détection des rayons cosmiques utilisant ces techniques :

- Volcano Ranch [26], au Nouveau Mexique fut la première expérience à enregistrer un rayon cosmique avec une énergie supérieure à 10^{20} eV (Fig. 1.6). Fonctionnant entre les années 1960 et 1980, l'expérience s'appuyait sur une vingtaine de scintillateurs. En 1976, un groupe de physiciens détecte la première gerbe atmosphérique par fluorescence sur ce même site [27].
- Haverah Park [28], près de Leeds en Grande Bretagne, fut utilisée par H. R. Allan pour mener les premières études de radiodétection entre 1968 et 1987. L'expérience utilisait une trentaine de cuves Cerenkov.
- Beaucoup plus récemment, AGASA ([29]), au Japon, de 1990 à 2001 s'étendait sur une surface de 100 km^2 . 111 scintillateurs et 27 compteurs de muons formaient le plus grand détecteur de rayons cosmiques de l'époque. L'évènement le plus puissant enregistré dépassait également les 10^{20} eV.
- HiRes [30] a prouvé la maturité de la détection par fluorescence. De manière analogue à AGASA, elle mesure le spectre des rayons cosmiques à très haute énergie. C'est cette expérience basée aux Etats-Unis qui a enregistré le rayon cosmique le plus énergétique jamais détecté à 3×10^{20} eV, soit 48 J [31].
- Aujourd'hui, le Telescope Array [32], aux Etats-Unis, est une expérience concurrente de l'Observatoire Pierre Auger. Elle est constituée de 3 télescopes à fluorescence et de 700 km^2 de scintillateurs.

- Kascade [33] est un détecteur de particules au sol, installé en Allemagne, pour des énergies plus basses comprises entre 10^{15} et 10^{18} eV afin de sonder une partie inédite du spectre de distribution en énergie, le genou, à la signification physique encore incertaine (changement de source, déconfinement des rayons cosmiques, ...). Son réseau s'étend sur 0.5 km^2 et sert également de trigger de référence pour l'expérience de radiodétection LOPES [34].

1.2.4 De la controverse au détecteur géant Pierre Auger

Il y a quelques années, les deux principales expériences dédiées à l'étude du spectre à haute énergie ont montré des résultats contradictoires. AGASA ne semblait pas voir de coupure dans le spectre à haute énergie [29] au contraire d'Hires [30]. Cette coupure appelée GZK (pour Greisen [35]-Zatsepin-Kuzmin [36]), est causée par l'interaction des rayons cosmiques sur le rayonnement diffus cosmologique ou CMB pour Cosmic Microwave Background ([37], [38]). Bien que très peu énergétique (2.7 K), ces photons peuvent interagir avec les rayons cosmiques d'énergie supérieure à 5×10^{19} eV, car ils possèdent, dans leur référentiel, une énergie suffisante (plus de 200 MeV) pour réaliser une photoproduction de pions. La présence ou non de la coupure GZK présente un intérêt primordial :

- Si la coupure GZK était observée, cela signifierait que les rayons cosmiques d'une telle énergie parcourent des distances suffisamment grandes pour être atténués par le CMB, et auraient donc une origine extra-galactique. L'accélération des rayons cosmiques réalisée par des mécanismes de Fermi [39] est possible pour un certain nombre d'objets astrophysiques. Les chocs frontaux dans des champs magnétisés d'intensités différentes accélèrent peu à peu la particule (les collisions frontales sont plus fréquentes que les collisions fuyantes) jusqu'à l'éjection de la particule par l'objet quand elle dépasse la vitesse d'échappement. La taille et le champ magnétique des sites accélérateurs permettent de déterminer les candidats à l'émission des rayons cosmiques de si haute énergie. Ces objets, dont font partie les noyaux actifs de galaxie (AGN), sont répertoriés dans le diagramme de Hillas (Fig. 1.9).
- Si une telle coupure n'était pas visible, il faudrait rechercher une source des rayons cosmiques dans notre amas galactique local. Cependant, cette zone est bien connue des astronomes et ne possède pas les objets astrophysiques capables d'accélérer suffisamment les rayons cosmiques. Des théories alternatives dites, top-down, permettent d'expliquer l'absence de coupure GZK : des particules supermassives pourraient se désintégrer en un large spectre de particules d'énergie supérieure à 5×10^{19} eV.

En 1999, la construction du plus grand détecteur de gerbes atmosphériques, l'Observatoire Pierre Auger, a débuté en Argentine. Les premières observations ont vu le jour en 2004, et les premiers résultats furent publiés en 2007. L'expérience utilise les deux techniques que nous venons d'introduire : 4 télescopes à fluorescence permettant de mesurer le profil longitudinal de la gerbe et un détecteur de surface de 1600 détecteurs Cerenkov, répartis sur une surface de 3000 km^2 donnent accès au profil latéral au niveau du sol. La calibration absolue en énergie du détecteur au sol est réalisée grâce aux télescopes à fluorescence (Fig. 1.8). Les télescopes se composent de 6 baies couvrant au total 180° d'angle azimutal. Les baies sont composées d'un miroir et d'une caméra de 440 phototubes. Les caméras pointent

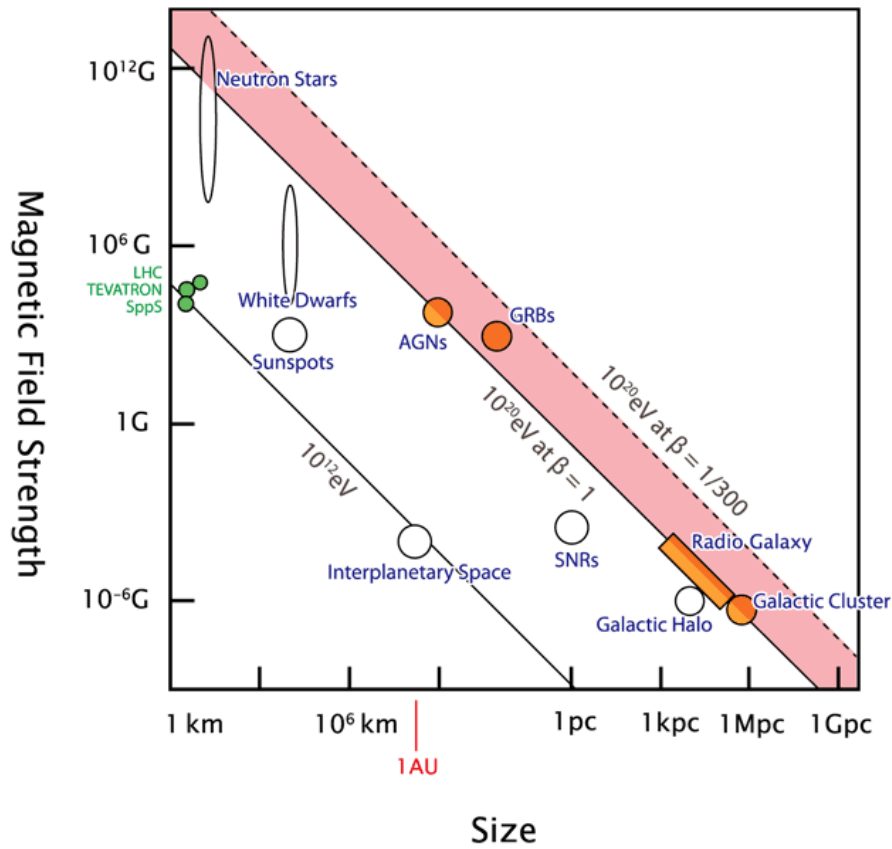


FIGURE 1.9 – Diagramme de Hillas. Intensité du champ magnétique en fonction de la taille de différents objets astrophysiques. Ceux placés dans et au delà de la zone rose sont les candidats à l'accélération de particules à des énergies supérieures à la coupure GZK. β est la vitesse d'échappement de l'objet astrophysique. Figure tirée de [40].

3° au-dessus de l'horizon. Les détecteurs Cerenkov sont formés de cuves de 12m^3 d'eau. Le maillage triangulaire entre les cuves est de l'ordre de 1.5 km , et donne une énergie seuil de détection du réseau de l'ordre de 10^{18} eV . La partie supérieure de la cuve est équipée de trois PM, digitalisés à 40 MS/s . Le niveau de trigger T2 est déclenché lorsque le signal dépasse un certain seuil. Le trigger T3 est déclenché lorsqu'il y a compacité (en espace et en temps) des triggers T2. Environ trois événements sont ainsi enregistrés chaque minute, dont une gerbe au-dessus des $3 \times 10^{17}\text{ eV}$.

Si l'expérience était initialement prévue pour obtenir un maximum d'informations sur les rayons cosmiques au delà de 10^{19} eV (origine, nature), une nouvelle motivation physique est apparue à la vue des résultats contradictoires obtenus par AGASA et Hires, à propos de la coupure GZK. En 2010, trois principales conclusions peuvent être tirées des résultats d'Auger :

- La coupure GZK semble être observée [41] en accord avec les données d'Hires (Fig. 1.10)
- La masse des rayons cosmiques semble croître avec l'énergie [41]. Au delà de 10^{19} eV , les rayons

cosmiques semblent majoritairement être de type noyau de Fer (Fig. 1.11).

- Les directions d'arrivée montrent une anisotropie à plus de 99%. Lors d'une première période, de 2006 à 2007, les directions d'arrivée étaient très corrélées à des noyaux actifs de galaxie [42]. Cette corrélation est aujourd'hui moins marquée [43], même si les AGN restent les candidats les plus probables de lieux d'accélération des rayons cosmiques.

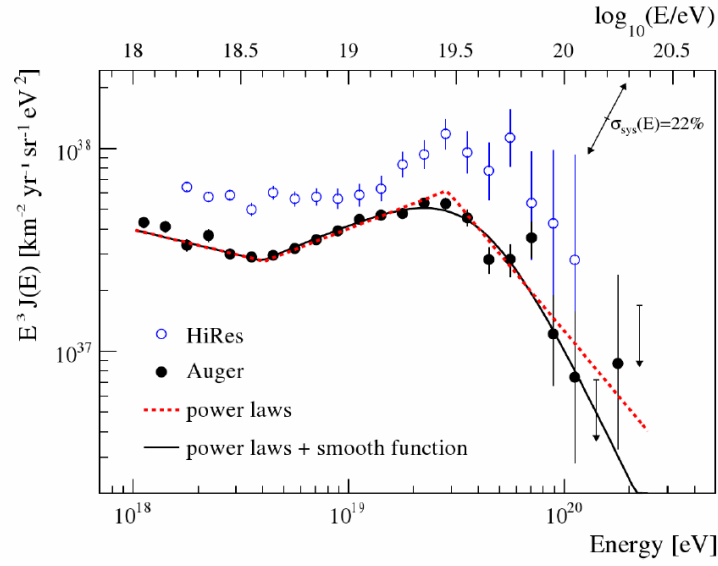


FIGURE 1.10 – Spectre en énergie reconstruit de manière hybride avec le détecteur Pierre Auger. Au-dessus, le spectre mesuré par Hires. La coupure GZK apparaît nettement. Figure tirée de [41]

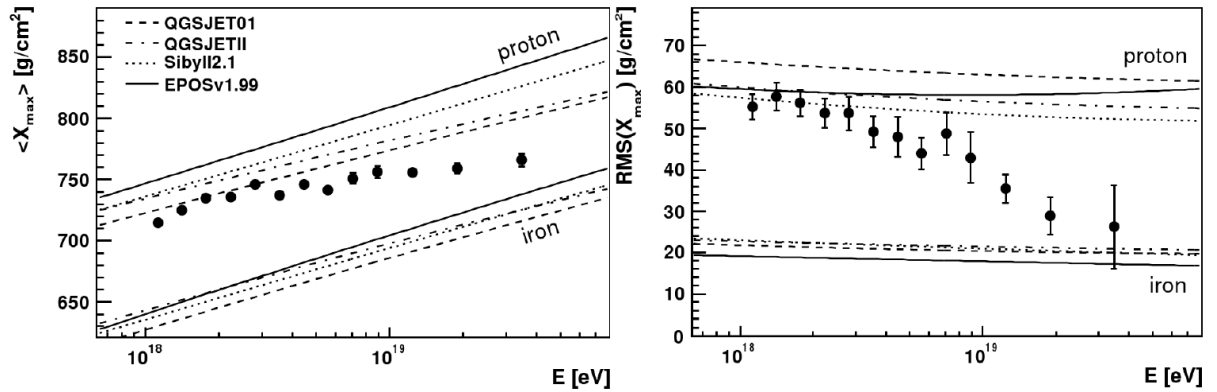


FIGURE 1.11 – A gauche (respectivement droite), X_{max} ($RMS(X_{max})$) en fonction de l'énergie. En lignes pleines et en pointillé X_{max} ($RMS(X_{max})$) attendu pour un primaire de type proton ou noyau de fer selon différents modèles hadroniques. Plus l'énergie est grande, plus le primaire typique semble s'alourdir. Figure tirée de [44]

1.3 La radiodétection

La radiodétection des rayons cosmiques est née dans les années 50, de la détection de la lumière Cerenkov créée par les gerbes atmosphériques, par J. Jelley [45]. Cette technique se heurtait aux mêmes difficultés que la fluorescence : un cycle utile faible, limité aux nuits sans lune. J. Jelley envisagea de mesurer le rayonnement Cerenkov radio, avec un cycle utile bien plus élevé. Malheureusement, les conclusions de ses premiers calculs furent assez pessimistes, comme nous allons l'expliquer maintenant.

1.3.1 De la cohérence à l'énergie

L'énergie associée au rayonnement Cerenkov est proportionnelle à la fréquence : $E \propto \nu d\nu$. Un rapide calcul montre que le facteur entre une observation dans le visible et dans la radio (facteur 10^{-7} sur la fréquence ν , mais aussi sur la largeur de la bande de fréquence $d\nu$) est de 10^{-14} , facteur largement pénalisant pour une radiodétection des rayons cosmiques. L'émission cohérente du rayonnement au delà de quelques longueurs d'ondes doit être prise en compte. Les émissions s'ajoutent de manière systématique, mais dans le cas où la gerbe génère un même nombre d'électrons et de positrons, les amplitudes sont en opposition de phase. L'émission radio totale devient nulle.

En 1962, Askaryan remet en cause ces résultats suggérant que la gerbe atmosphérique contenait plus d'électrons que de positrons [46]. Cet excès de charge est principalement dû à la création d'électrons par diffusion Compton. La cohérence du rayonnement devient alors un atout : la puissance émise est proportionnelle au carré de l'excès de charge (rayonnement cohérent appliqué à l'excès de charge). La radiodétection Cerenkov d'une gerbe atmosphérique était donc théoriquement possible. La première expérience de radiodétection fut réalisée par Jelley à Jodrell Bank en 1965 [47]. Plusieurs impulsions radios associées au passage d'une gerbe détectée par des compteurs Geiger, déclenchant 72 antennes accordées à 44 MHz furent enregistrées.

Dans le cas d'un rayonnement Cerenkov, l'amplitude du transitoire radio devait se montrer proportionnelle au nombre de particules de l'excès de charge (rayonnement cohérent) ou à la racine de ce nombre (rayonnement incohérent). Les expériences de l'époque ont trouvé à ce propos des résultats contradictoires variant entre $V \propto \sqrt{E}$ et $V \propto E^2$. L'analyse proposée par Allan dans [48] est la suivante : deux effets entrent en compte et modifient la relation linéaire initiale qu'il pourrait y avoir entre le champ mesuré et le nombre de particules de la gerbe et donc l'énergie du primaire (rayonnement cohérent et distance au maximum de développement de la gerbe constant). D'un côté, le degré d'incohérence a tendance à ramener la relation vers $V \propto \sqrt{E}$. De l'autre, le développement du maximum de la gerbe a lieu plus tard dans l'atmosphère et donc à plus faible distance du détecteur et V croît plus rapidement que l'énergie. Les deux effets peuvent s'annuler pour donner une relation finalement linéaire entre les deux valeurs. L'expérience de radiodétection de Chacaltaya trouva une amplitude de variation en $V \propto \sqrt{E}$ [49], peut-être accentuée par une altitude très haute de l'expérience, et un développement de la gerbe d'autant plus tardif voire postérieur à l'altitude du détecteur. Les antennes ne voyant qu'une partie du développement de la gerbe, elles n'enregistrent qu'une fraction de l'émission radio associée. Une expérience à Moscou [50] mesura une variation beaucoup plus rapide du champ électrique en fonction de l'énergie du primaire. Plus l'énergie du rayon cosmique est grande, plus la gerbe est peuplée, et plus elle émet de champ électrique, mais à une distance d'autant plus proche que le X_{max} augmente avec l'éner-

gie. Dans une première étude, V était proportionnelle à E^2 . Par la suite, les résultats de l'expérience ont indiqué une relation en $V \propto E$. Les résultats des deux expériences sont synthétisés dans la figure 1.12. La mesure de la corrélation entre l'énergie et le champ électrique mesuré et donc de la cohérence ou de l'incohérence du signal, avec les technologies actuelles, est un des objectifs majeurs de la radiodétection.

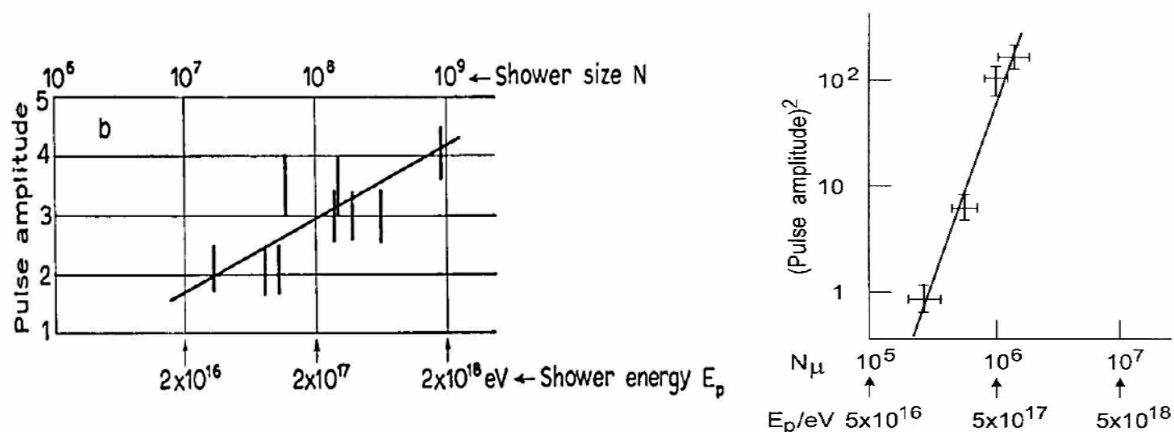


FIGURE 1.12 – A gauche, l'expérience de radiodétection de Chacaltaya trouve une amplitude de variation en $V \propto \sqrt{E}$. A droite, l'expérience de Moscou mesure une variation beaucoup plus rapide du champ électrique en fonction de l'énergie du primaire. Dans cette première étude, $V \propto E^2$. Figure tirée de [48].

1.3.2 L'effet géomagnétique

En 1965, Kahn et Lerche avancèrent l'hypothèse que le champ magnétique terrestre joue un rôle dans l'émission radio de la gerbe atmosphérique via deux phénomènes [51] :

- L'existence d'un courant transverse : sous l'action du champ géomagnétique par la force de Lorentz, les particules chargées sont déviées dans des directions opposées selon leur charge, créant un courant d'ensemble dans la gerbe.
- La présence d'un dipôle formé par le précédent phénomène, se déplaçant à la vitesse de la galette de particules.

Les particules disparaissant de la galette en régénèrent de nouvelles qui alimentent en permanence les deux phénomènes. Selon Kahn et Lerche, le mécanisme de courant transverse domine celui du dipôle et de l'excès de charge [51].

Cet effet géomagnétique conduit à une prédiction directe au niveau de l'expérience, basée sur l'expression de la force de Lorentz $\vec{F} = \vec{v} \wedge \vec{B}$, avec $\vec{v}$ la direction d'arrivée de la gerbe et $\vec{B}$ le champ géomagnétique. Un mécanisme géomagnétique donnerait donc un champ électrique plus fort pour des gerbes venant perpendiculairement au champ magnétique que pour des gerbes arrivant parallèlement. Expérimentalement, on peut s'attendre à une asymétrie des directions d'arrivée en fonction du champ magnétique dans le cadre d'une détection par seuil. Toujours en se basant sur l'expression de la force de

Lorentz, on s'attend à une polarisation du champ électrique perpendiculaire au champ magnétique. A nouveau les expériences montrèrent des résultats contradictoires :

- L'expérience de Prescott, au Canada, formée de 16 dipôles observant à une fréquence de 22 MHz, montra une asymétrie dans les directions d'arrivée (Fig. 1.13). Le champ magnétique est incliné vers le Sud. Plus d'évènements en provenance du Nord étaient détectés, observation compatible avec l'orientation du champ géomagnétique [52].
- L'expérience au Mont Chacaltaya, dans la bande 50-70 MHz, montra une polarisation préférentiellement perpendiculaire au champ magnétique. 23 impulsions furent détectées dans la polarisation Est-Ouest contre 7 dans la polarisation Nord-Sud. Le champ magnétique quasiment horizontal et orienté selon la direction Nord-Sud, favorisait la première polarisation.
- Les résultats obtenus par Bray [53] sont contradictoires avec ces deux premières expériences. Seuls les évènements avec une grande amplitude du champ radio associé montraient une asymétrie dans les directions d'arrivée.

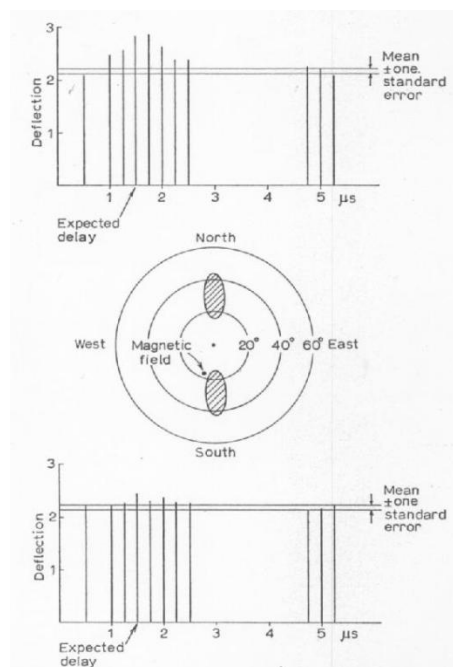


FIGURE 1.13 – Expérience de Prescott [52] : Le champ moyen mesuré pour les évènements venant du Nord (en haut), perpendiculairement au champ magnétique sont plus forts que ceux venant du Sud (en bas) dans la direction du champ magnétique.

1.3.3 Le profil latéral du champ radio

Dans une revue extensive datée de 1971, H. R. Allan compile l'ensemble des résultats de la radiodétection [48]. Il propose une expression du champ électrique en fonction des paramètres de la gerbe. La détection la plus efficace semble se situer à 55 MHz (Fig. 1.14).

$$\varepsilon(\mu V/m/MHz) = cte. \left(\frac{E_p}{10^{17}} \right) . \sin \alpha . \cos \theta . e^{-\frac{d}{d_0(\mu, \theta)}} \quad (1.5)$$

avec E_p l'énergie du primaire, α l'angle entre la direction d'arrivée et le champ géomagnétique, d la distance à l'axe de la gerbe. La longueur caractéristique de d_0 a été calculée pour les θ inférieurs à 35 degrés et $\nu=55$ MHz, elle vaut dans ce cas 100+/-10m. A 32 MHz, elle vaut 140m. Plusieurs remarques peuvent être faites sur cette relation :

- La constante initiale a été revue et modifiée à plusieurs reprises (et plutôt à la baisse). A la dernière correction, elle valait 0.6 $\mu V/m/MHz$.
- Le champ radio semble être proportionnel à l'énergie de la gerbe. Comme Allan le remarque dans sa revue, cela signifie que les effets d'incohérence de l'émission radio de la gerbe, et de position du X_{max} se compensent de manière assez 'fortuite'.
- Un effet en $\sin \alpha$ est attribué à un effet géomagnétique. Il apparaît naturellement dans l'écriture de la force de Lorentz.
- La dépendance exponentielle en fonction de la distance à l'axe permet de trouver le cœur de gerbe en radio. Pour l'expérience de H. R. Allan ce pied de gerbe était cependant fixé par les détecteurs de particules car le nombre d'antennes était insuffisant. Implicitement, la formule implique une symétrie du champ radio, dans le plan de la gerbe

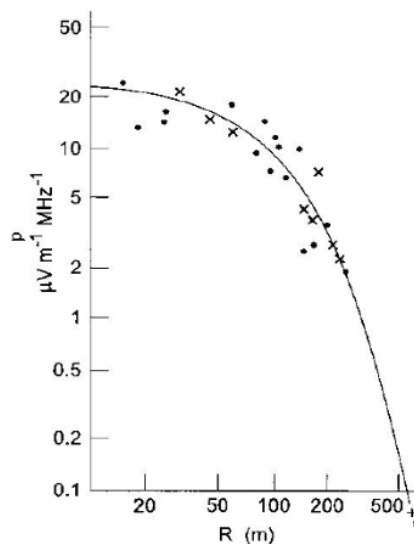
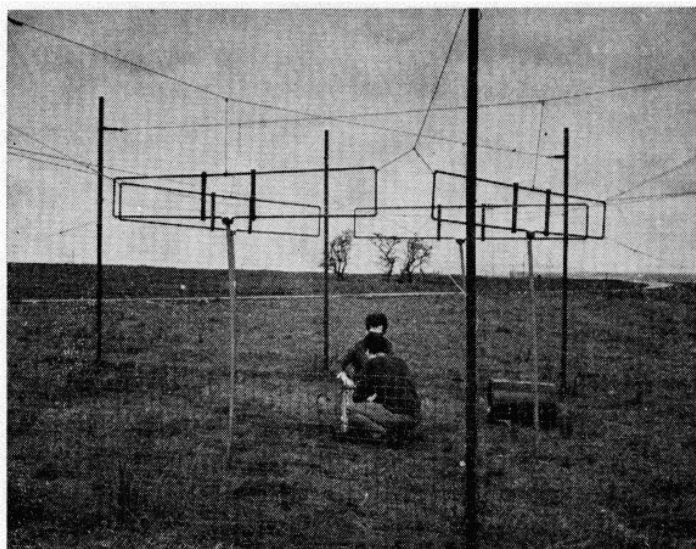


FIGURE 1.14 – A gauche, une des dernières expériences de H. R. Allan à Haverah Park avec 4 antennes accordées à 44 MHz. A droite, profils exponentiels des événements détectés compilés à 55 MHz. Une normalisation est faite en énergie et en direction d'arrivée par rapport au champ B . Les champs corrigés sont correctement ajustés par une exponentielle décroissante (trait plein). Photo et figure tirées de [48].

1.3.4 Les modèles et simulations

Jusqu'à récemment, les modèles et simulations différaient fortement dans les prédictions (forme du pulse, du spectre, ...). La divergence principale de ces modèles était due à la prise en compte ou non de la variation de charge associée à l'apparition ou la disparition d'une particule³. C'est de cette variation de charge individuelle que découle la bipolarité du signal. Depuis quelques mois, une certaine convergence commence à apparaître entre quelques modèles. Quelques simulations sont présentées ci-dessous :

MGRM : Les travaux de K. Werner et O. Scholten se rapprochent de la philosophie de l'étude que menèrent F. D. Kahn et I. Lerche. Ils sont basés sur une description macroscopique du champ radio émis par la gerbe (simulée par CORSIKA) et la prise en compte des 3 phénomènes (excès de charge, courant transverse et dipôle). La forme de l'impulsion radio, bipolaire, déduite du profil longitudinal de la gerbe, est naturellement obtenue lors de la dérivation des équations du champ électrique. La variation de charge est donc implicitement prise en compte. Ce modèle ne prend pas en compte l'extension latérale de la galette de particules. Il est donc probable qu'il soit moins précis à faible distance de l'axe de la gerbe.

REAS3 : Après un premier modèle analytique, basé sur le mécanisme de courant transverse [54] et appliqué à des paramétrisations analytiques de la gerbe, T. Huege a ensuite élaboré un modèle basé sur un Monte-Carlo à partir de ces mêmes paramétrisations (REAS, [55]) puis sur les fichiers de sorties de simulations CORSIKA (REAS2, [56]). Ce n'est que dans REAS3 [57], que la variation de charge individuelle a été prise en compte, donnant une bipolarité au signal. Ce modèle prend en compte toute la géométrie de la gerbe au contraire de MGMR.

ReAires : Cette fois-ci, la simulation du champ radio émis, particule par particule, est directement réalisée depuis Aires auquel ReAires rajoute une couche de simulation [58] : le calcul du champ électrique. A l'heure actuelle, cette simulation n'a pas été corrigée de l'erreur sur la variation de charge individuelle des particules. Les signaux obtenus sont donc monopolaires.

SEIFAS : Un modèle plus jeune est actuellement développé par Vincent Marin au laboratoire SUB-ATECH. Il produit des résultats très similaires à MGRM et REAS3 [59], notamment la bipolarité du signal. Les caractéristiques des particules de la gerbe sont obtenues à partir de tirages Monte-Carlo dans des paramétrisations universelles de gerbe [60]. Ce modèle possède ainsi l'atout d'être autonome, puisque ne nécessitant pas de fichiers type CORSIKA en entrée, et de prendre en compte l'ensemble de la géométrie de la gerbe comme REAS3.

Autres modèles : plusieurs autres modèles dont nous ne discuterons par les résultats ici existent par ailleurs, notamment le Coulombien boosté [61], le WIRE Model [62], l'inverse-Compton [63], et un modèle à grand paramètre d'impact [64].

³les équations d'émission de champ radio utilisées initialement étaient valables uniquement pour des particules allant de $-\infty$ à $+\infty$

Prédictions des modèles sur la radiodétection : A titre d'exemple, nous allons rapidement confronter les modèles REAS3 [57] de T. Huege et MGMR [65] de K. Werner et O. Scholten. La confrontation des résultats des deux modèles, basés sur des approches complètement différentes (microscopique pour REAS3, macroscopique pour MGRM) montre un accord tout à fait satisfaisant, autant en termes d'amplitude que de forme, pour les spectres et les impulsions notamment. Cette comparaison a fait l'objet d'une publication dont nous rappellerons ici les principaux résultats [66]. Un des objectifs de la radiodétection est de comparer les observables expérimentaux à ces prédictions théoriques : forme et amplitude du spectre en fréquence, motif au sol, etc ...

- Les signaux bipolaires ont une amplitude reliée à l'énergie de la gerbe. La durée du signal, de l'ordre de quelques dizaines de nanosecondes, est d'autant plus grande que l'on se place loin du pied de gerbe (Fig.1.15).
- Conséquence de l'effet précédent, le spectre en fréquence s'étale d'autant plus que l'on se rapproche du pied de gerbe. Il est principalement compris entre 1 et 100 MHz. La fréquence d'apparition de l'incohérence de l'émission diminue avec l'énergie (Fig.1.16).
- Dans la polarisation perpendiculaire au champ magnétique (le plus souvent Est-Ouest, pour un champ B pointant vers le Nord ou le Sud), le profil latéral semble être en première approximation ajustable par une exponentielle.
- Extension du point précédent, les motifs de polarisation au sol sont, au premier ordre, symétriques autour de l'axe de la gerbe pour la polarisation Est-Ouest. Une légère asymétrie existe au deuxième ordre. Dans la polarisation Nord-Sud, les motifs au sol deviennent plus complexes.

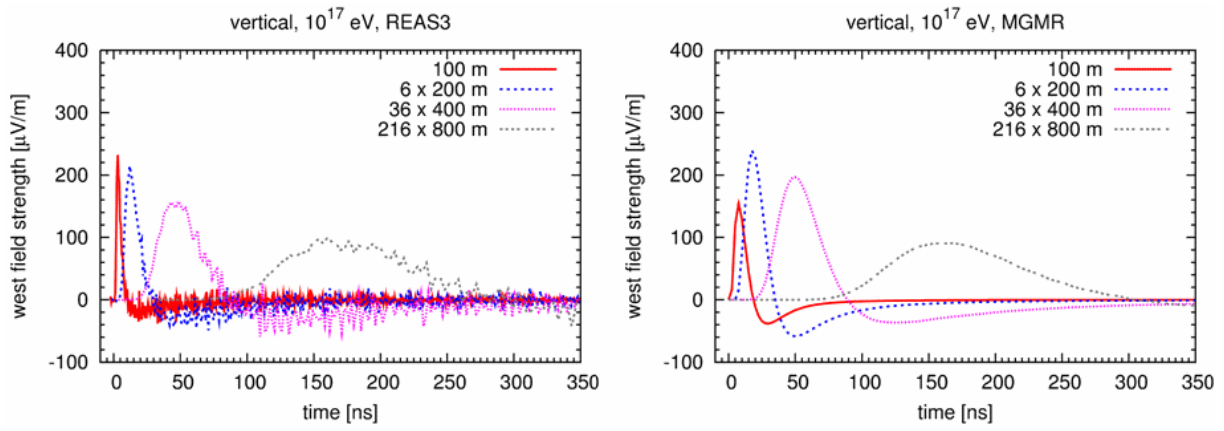


FIGURE 1.15 – Comparaison des modèles REAS3 et MGMR. Impulsions induites pour une gerbe verticale à 10^{17} eV, pour différentes distances à l'axe. Figure tirée de [66].

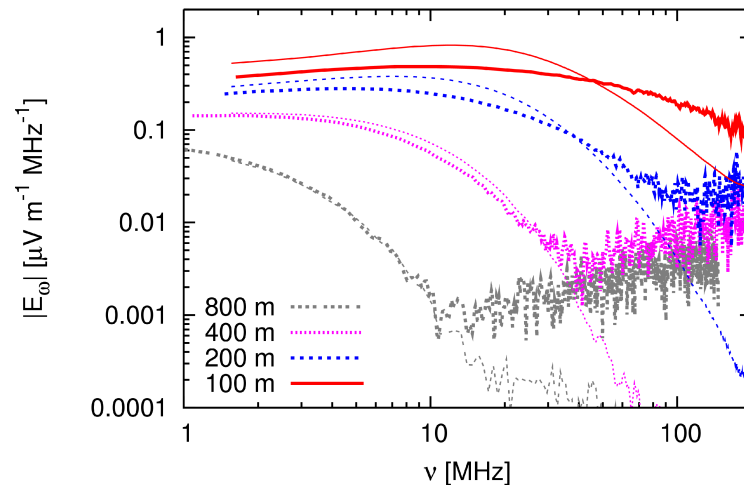


FIGURE 1.16 – Comparaison des modèles REAS3 et MGMR. Spectres en fréquence pour une gerbe verticale à 10^{17} eV, pour différentes distances à l'axe. Les effets d'incohérence apparaissent à haute fréquence, d'autant plus tôt que la distance à l'axe augmente. Figure tirée de [66].

Chapitre 2

CODALEMA : Historique et présentation

Le développement expérimental de CODALEMA a débuté en 2002 sur le site de Nançay. Les premiers mois ont permis de tester la faisabilité de l'approche en termes de détection impulsionnelle par les antennes. Puis, à partir de 2003, différentes versions de réseaux d'antennes ont été déployées sur le site [67]. L'expérience est devenue véritablement opérationnelle en 2004. Ce chapitre présentera la station de Nançay, puis après un rapide résumé des premières configurations de l'expérience CODALEMA, la configuration, l'acquisition et l'analyse des données du réseau actuel seront décrites.

2.1 L'Observatoire de Nançay

Au lendemain de la seconde guerre mondiale, malgré de timides développements de la radioastronomie, la France constatait son retard dans ce domaine et la nécessité de la création d'instruments plus grands et plus précis. Un financement fut apporté par le ministère de l'Education Nationale à l'Ecole Normale Supérieure pour la création d'un observatoire de radioastronomie avec deux instruments principaux : un grand réseau pour les observations solaires sur ondes métriques et un interféromètre à base variable pour des études galactiques. Le cahier des charges exigeait un terrain plat sur plusieurs kilomètres carrés, pour limiter les travaux de gros œuvre, un éloignement des usines et de leurs bruits parasites associés, mais une proximité relative de la capitale parisienne. En 1953, un terrain de 150 hectares fut acheté à Nançay, dans le Loir et Cher. Les premières observations commencèrent en 1955.

Aujourd'hui, le terrain de la station est la propriété de l'ENS, mais c'est l'Observatoire de Paris et le CNRS qui sont responsables de la gestion et du développement du site. Une cinquantaine de personnes, techniciens, ingénieurs et administratifs travaillent en permanence sur le site, en collaboration avec les laboratoires dont les expériences sont implantées sur l'Observatoire. Les trois plus anciens instruments encore en fonctionnement sont le radiotélescope, le radiohéliographe et le réseau décamétrique [68]. Ils sont associés à d'autres instruments, plus récents, travaillant dans des bandes de fréquence variées (Fig.2.1). Une vue aérienne de la station est présentée dans la figure 2.2.

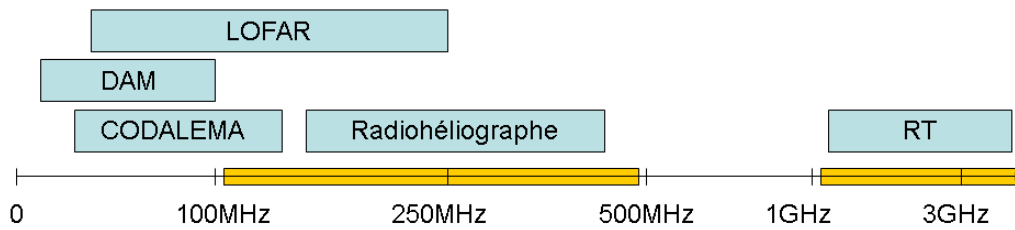


FIGURE 2.1 – Gammes en fréquences observées par quelques instruments de l’Observatoire de Nançay. En jaune, directement sur l’axe des fréquences, les bandes surveillées en permanence par l’antenne ‘parasite’ chargée de surveiller la qualité du ciel radio sur le site.



FIGURE 2.2 – Vue aérienne de l’observatoire. Le radiohéliographe est distribué autour du T largement visible, d’1.5 km de côté. Les miroirs du radiotélescope apparaissent au Sud. Le réseau décimétrique est le petit carré clair en haut de l’image. Les bâtiments techniques et administratifs sont visibles au Nord.

2.1.1 Le radiotélescope

Les dimensions du radiotélescope de Nançay, formé d’un miroir sphérique fixe de 300m de long par 35m de haut, d’un miroir plan mobile de 200m par 40m et, enfin, d’un chariot focal, monté sur rail (Fig. 2.3), ne sont clairement surpassées que par un seul autre télescope au monde, celui d’Arecibo à Porto-Rico, aux USA.

En pratique, le radiotélescope est parfaitement adapté pour les programmes de surveillance (par exemple pour les collaborations internationales FERMI et EPTA sur les pulsars), ce qui le rend unique

parmi ses pairs. Le radiotélescope permet d'observer n'importe quel astre entre 1.1 et 3.5 GHz, sur 85% de la sphère céleste, et d'étudier la polarisation de l'onde incidente. La bande passante actuelle d'observation est de 50 MHz et sera bientôt portée à 500 MHz.

Il observe, entre autres, les galaxies et les larges structures (le mouvement des galaxies dans les larges structures de l'Univers, le recensement complet des galaxies SDSS dans l'univers local, la mesure de l'hydrogène neutre dans des étoiles, ...), les masers OH dans les étoiles évoluées, les pulsars (glitch d'un pulsar dit recyclé, découverte de nouveaux pulsars avec FERMI, mesure précise de la masse d'un système binaire, ...), l'observation des comètes, ...



FIGURE 2.3 – Le radiotélescope constitué d'un miroir plan dont le rôle est de renvoyer les ondes captées vers le miroir sphérique qui les renvoie à son tour vers le chariot focal au centre de l'image. Les différents miroirs sont composés d'un grillage métallique dont le maillage de 12.4 mm agit comme un miroir parfait pour les longueurs d'ondes observées.

2.1.2 Le radiohéliographe

Le Radiohéliographe (ou RH), s'il a beaucoup évolué depuis sa création, formait avec l'interféromètre à taille variable, l'une des deux premières expériences de l'Observatoire dès 1955 (Fig. 2.4). Il réalise des images du soleil en ondes radioélectriques comprises entre 150 et 450 MHz. L'observation simultanée dans plusieurs bandes de fréquence, correspondant à des activités solaires d'altitudes différentes permet une cartographie en trois dimensions du soleil. Les objectifs du radiohéliographe sont multiples et visent à comprendre notamment le rôle du champ magnétique, la création des vents solaires, les instabilités de la couronne ou le plasma. Le radiohéliographe est constitué de 48 antennes globalement réparties sur 2 lignes perpendiculaires formant un T d'environ 1500 m de côté. L'observation se fait grâce à la technique d'interférométrie.

2.1.3 Le Réseau Décamétrique

Le Réseau Décamétrique (Fig. 2.5) ou DAM (pour DecAMetric array) observe l'environnement magnétisé et ionisé des planètes (principalement Jupiter), du Soleil et des étoiles. Il a été construit entre 1975

et 1978 [69]. Il est constitué de 144 antennes log-périodiques, observant en mode phasées à des longueurs d'onde comprises entre 10 et 100 MHz. Ces antennes sont constituées de 8 brins enroulés hélicoïdalement sur un support conique de 6 mètres de haut. Le réseau est finalement formé de deux groupes d'antennes bobinées dans les deux sens, ce qui permet l'étude des polarisations circulaires droite et gauche des émissions radio. Le DAM observe principalement l'émission radio aurorale de Jupiter entre 10 et 40 MHz, et les sursauts radio de la haute couronne solaire entre 25 MHz et 75 MHz. Ce réseau étudie également les gerbes atmosphériques en coïncidence avec les scintillateurs de CODALEMA. Cependant, dans la suite de ce manuscrit, les résultats du DAM ne seront pas discutés. Ils sont notamment présentés dans [70]. Les premiers tests effectués par CODALEMA pour la détection radio des rayons cosmiques utilisaient des antennes identiques à celles du DAM.



FIGURE 2.4 – Vue en perspective du bras Nord-Sud du Radiohéliographe.

2.1.4 Les nouvelles expériences et projets

L'Observatoire abrite également des expériences plus récentes comme une station LOFAR ou des démonstrateurs de faisabilité comme EMBRACE.

L'expérience LOFAR a récemment installé un champ d'antennes sur le site de l'Observatoire de Nançay. En interférométrie avec d'autres stations situées en Allemagne, Royaume-Uni, Suède, et d'autres, plus nombreuses, aux Pays-Bas¹, cette expérience vise à étudier la réionisation de l'Univers, les pulsars, jets, étoiles éruptives, . . . Observant entre 30 et 240 MHz, cet ambitieux détecteur compte apporter un gain de deux ordres de grandeur en sensibilité et résolution angulaire par rapport aux expériences actuelles.

Le prototype EMBRACE récemment installé sur le site de l'Observatoire est une des étapes pour démontrer la faisabilité du projet SKA (Square Kilometre Array). L'objectif de ce projet est la réalisation d'un réseau d'antennes, travaillant entre 70 MHz et 10 GHz, en multibeam, équivalent à un radiotélescope avec une surface collectrice de 1km^2 , qui surpasserait les sensibilités des radiotélescopes actuels. Une

¹soit un bras d'interférométrie de près de 1000 mètres



FIGURE 2.5 – Le réseau décamétrique de Nançay couvert de neige. Les brins formant les antennes sont clairement visibles. Afin de pointer dans la direction moyenne du Soleil et de Jupiter au cours de l’année, les antennes sont inclinées de 20 degrés vers le Sud.

partie de l’effort de travail de la station pour le projet SKA porte sur la gestion et la correction des interférences entre les moyens de télécommunication toujours plus nombreux.

2.2 CODALEMA-I

2.2.1 Les contraintes expérimentales

Au début des années 2000, un groupe de chercheurs de SUBATECH décida de mettre en place une expérience de radiodétection de gerbes atmosphériques.

Les différents travaux théoriques menés à l’époque sur la radiodétection prévoient une intensité diminuant avec la fréquence, et bornée à une centaine de MHz, pour des gerbes typiques. Notons par ailleurs, qu’à partir de considérations géométriques sur la gerbe, H. R. Allan prévoyait une émission radio de la gerbe principalement comprise entre 10 et 100 MHz [48]. Les différentes expériences pionnières de radiodétection confirmaient par ailleurs largement ces prédictions. L’Observatoire de Nançay possédait un atout de taille : les antennes du DAM. Leur bande de fréquence de détection les rendait parfaitement adaptées à l’étude radio des gerbes atmosphériques.

Une des difficultés rencontrées lors des toutes premières expériences de radiodétection était un taux de détection assez faible, soulignant une technique à la limite des possibilités de l’époque. Malgré les progrès en la matière, il était important de trouver un site adapté à la radiodétection avec un bruit radio le plus bas possible. Dès le début des années 1960, une attention toute particulière avait été apportée à la limitation des émissions radio dans le site de Nançay et à proximité. La conséquence en est qu’aujourd’hui encore, l’environnement radio de l’Observatoire est exceptionnel, et qu’il devient un site privilégié pour l’observation radio des gerbes atmosphériques. Le spectre en fréquence du ciel mesuré à Nançay est présenté dans la figure 2.6.

- Le premier émetteur (non représenté sur la figure) est celui AM de France Inter à 162 kHz. Il se situe à 15 kilomètres de Nançay. Sa puissance de 2 MW, utile pour une propagation sur de longues distances a pour conséquence néfaste de saturer les instruments de mesure qui ne s'en préserveraient pas. Au final, l'utilisation d'un filtre passe-haut de 1 MHz est indispensable afin de s'affranchir du signal de cet émetteur (utilisé dans le cadre de la mesure du spectre de la figure 2.6).
- Il est impossible de se préserver des longueurs d'ondes au-dessous de 10 MHz, même sur le site de Nançay. En effet, pour de telles fréquences, l'ionosphère réfléchit les ondes sur de très grandes distances. Au final, les signaux radio peuvent parcourir l'ensemble du globe terrestre ! Cette propriété est à l'origine du succès de l'émission AM dans ces bandes de fréquence, sur de grandes distances et avec un nombre réduit d'émetteurs. La composition de l'ionosphère dépendant de sa température, on observe des variations jour-nuit de l'intensité de ces émissions à basse fréquence. Il serait ainsi techniquement possible d'utiliser la bande de fréquence comprise entre 4 et 10 MHz entre le lever et le coucher du soleil. Cela avait été exploré, sans succès lors des prémices de la radiodétection, par l'équipe de H. R. Allan [71]. Au-delà de 24 MHz le spectre redevient adapté à une détection de signaux radio de faibles amplitudes.
- Entre 20 et 87.5 MHz, le bruit radio est extrêmement réduit. Seuls quelques émetteurs intermittents (en temps et en fréquence) sont visibles. Il s'agit, dans le cas spécifique de l'Observatoire de Nançay des émetteurs COFIROUTE à 37 et 43 MHz, et des émetteurs de la gendarmerie nationale (73,3 à 74,8 MHz et 77,5 à 80 MHz).
- Entre 87.5 et 108 MHz apparaît la bande de fréquence FM, évidemment incompatible avec la radiodétection, au vu du nombre et de la puissance des émetteurs. Celle-ci est expérimentalement beaucoup plus puissante dans la polarisation Nord-Sud.
- Entre 118 et 136 MHz, se trouve une bande de fréquence utilisée pour la communication des avions.
- Au-delà de 150 MHz, divers émetteurs VHF, UHF (dont Canal+ à 200 MHz), puis TV apparaissent.

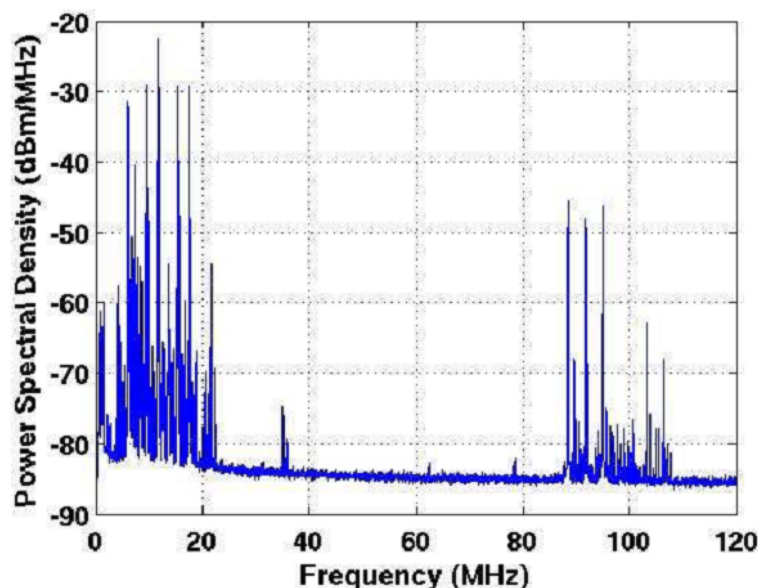


FIGURE 2.6 – Spectre radio du ciel à Nançay, entre 1 et 120 MHz, mesuré par une antenne log-périodique.

Au final, la bande de fréquence utilisée pour la radiodétection doit se situer au delà de 20 MHz (borne supérieure des émissions AM) et au-dessous de 87.5 MHz (borne inférieure des émissions FM). Des études fines ont montré que la bande de fréquence optimale est 23-83 MHz, voire 30-70 MHz, dans le cas des antennes dipolaires.

Afin de démontrer la faisabilité de la radiodétection, l'expérience fut initialement basée sur 4 antennes log-périodiques situées aux 4 coins du DAM. D'abord construit à partir des signaux radio d'une antenne (en auto-déclenchement donc), le signal de déclenchement fut ensuite bâti à partir de quatre détecteurs de particules à proximité des antennes. Après des premiers résultats concluants, l'expérience fut agrandie. Le système d'acquisition fut déplacé de la salle d'acquisition du DAM à un container, et une antenne log-périodique fut ajoutée à 1 km du DAM : la configuration finale de cette première phase rajouta un bras Est-Ouest de 600 mètre de long constitué de 7 antennes log-périodiques (Fig 2.7). De cette première configuration, seul le container d'acquisition a été conservé. Il reste le centre de fonctionnement de l'expérience. Nous allons maintenant expliquer les spécificités des deux types de détecteurs utilisés et de l'acquisition avant de présenter les principaux résultats obtenus par cette première configuration de l'expérience CODALEMA [67] et [72].

2.2.2 Les antennes log-périodiques

L'une des principales caractéristiques d'une antenne est son diagramme de réception (ou lobe), en fonction de la direction. Ce diagramme de réception est souvent défini en dBi, c'est à dire en dB over isotropic, gain par rapport à une antenne idéale qui rayonnerait la même puissance totale dans tout l'espace de manière isotrope. Pour une puissance totale de réception donnée, plus l'antenne est directive,

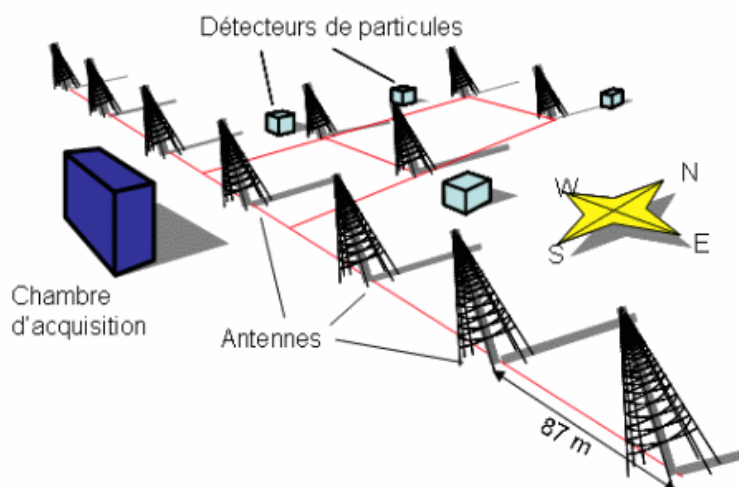


FIGURE 2.7 – Configuration du réseau CODALEMA-I

plus elle sera sensible pour cette direction particulière. A contrario, elle sera relativement insensible aux autres directions. Une telle antenne serait donc optimale pour une observation en pointage. Par contre, et c'est le cas de la radiodétection, une antenne non-directive, c'est-à-dire à lobe relativement constant en direction d'arrivée, est adaptée à une détection plus isotrope, pour lesquelles les directions d'arrivée des événements ou de l'observation ne sont pas connues a priori.

Le diagramme de réception de l'antenne log-périodique est indiqué figure 2.8. Son gain maximal est de 7 dBi, dans la direction de l'axe de son mât. Son lobe principal, à -3dB (un facteur 2 en puissance, $\sqrt{2}$ en tension), fait un demi angle de 45 degrés autour de cette direction. Le gain de cette antenne est relativement constant entre 10 et 100 MHz. Cependant, à cause des contraintes d'émissions radio parasites expliquées plus haut, et de la faible dynamique du numériseur utilisé, deux filtres analogiques ont été employés. Un filtre passe-haut de 1 MHz pour éliminer l'émission de France Inter à 162 kHz, et un filtre passe bande compris entre 24 et 82 MHz.

Une caractéristique majeure de cette antenne est que sa topologie la rend sensible à l'ensemble des polarisations horizontales du champ, voire à la polarisation verticale, du fait de sa grande taille. La simulation de l'antenne est complexe, et les contributions respectives des différentes composantes de champ sont mal connues. A contrario, de simples antennes dipôles (voir plus tard) sont plus facilement simulables, et par leur forme ne sont sensibles qu'à une seule composante, de polarisation horizontale, celle parallèle au dipôle. L'antenne log-périodique est volontairement orientée vers le Sud (pour l'observation du soleil et de Jupiter) ce qui pénalise une détection isotrope des rayons cosmiques.

2.2.3 Les scintillateurs

Les 4 scintillateurs, permettant le déclenchement de l'enregistrement des antennes, ont été fournis par le LAL (Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire) d'Orsay. Ils étaient formés de deux plaques de plastique scintillant superposées. Chacune d'elles mesurait 2 cm d'épaisseur et couvrait une surface de 2.3 m². Elles étaient lues par des tubes photo-multiplicateurs. La présence de ces deux couches permettait

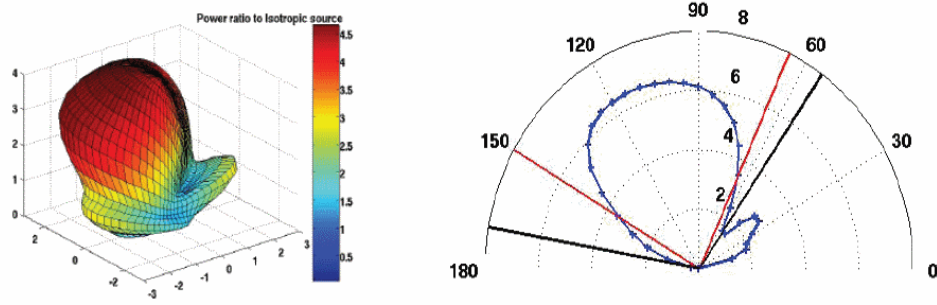


FIGURE 2.8 – A gauche, diagramme 3D de réception de l’antenne log-périodique à 50 MHz. Le lobe principal est pointé vers le Sud dans la direction de l’antenne. Un lobe secondaire, pointant vers le Nord apparaît. A droite, gain en dBi dans le plan Nord-Sud, toujours à 50 MHz. Les lobes principal et secondaire apparaissent. Entre les traits rouges, limites à -3dB, le lobe est gaussien.

de réduire le déclenchement de la station à 200 Hz, grâce à un premier test de coïncidence interne à la station. La distance entre les deux scintillateurs les plus éloignés étant de 128 m (soit 427 ns de temps de vol pour une gerbe horizontale se déplaçant à la vitesse c), l’utilisation d’une fenêtre de coïncidence en temps de 600 ns pour les 4 stations permettait le déclenchement de l’enregistrement de l’acquisition pour l’ensemble des antennes du réseau.

Ce réseau de scintillateurs possédait cependant quelques défauts. De par sa forme (un carré de 4 détecteurs), il ne permettait pas d’établir de critère de centralité². L’efficacité de collection de la lumière en fonction du point d’impact dans un scintillateur était non-uniforme. Le réseau de détecteurs au sol apportait donc deux informations sur la gerbe : sa présence et sa direction d’arrivée (par triangulation). Il était par contre impossible de remonter à l’énergie du rayon cosmique.

Cependant une estimation statistique de l’énergie seuil est possible, via la mesure de l’expression du flux intégré F des gerbes atmosphériques détectées, défini par :

$$F = \frac{1}{A \cdot \Delta t} \quad (2.1)$$

où Δt est le temps entre deux déclenchements du réseau de particules (1.1 évènement par minute) et A est l’acceptance intégrée. Elle est égale à la surface de détection multipliée par l’angle solide couvert par le détecteur, et vaut pour cette configuration de l’expérience $16500 \text{ m}^2 \cdot \text{sr}^{-1}$. Le spectre du flux des rayons cosmiques associé au flux intégré de $1,6 \times 10^{-6} \text{ m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$, mesuré par les scintillateurs, une énergie seuil de détection par le réseau de $1,6 \times 10^{15} \text{ eV}$.

2.2.4 Le système d’acquisition

La numérisation des signaux antennes était effectuée par des oscilloscopes Leroy équipés d’un ADC 8 bits. La fréquence d’échantillonnage était de 500 MHz. La profondeur d’enregistrement était de 5000

²Une disposition en triangle avec le 4ème scintillateur au centre, aurait permis de mettre en place ce critère de centralité. Cependant, cela exigeait de placer un scintillateur au centre du DAM.

points, soit une durée totale du signal numérisé de $10\ \mu\text{s}$. Ces signaux étaient enregistrés et stockés par le logiciel d'acquisition Labview [73]. Le filtre 24-82 MHz permettait l'utilisation d'une dynamique de 4 V, sans saturation. Le LSB³ associé était donc de 16 mV. La dynamique relativement faible justifie une nouvelle fois l'utilisation d'un filtre 24-82 MHz. En atténuant fortement les émissions AM et FM, le LSB peut être diminué, sans risque de saturation.

2.2.5 Les principaux résultats

L'analyse et les résultats complets de cette première configuration sont largement présentés dans la thèse d'Arnaud Bellétoile [74]. Nous allons les rappeler brièvement.

- Tout d'abord, et c'était le point central de cette première phase, la faisabilité de la radiodétection a été démontrée puisque, en une centaine de jours de prise de données, 111 gerbes atmosphériques ont été détectées en radio. Le champ induit par les gerbes atmosphériques est donc détectable par des antennes. Ces résultats ont été publiés pour la première fois dans [72].
- Le réseau d'antennes de CODALEMA permet de reconstruire les directions d'arrivée en radio, de manière indépendante des scintillateurs. La figure 2.9 indique les directions des événements détectés. Malgré la faible statistique, on peut remarquer que les directions d'arrivée semblent relativement isotropes. Il est probable que la relative directivité des antennes log-périodiques biaise cette distribution de directions d'arrivée. Excepté pour quelques rares événements, l'accord des directions reconstruites par les deux réseaux est très satisfaisant.

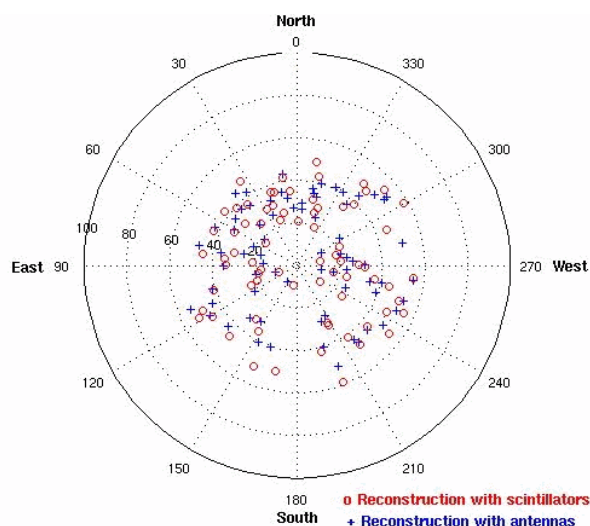


FIGURE 2.9 – Carte du ciel des directions d'arrivée. En rouge les événements vus par les scintillateurs. En bleu, ceux vus par la radio.

- De manière analogue à la méthode utilisée pour les scintillateurs, il est possible de remonter à une énergie seuil de la détection radio. Ainsi, en faisant l'hypothèse d'une couverture du ciel égale pour

³Least Significant Bit, plus petit signal pouvant être numérisé

les deux détecteurs, le flux intégré du nombre d'évènements détectés par les antennes du réseau est compatible avec une énergie seuil de 5.10^{16} eV.

- Rappelons que les enregistrements de chaque évènement étant réalisés antenne par antenne, il est possible d'identifier et de caractériser chaque impulsion. En temps, cette information nous permet de trianguler le signal et de remonter à la direction d'arrivée du cosmique. En amplitude, il est possible d'étudier la distribution latérale du champ émis par une gerbe atmosphérique. En 1970, Allan la paramétra avec la formule, présentée dans le chapitre précédent [48] :

$$\varepsilon(d) = \varepsilon_0 \cdot e^{-\frac{d}{d_0}} \propto E_p e^{\frac{d}{d_0}} \quad (2.2)$$

Les 4 paramètres libres utilisés pour l'expérience CODALEMA sont : ε_0 , amplitude à l'origine, d_0 , mais également la position du cœur de gerbe x_0, y_0 , implicitement présents dans d . La configuration à une dimension du réseau de l'époque rendait plus difficile cet ajustement. Ainsi seuls 58 évènements sur les 111 détectés en radio ont permis de reconstruire une distribution latérale correctement ajustée par une dépendance exponentielle (Fig. 2.10). Ce résultat est d'une très grande importance, car le paramètre libre ε_0 est un estimateur radio de l'énergie de la gerbe. De même, les paramètres x_0 et y_0 donnent accès à la position du pied de gerbe reconstruit en radio.

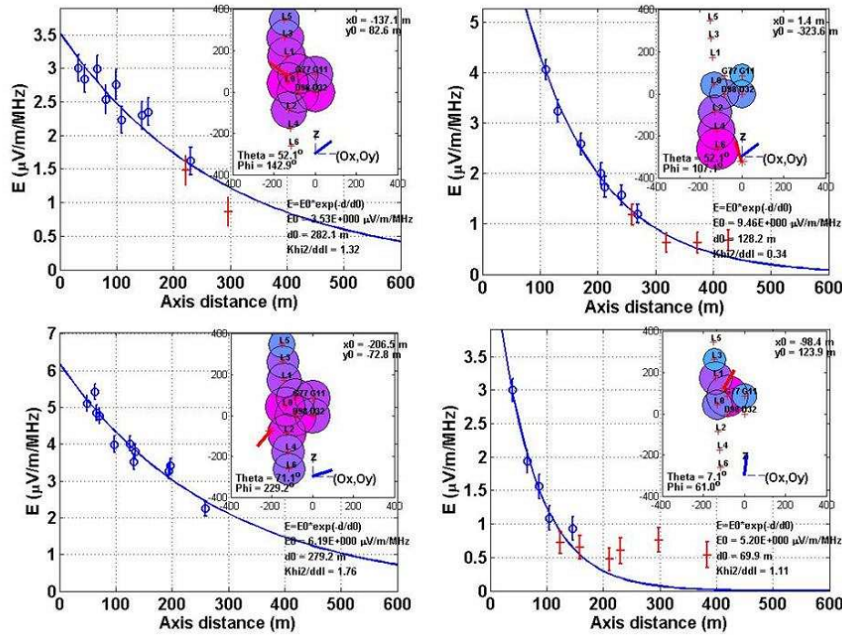


FIGURE 2.10 – Profils reconstruits avec l'expérience CODALEMA-I.

Les résultats positifs obtenus par cette première configuration encourageaient au développement de l'expérience CODALEMA. Le réseau de scintillateurs devait être agrandi, en surface et nombre. Le type de détecteur utilisé devait être modifié. L'objectif est de donner des informations supplémentaires sur la

gerbe : l'énergie du primaire pour corrélérer ε_0 et E_p et la position du pied de gerbe pour la comparer à celle reconstruite en radio. Pour reconstruire plus finement les profils, il était également utile d'agrandir le réseau d'antennes, et notamment de déployer un nouvel axe de détecteurs selon la direction Nord-Sud. L'ajout de nouvelles antennes se heurtait à une difficulté : le nombre restreint d'antennes log-périodiques disponibles. Dans un premier temps, des tentatives de réplique ont été réalisées, sans succès. De plus leur envergure était a priori incompatible avec le déploiement sur un réseau vaste dans le cadre d'une future expérience de radiodétection autonome. Il a donc été décidé d'utiliser une antenne active plus compacte qui était en développement au laboratoire SUBATECH. La multiplication des détecteurs a également amené au remplacement des oscilloscopes par des cartes d'acquisition dédiées, les cartes MATACQ. Au final, des modifications drastiques de l'expérience touchèrent l'ensemble des composants du réseau. La première configuration de l'expérience avait fonctionné entre octobre 2004 et octobre 2005. En novembre 2005, la seconde configuration fut mise en place. Depuis cette date, elle n'a subi que quelques modifications au niveau du nombre de détecteurs radio et particules, et elle est encore fonctionnelle en 2010.

2.3 CODALEMA-II

2.3.1 Les nouveaux scintillateurs

Le détecteur

Afin de déterminer au mieux la position du pied de gerbe, il était nécessaire de pouvoir obtenir une bonne mesure de la densité de particules. Une grande dynamique permettait la meilleure reconstruction possible de la distribution de particules au sol, sur une large gamme d'énergie. Pour reconstruire finement la direction d'arrivée, une bonne résolution en temps était exigée, facilitée par une géométrie plate du détecteur. Cependant, elle s'accompagne d'un effet d'acceptance qui rend le détecteur peu sensible aux gerbes inclinées, car avec une surface apparente variant en $\cos(\theta)$. Le détecteur au sol de CODALEMA-II est finalement inspiré de ceux utilisés à GRANSASSO dans le cadre de l'expérience EASTOP [75]. Il a été fourni par le LPSC de Grenoble (Fig. 2.11).

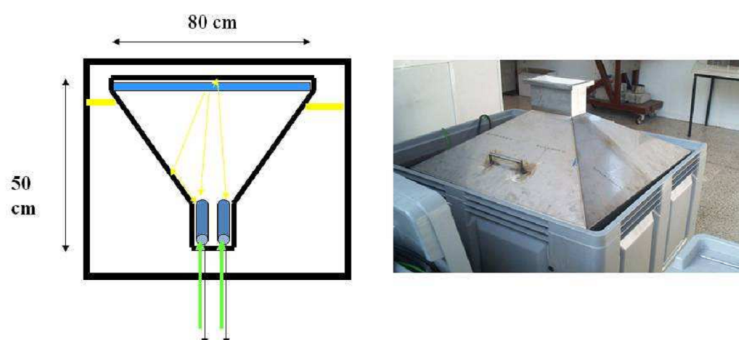


FIGURE 2.11 – Vue schématique et photo d'un scintillateur posé (à l'envers) sur sa cuve.

Les scintillateurs sont placés dans des cuves en acier, recouvertes à l'intérieur d'une peinture réfléchissante, et sous une bâche en plastique pour protéger le détecteur des intempéries. Ils sont composés d'une plaque de plastique carrée de 80 cm de côté, et de 4 cm d'épaisseur. Celui-ci a un bon rendement lumineux, et une réponse rapide. Sa faible épaisseur le rend principalement sensible aux électrons et aux positrons, particules les plus nombreuses au sol, pour des gerbes verticales et à la gamme d'énergie considérée, comme nous l'avons vu dans le premier chapitre. Les plaques de plastiques sont en regard de deux photomultiplicateurs (PM). Ces derniers ont des gains différents afin de couvrir une dynamique finale proche de 10000 (de 0.3 à 3000 VEM) et de permettre la mesure de signaux avec une large gamme d'intensité⁴ (Fig. 2.12). Le PM haut-gain est à une tension de 1600 V afin d'obtenir une tension moyenne au niveau de la carte d'acquisition d'environ - 50 mV, le seuil de détection étant fixé à -15 mV. Le PM bas-gain est sous une tension de 1200 Volts, ce qui donne un gain 10 fois plus faible que pour le second PM. De plus la tension est réduite d'un facteur 2 pour cette voie, en amont de la carte d'acquisition. Le rapport des amplitudes entre les signaux des deux PM est finalement de 20.

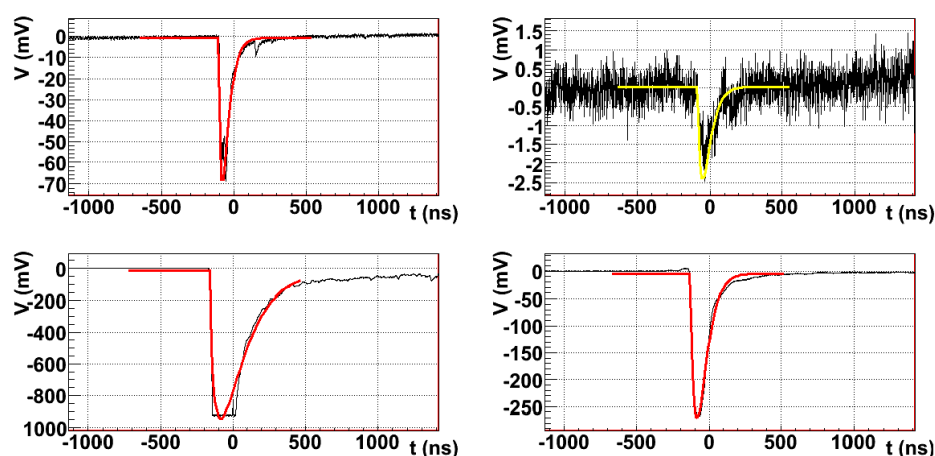


FIGURE 2.12 – 2 évènements (en haut et en bas), vus par un couple de PM (à gauche haut-gain, à droite bas-gain). En haut, le PM haut-gain ne sature pas. En bas, le PM haut-gain sature, et on utilisera finalement le PM bas-gain pour la mesure de la charge. Le signal est représenté par l'histogramme, l'ajustement par une courbe.

Les scintillateurs sont reliés au container central par deux câbles d'alimentation et deux câbles signaux. Ces câbles mesurent 330 mètres quelle que soit la station. Ainsi l'atténuation et le retard en temps sont, en première approximation, les mêmes pour tous les scintillateurs du réseau.

⁴Les muons atmosphériques, créés dans les gerbes de basse énergie, étant très nombreux, on se sert en général de ces particules pour calibrer les détecteurs. L'énergie déposée par un muon vertical (VEM) vaut 2 MeV.cm^{-1} . Une simulation permet de montrer qu'un électron dépose en moyenne 1 VEM dans le détecteur. Cet électron traversant le détecteur va produire une cinquantaine de photons convertis au niveau des PM.

Le déclenchement et l'acquisition

Le signal de déclenchement est un point crucial de la détection. Ce signal va en effet déclencher l'enregistrement de tous les détecteurs du réseau, les antennes comme les scintillateurs. Il est réalisé à partir d'une carte de multiplicité au format VME et développée au LPSC. Cette carte renvoie un signal logique lorsque au moins N signaux sont présents en coïncidence sur les voies d'entrée activées. La taille de la fenêtre temporelle de chacun des signaux activés est de 650 ns ce qui correspond au temps de vol d'une gerbe horizontale qui traverserait le réseau de part en part. Les voies activées et la multiplicité minimale N pour enclencher le trigger sont ajustables. Pour les phases de production, le trigger demande une multiplicité de $N=5$ signaux des 5 antennes centrales mesurant une amplitude en valeur absolue supérieur à 15 mV. Autrement dit, les scintillateurs centraux doivent mesurer en coïncidence un signal compatible avec le passage d'une gerbe pour déclencher l'enregistrement de l'ensemble des instruments de l'expérience CODALEMA-II.

Les câbles d'acquisition des scintillateurs sont reliés à des cartes d'acquisition MATAQ, 4 voies, avec une fréquence d'échantillonnage de 1 GHz et une dynamique de 12 bits. La profondeur d'enregistrement est de 2 μ s. Ces cartes ont été développées par le LAL et le DAPNIA. Elles permettent la digitalisation du signal avec une gamme d'entrée comprise entre -900 et 100 mV.

Afin de suivre en permanence le comportement des stations, les PM hauts-gains de l'ensemble des scintillateurs sont contrôlés en temps réel. Une variation importante par rapport aux 115 coups attendus par seconde induits par les muons atmosphériques (avec le seuil à 15 mV) permet de déceler la défaillance d'un détecteur.

L'analyse des données

Nous allons rapidement expliquer comment, des signaux bruts, on peut remonter à la direction d'arrivée d'une part, et à des informations sur la distribution au sol, le pied de gerbe et l'énergie d'autre part. Les signaux numérisés de chacune des stations sont ajustés par la fonction suivante (Fig. 2.12).

$$V(t) = V_0 + V_{max} \left(\frac{(t - t_0)e}{n \cdot \tau} \right)^n \cdot e^{\left(\frac{-(t-t_0)}{\tau} \right)} \quad (2.3)$$

Les 4 paramètres libres de cet ajustement sont : la ligne de base V_0 , l'amplitude maximum V_{max} , n et τ (liés à la durée du signal). La charge, qui correspond au dépôt d'énergie dans le scintillateur est égale à l'intégrale du signal $V(t) - V_0$. La calibration du détecteur permet de relier cette charge Q à d'autres grandeurs physiques.

- En déclenchant sur les muons atmosphériques, la charge moyenne d'un VEM peut-être calculée. $Q_{VEM} = 0.8 \langle Q \rangle$, avec $\langle Q \rangle$, la charge moyenne déposée par les muons atmosphériques⁵.
- Pendant les phases de production, la calibration de la voie bas gain est réalisée à partir du rapport des charges mesurées sur chacun des deux PM, pour les signaux non saturés.

Les temps du passage de la gerbe dans le détecteur sont obtenus à partir du t_0 des PM hauts-gains, corrigés des délais instrumentaux (longueur de câble, retard de l'électronique) : le retard dû au câble a été

⁵le facteur 0.8 est la correction de l'angle zénithal moyen des muons, $\theta=36.9^\circ$

mesuré, scintillateur par scintillateur, sur le terrain il vaut typiquement 1650 ns. Un retard supplémentaire apparaît dans les PM, lié au temps de formation du signal, il est de l'ordre de 50 ns. Un troisième retard est intrinsèque à la création du trigger par la boîte de multiplicité. Au final, entre le passage d'une gerbe dans le 5ème scintillateur et l'écriture dans le premier canal de la MATAQ, l'écart temporel est d'environ 1770 ns auquel se rajoute le temps de vol de la gerbe entre le dernier scintillateur touché et le centre du réseau, dépendant de l'angle d'arrivée.

La triangulation des signaux étant un élément central de l'expérience CODALEMA, nous allons rappeler son principe. Pour les gerbes atmosphériques, le front d'onde peut-être assimilé à un plan. Nous verrons plus tard que la même hypothèse est faite en radio. La direction d'arrivée de la gerbe (θ , ϕ) et son temps de passage t_{sci} au centre du repère sont évalués en minimisant la quantité :

$$\chi^2 = \sum_i \left(\frac{c(t_{0i} - t_{sci}) - (u.x_i + v.y_i)}{\sigma_i} \right)^2 \quad (2.4)$$

avec u et v les coordonnées du vecteur normal au plan, et x_i , y_i , les coordonnées des détecteurs. Les angles sont ensuite obtenus par les relations

$$\begin{aligned} \theta &= \arcsin(\sqrt{u^2 + v^2}) \\ \phi &= \arctan(u/v) \end{aligned} \quad (2.5)$$

Pour les scintillateurs de l'expérience CODALEMA, l'incertitude résultante est de 1.1 degré⁶ [76]. Indépendamment de toute information concernant les antennes, les distributions des directions d'arrivée des événements détectés par les scintillateurs peuvent déjà être mesurées. Avant de les présenter, nous allons définir les conventions du repère utilisé à CODALEMA (Fig. 2.13) : l'angle zénithal varie entre 0° au zénith et 90° à l'horizon. L'angle longitudinal est compris entre 0° et 360° (0° pour le Nord 90° à l'Ouest 180° au Sud et 270° à l'Est, sens trigonométrique)

La distribution azimutale est globalement plate (Fig. 2.14). Elle est donc en accord avec l'isotropie attendue des directions d'arrivée des rayons cosmiques pour cette gamme d'énergie. Cependant un léger déficit d'événements est visible pour les angles autour de 50°, et un excès apparaît à 150°. Cette légère asymétrie n'est pas représentative d'un réel effet physique mais uniquement de biais expérimentaux. Des délais de propagation imprécisément mesurés pourraient expliquer ces effets. L'évolution de cette asymétrie au cours du temps montre des ruptures qui indiquent clairement qu'elle est due à des interventions sur site (Fig 2.15).

La distribution zénithale est indiquée sur la figure. 2.16. Cette distribution est théoriquement ajustable par la fonction suivante :

$$\frac{dN}{d\theta} = \frac{a \cdot \sin\theta \cos^2\theta}{1 + \exp(\frac{\theta-b}{c})} \quad (2.6)$$

⁶A titre de comparaison, l'expérience Auger possède une résolution angulaire d'un peu moins de 1 degré pour le détecteur au sol, et de 0.6° pour le détecteur de fluorescence. On verra à la fin de ce manuscrit qu'en radio la résolution angulaire est du même ordre de grandeur.

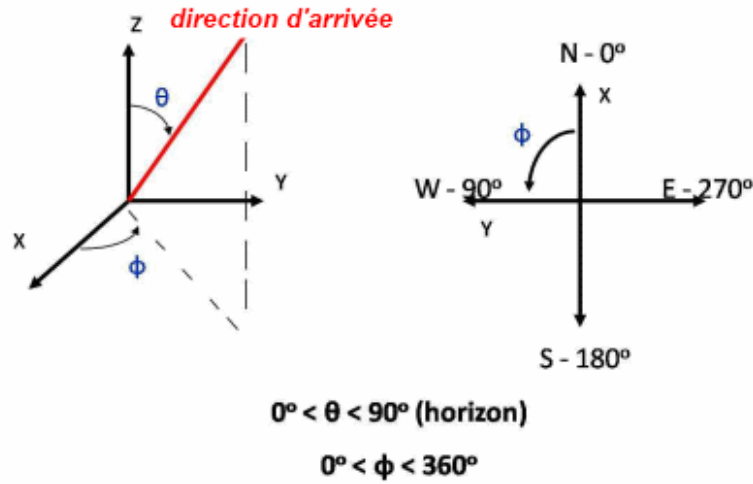


FIGURE 2.13 – Conventions géométriques de l'expérience CODALEMA.

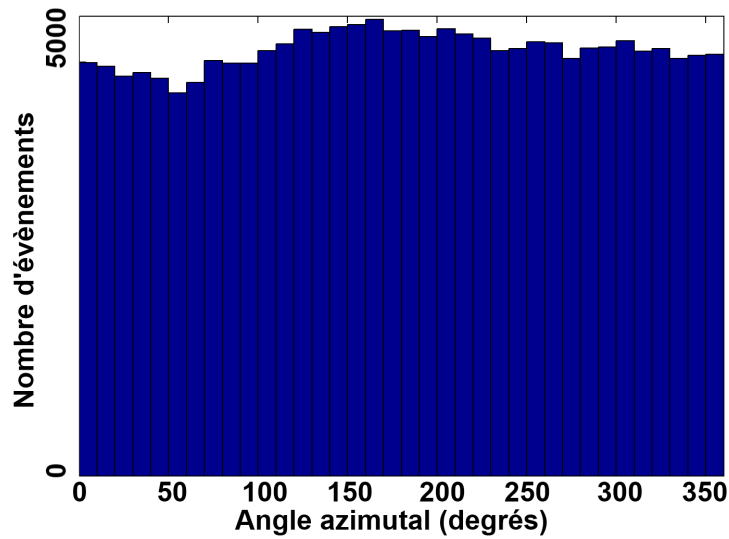


FIGURE 2.14 – Distribution azimutale des directions d'arrivée des événements détectés par les scintillateurs.

- Le facteur en $\sin\theta$ est un effet d'angle solide. Pour un angle solide $d\theta$ donné, la surface de la couronne vue sur le ciel est proportionnelle à $\sin\theta$, c'est-à-dire que la surface effective vue par les scintillateurs est d'autant plus grande qu'on se rapproche de l'horizon.
- Le premier facteur en $\cos\theta$ est dû à la géométrie des scintillateurs dont la surface vue par la gerbe est proportionnelle à l'angle zénithal. Le second facteur de $\cos\theta$ est lié à la surface de l'ensemble du réseau. Il est analogue à la correction précédente, mais à une échelle supérieure.

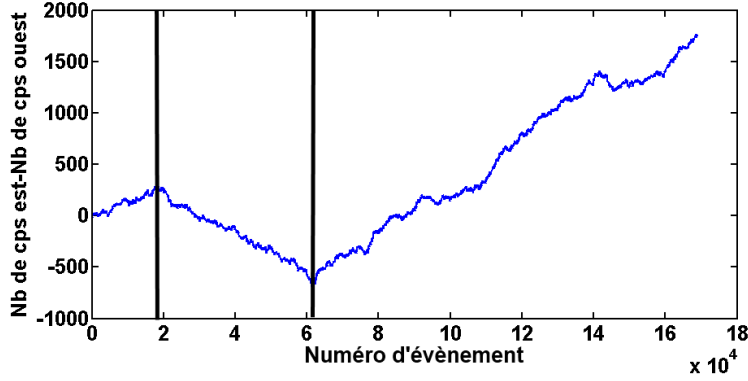


FIGURE 2.15 – Evolution de l'asymétrie Est-Ouest au cours du temps. Des ruptures de pente corrélées à des interventions sur site sont visibles (traits noirs). Pour exemple, le deuxième trait noir indique une correction de problèmes temporels sur les cartes MATAQ. Cette correction a inversé le déficit observé entre Est et Ouest. Notons que l'asymétrie présentée ici est de l'ordre de 2% seulement.

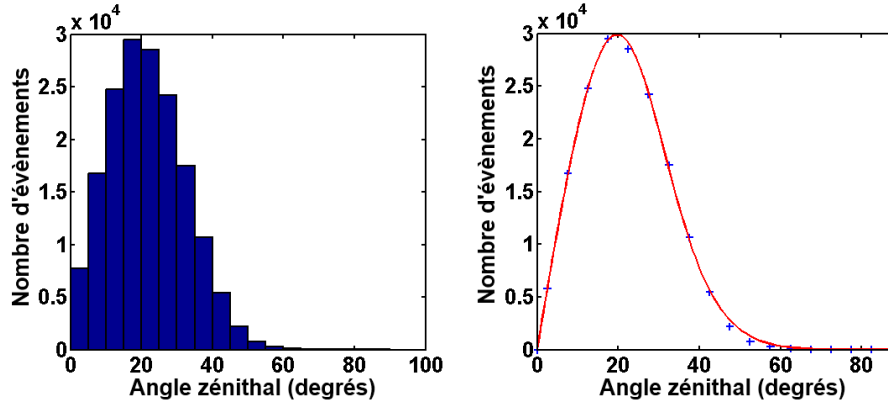


FIGURE 2.16 – A gauche, distribution zénithale mesurée par les détecteurs de particule de l'expérience CODALEMA. A droite, la même distribution ajustée par la fonction de l'équation ci-dessus. On observe que l'ajustement est moins précis à grand angle.

- La fonction de Fermi-Dirac $\Gamma = \frac{a}{1 + \exp(\frac{\theta - b}{c})}$ représente l'effet d'extinction de la composante électromagnétique de la gerbe. La géométrie des détecteurs rend en effet (a fortiori à grand angle d'incidence) les scintillateurs peu sensibles aux muons. Pour les inclinaisons inférieures à $\theta = b$ (dépendant de l'énergie), toutes les gerbes atteignent le sol. Au delà d'un angle b , la probabilité d'extinction sera croissante avec l'angle zénithal. Au final, le taux de détection doit être de 100% pour des valeurs d'angles zénithaux inférieures à $\theta = b$, un amortissement de largeur c autour de cet angle, puis une valeur nulle. La fonction Γ reproduit cette tendance. Elle a trois paramètres libres, a , relié à la population totale d'évènements, b et c . Ils dépendent de l'énergie. Plus l'énergie de la gerbe est importante, plus b va croître. Empiriquement, pour une gamme d'énergie plus élevée, les grands angles zénithaux seront peuplés. Au delà d'une certaine énergie la fonction de

Dirac est égale à 1 pour tous les angles. Cet effet est important pour la suite. On verra en effet que l'énergie seuil des deux détecteurs n'est pas la même. Ainsi la distribution des événements potentiellement détectables par les antennes (c'est-à-dire avec une énergie supérieure au seuil radio) est différente de la distribution globale, toutes énergies confondues, vue par le réseau de scintillateurs. Si l'on prend en compte l'ensemble des gerbes détectées par le réseau au sol à toutes les énergies, on trouve $b=27.1^\circ$ et $c=7.44^\circ$.

La reconstruction de l'énergie est, avec la direction et le temps d'arrivée, la troisième information capitale sur la gerbe. Elle est évaluée grâce à la distribution de charges au sol observée dans le réseau de scintillateurs. La paramétrisation de cette distribution n'est que très peu contrainte si la station recevant le plus de signal est en bord de réseau. On parle pour ces cas d'évènement externe. A contrario, un évènement dit interne permettra d'évaluer l'énergie avec une bonne confiance, car le maximum de la fonction ajustée sera bien contraint. La distribution latérale de l'évènement (la charge mesurée en fonction de la distance à l'axe) est ajustée par la fonction suivante, que nous avons introduite dans le chapitre précédent (équation 1.4).

Par une minimisation des carrés des écarts entre la distribution observée et la distribution modélisée, le nombre de particules N_e et la position du cœur de gerbe particules sont reconstruits. Le critère de centralité appliqué en amont a pour conséquence que les pieds de gerbes reconstruits sont à l'intérieur du réseau et souvent éloignés des stations du bord du réseau. Pour ces événements internes, la globalité des antennes sera située à moins de 300 mètres de l'axe de la gerbe. Ceci est une limitation pour l'étude en énergie des gerbes à grand paramètre d'impact. Seuls des réseaux plus vastes et/ou autonomes en déclenchement permettront cette étude.

La méthode CIC est utilisée pour l'évaluation de l'énergie du primaire, notamment pour l'analyse des données de l'expérience Auger [77]. Cette méthode repose sur une hypothèse : pour une énergie donnée, le flux de rayons cosmiques détectés au sol est isotrope. Ceci peut sembler contradictoire avec l'expression de la distribution zénithale écrite plus haut, pour laquelle apparaît la fonction de Fermi-Dirac reproduisant le phénomène d'extinction de la gerbe. Cependant, l'hypothèse de CIC n'est valide que pour des angles zénithaux faibles (typiquement inférieurs à 50°). Pour ces domaines angulaires, toutes les gerbes dans la gamme d'énergie observée atteignent le sol et le nombre de particules au sol est donné par :

$$N_e(\theta) = N_e(\theta_0) e^{\frac{-X_0}{\lambda} \left(\frac{1}{\cos(\theta)} - \frac{1}{\cos(\theta_0)} \right)} \quad (2.7)$$

qui indique que, pour une gerbe donnée, avec un angle zénithal θ , le nombre de particules au sol $N(\theta)$ est proportionnel au nombre $N(\theta_0)$ de particules pour une gerbe verticale de même énergie ($\theta_0=0^\circ$). Cela est pondéré par un facteur d'atténuation $X_{Nancay} \cdot \frac{1}{\cos(\theta)}$ traduisant la différence d'épaisseur d'atmosphère traversée (X_{Nancay} est l'épaisseur d'atmosphère traversée à Nancay pour une gerbe verticale soit 1035 g.cm^{-2}) et λ , la longueur d'atténuation de la gerbe. Pour l'expérience CODALEMA, cette longueur d'atténuation a été calculée, à partir du flux d'évènements détectés en fonction de la taille de la gerbe N . Elle vaut 189g.

C'est grâce à une simulation AIRES que la calibration entre l'énergie et le nombre de particules au

sol est réalisée. Pour des primaires de type proton⁷, cette calibration peut-être extrapolée par

$$E_{eV} = 2.138 \times 10^{10} . N^{0.9} \quad (2.8)$$

Au final, en rassemblant les deux équations ci-dessus, l'estimateur d'énergie s'écrit comme :

$$E_{eV} = 2.138 \times 10^{10} . (N(\theta) e^{\frac{-X_{Nancay}}{\lambda} (\frac{1}{\cos(\theta)} - 1)})^{0.9} \quad (2.9)$$

Rappelons encore une fois que cette estimation est valable pour des gerbes peu âgées (angle zénithal inférieur à 50°). Au delà, l'hypothèse de la méthode CIC n'est plus vraie : toutes les gerbes n'atteignent pas le sol et la composition des gerbes atmosphériques change (principalement des muons).

Nous venons d'expliquer le principe des détecteurs au sol et comment les informations sur la localisation du pied de gerbe, l'angle d'arrivée et l'énergie étaient obtenues. Ces informations sont capitales pour l'ensemble de l'expérience CODALEMA. Les informations temporelles et angulaires permettent de trouver les coïncidences et les événements vus en radio. L'information sur l'énergie permet l'étude en corrélation avec l'amplitude du signal radio.

2.3.2 Les antennes dipolaires actives

Les détecteurs

Comme nous l'avons expliqué à la fin de la partie consacrée à CODALEMA-I, le changement de l'antenne s'imposait. La nouvelle antenne devait se montrer compacte et relativement peu directive afin de couvrir la plus grande surface de ciel possible, posséder une large bande passante (comprise au minimum entre 10 et 100 MHz), une grande dynamique et une bonne sensibilité afin de ne pas saturer le signal utile dans les bandes de fréquence AM et FM tout en détectant les signaux de faible amplitude associés aux rayons cosmiques. Le laboratoire SUBATECH a donc développé en 2005 une nouvelle antenne dipolaire active qui répondait à ces différentes contraintes expérimentales [78]. Les caractéristiques de cette antenne et de son électronique frontale seront exposées en détails dans une partie dédiée. Par souci de simplicité, le terme de LNA (Low Noise Amplifier) sera utilisé pour parler de l'ensemble de l'électronique frontale. De même, le terme antenne pourra englober le radiateur et son électronique.

Les câbles

Les antennes sont reliées au conteneur centralisant l'acquisition par des câbles (majoritairement de type RG-213). Leur longueur variant d'un dipôle à l'autre, il est nécessaire de corriger le temps du signal de son délai de propagation à travers le câble. La technique pour la mesure de ces retards est la réflectométrie : un signal rapide est envoyé avec un générateur d'impulsions branché à la fois aux câbles des antennes et à une entrée d'un oscilloscope. L'antenne n'étant pas alimentée, le câble n'est pas adapté et renvoie le signal du générateur. On mesure avec l'oscilloscope la différence temporelle entre le pulse initial et son rebond, pour obtenir le retard en temps associé au câble étudié. La prise en compte de ce phénomène est évidemment primordiale pour la reconstruction des directions d'arrivée. L'atténuation du

⁷pour des noyaux de Fer, l'énergie reconstruite est 70% plus élevée

signal dans les câbles, que nous rediscuterons plus bas, doit également être prise en compte. Elle dépend de la fréquence et de la longueur du câble.

La carte de numérisation

Les cartes d'acquisition appelées cartes MATAcq sont schématiquement constituées d'un amplificateur d'entrée, de la puce MATAcq, et d'un convertisseur ADC (Fig. 2.17).

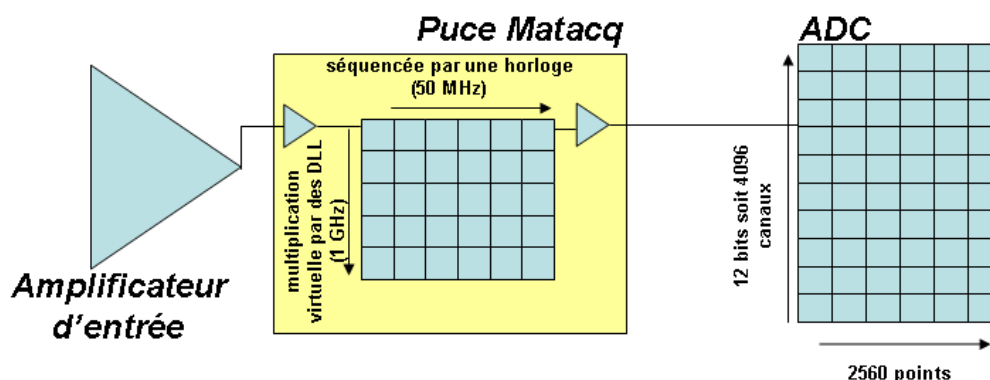


FIGURE 2.17 – La carte MATAcq est formée de 3 composants principaux. Un amplificateur d'entrée, la puce MATAcq (mémoire tournante + amplificateurs), et un ADC.

Le signal radio est continuellement échantillonné dans la puce MATAcq à une fréquence F_e réglable (ici 1 GHz), dans une mémoire analogique circulaire, sur 2560 condensateurs. En réalité, elle est séquencée par une horloge pilote de fréquence 50 MHz, et il n'existe pas de signal de fréquence plus élevée. C'est un avantage pour les systèmes autonomes en énergie car cela donne une faible consommation au système. La multiplication virtuelle de fréquence à l'intérieur de la puce MATAcq est réalisée par des Delay Locked Loops (DLL), agissant comme des câbles à retard de 1 ns. Ainsi une puce MATAcq est schématiquement constituée de 128 colonnes de 20 DLL. A chaque période d'horloge (50 MHz), le pointeur se décale sur une nouvelle colonne. Une fois la dernière colonne atteinte, et remplie, il attaque à nouveau la première colonne. La fréquence d'échantillonnage est donc de 1 GHz.

Les cartes MATAcq possèdent des ADC codant sur 12 bits, et une dynamique de 1V soit un LSB de 0.244 mV, résolution plus importante que les 8 bits-4Volts (LSB=16 mV) des oscilloscopes utilisés précédemment. Cela permet de s'affranchir du filtre analogique 23-83 MHz. Les signaux numérisés par les MATAcq sont enregistrés sur 2520 pts. Ainsi la durée totale d'un échantillon est de 2.520 μ s. La numérisation des signaux est déclenchée par une voie de trigger externe provenant de la carte de multiplicité des scintillateurs.

Le PC d'acquisition

Le fonctionnement de ces cartes MATAcq est piloté via une liaison GPIB par un logiciel d'acquisition Labview dédié et installé sur un PC d'acquisition dans le conteneur (Fig. 2.18). Celui-ci est accessible depuis l'extérieur par un logiciel de type VNC, permettant de modifier la partie logicielle de l'expérience.

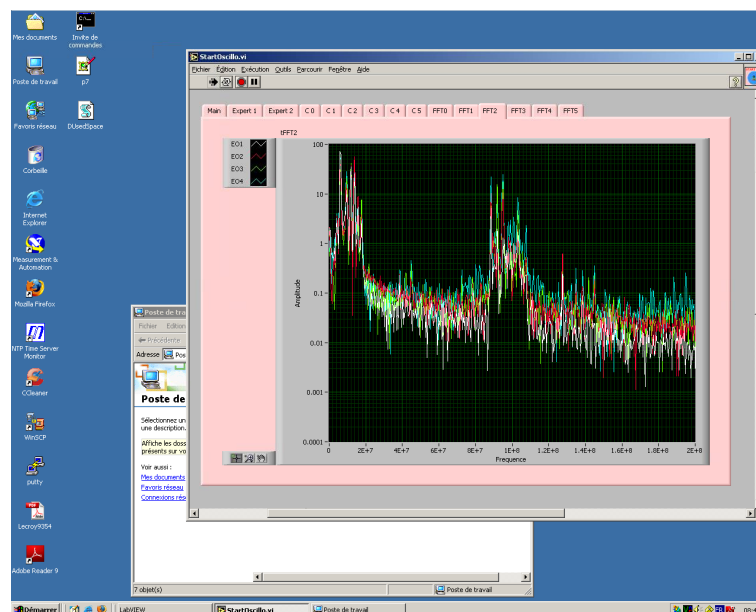


FIGURE 2.18 – Capture d'écran du PC d'acquisition antennes

Le monitoring en temps réel

Depuis peu, une page web permet la visualisation en temps réel des principales caractéristiques de l'expérience (Fig. 2.19). Elle permet de vérifier rapidement que l'expérience est pleinement fonctionnelle, notamment sur les points suivants :

- Le taux de déclenchement sur la dernière heure, le dernier jour, et le dernier mois.
- Les spectres, signaux bruts et signaux filtrés du dernier évènement permettent de déceler une panne au niveau des antennes, ou des cartes d'acquisition
- Les taux de remplissage des disques durs permettent de gérer en conséquence les interventions sur les PC pour libérer de l'espace disque et maintenir l'expérience fonctionnelle.

La création des fichiers de monitoring est réalisée par des scripts shell pour le suivi du taux de trigger, l'identification du dernier évènement, le taux de remplissage, etc. Des programmes C++ sont utilisés pour la réalisation des filtrages. L'ensemble de ces routines se fait directement sur les données brutes.

Le traitement des données

Deux PC différents sont utilisés pour les antennes et les scintillateurs. Si le trigger est commun, les données scintillateurs et antennes sont traitées de manières indépendantes. La précision de la datation des évènements est de quelques centièmes de seconde, largement inférieure au temps moyen entre deux déclenchements qui est de l'ordre de 20 min (Fig. 2.20), il est aisé de trouver les évènements communs des

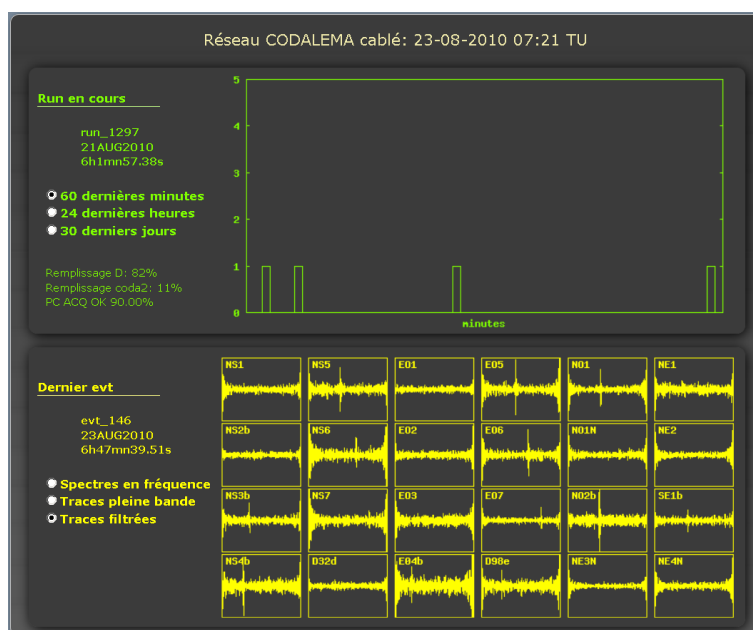


FIGURE 2.19 – La page WEB de monitoring de l’expérience. Ici, le dernier évènement est associé au passage d’une gerbe détectée par les antennes du réseau.

deux réseaux. Il arrive cependant que des évènements ne puissent être associés. Les DAQ étant complètement dissociées, elles possèdent des périodes de temps mort différentes (dû à des pannes, changements de run).

Lorsqu’un évènement est enregistré sur le réseau d’antennes, un fichier texte est créé sur le PC d’acquisition. Il comprend notamment un en-tête et, pour chaque antenne, les 2520 points d’échantillonnage de temps et tensions associées.

Les évènements sont organisés en ‘run’ de plusieurs centaines d’évènements. Ce dernier nombre a varié afin de conserver une durée de run d’environ une semaine. Ainsi, il est passé de 1600 évènements pour la phase à 17 scintillateurs, et un taux de trigger d’un évènement toutes les 7 minutes à 400 évènements pour la phase actuelle (un évènement toutes les 20 minutes). Entre chaque run, les paramètres d’acquisition peuvent être modifiés (type de trigger). De plus, à la fin d’un run, les fichiers sont tarés, puis zippés, avant d’être transférés sur différents serveurs. Une fois sur les disques locaux de SUBATECH, les fichiers de données brutes sont disponibles pour les analyses.

Un problème rencontré récemment concerne la taille et surtout le nombre de ces fichiers. Le format 1 fichier texte pour 1 évènement est certes pratique mais peu adapté et peu optimisé pour le stockage de données. Chaque fichier a une taille de 2 Mo. Pour un run typique de 1600 évènements, la taille totale du dossier passe donc à 3 Go, et 1600 fichiers. Lors des analyses en détection autonome sur lesquelles nous reviendrons plus tard, plusieurs dizaines de runs peuvent être rapatriés en quelques jours, et surcharger les disques. Il a donc été mis en place un processus de réduction de la taille et du nombre de fichiers. Ce ‘régime’ ne doit passer par aucune perte d’information d’importance. Pour résumer, la taille des fichiers initiaux est utilisée à moitié par les données en temps et pour l’autre moitié, par les données en amplitude du signal. Les autres données utilisent un espace négligeable.

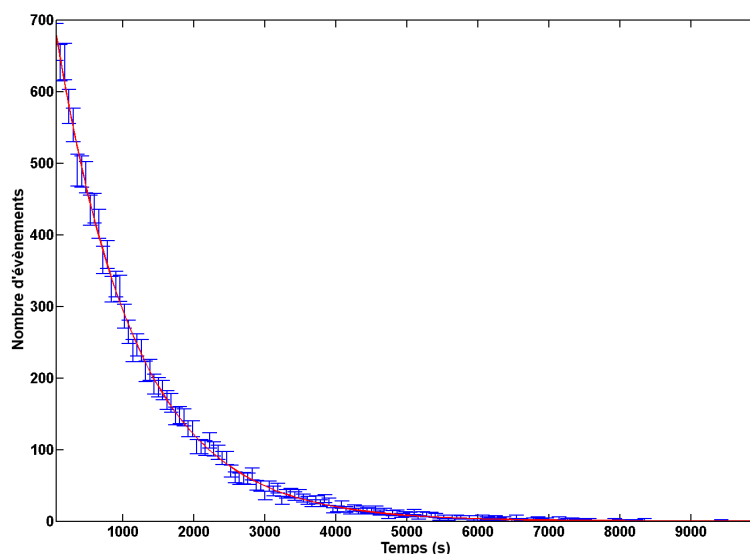


FIGURE 2.20 – Distribution des temps entre deux déclenchements consécutifs ajustée par une loi de Poisson avec une espérance de 20 min.

- Les données sont enregistrées dans une seule variable Matlab. Un seul fichier (au lieu de 1600) pour chaque run. Le format de données de Matlab divise par deux la taille des données pour des données enregistrées sur 8 octets. En les enregistrant sur 4 octets, le gain est d'un facteur 4.
- L'échantillonnage est d'exactly 1 ns. Ainsi, il suffit d'enregistrer la valeur en temps du premier pas d'échantillonnage de chaque antenne. En effet, cette première valeur est sujette à fluctuation, et varie d'un événement à l'autre. Au final, la taille des données temporelles devient négligeable. On a encore divisé par un facteur 2 la taille des données. Les valeurs en temps des 2519 points d'échantillonnage peuvent aisément être calculées pour les routines.

Ainsi la taille des fichiers est divisée par un facteur 8. De plus de 1600 fichiers, on passe à une unique variable Matlab contenant 4 matrices (noms des antennes, date de l'évènement, valeur en temps du premier pas d'échantillonnage, et amplitude des signaux).

A partir de ces fichiers bruts, textes ou variable Matlab, l'analyse des données peut démarrer. Rappelons rapidement ses objectifs

- Mettre en évidence des impulsions associées à des rayons cosmiques. Deux étapes seront nécessaires pour cela. Il faudra d'abord supprimer les émetteurs AM et FM en réalisant un filtrage en dehors de ces bandes de fréquences. Ensuite, rechercher une impulsion dans l'échantillon filtré.

- Déterminer l'amplitude de ce signal, corrigé des effets de câbles, afin de pouvoir comparer, pour un événement donné, l'amplitude des signaux entre les antennes. Pour cette première étape de l'analyse des données, les corrections de lobe, et de réponse d'antenne ne seront pas réalisées. Elles seront indispensables par la suite notamment pour la confrontation de différents événements, avec des directions d'arrivée a priori différentes (corrélation en énergie, ...) Pour un événement pris individuellement, le rayon cosmique vient en première approximation de la même direction pour toutes les antennes. La correction en lobe sera identique pour toutes les antennes.
- Corriger les retards induits par les câbles, différents pour chaque antenne, afin de trianguler le signal.
- Sélectionner les événements 'candidats' à une détection radio de gerbe atmosphérique, en confrontant les données radios et scintillateurs. La comparaison du temps de passage de la gerbe au centre du réseau et sa direction d'arrivée sont les deux critères de coupure.

Le filtrage en fréquence et la correction de l'atténuation dans les câbles sont réalisés en une seule étape. Ces deux corrections nécessitent en effet de se placer dans le domaine fréquentiel (Fig. 2.21). A quelques très rares exceptions près, d'événements radio particulièrement puissants, il est illusoire de penser détecter un signal associé à un rayon cosmique dans le spectre large bande enregistré par les antennes. Le filtrage doit donc impérativement supprimer les bandes des fréquences des émissions AM (1-20 MHz) et FM (87.5-108 MHz). Comme nous l'avons précisé au début de ce chapitre, la bande de fréquence la plus adaptée à la radio-détection, sur le site de Nançay se situe entre 24 et 82 MHz.

Le filtre utilisé est un filtre rectangulaire. Etant non causal, il n'induit aucun retard en temps⁸. Ce filtrage numérique n'est pas sans défaut. Il cause par exemple, lors du retour dans l'espace temporel l'apparition d'oscillations en sinus cardinal (transformée de Fourier d'un signal porte), au début et à la fin du signal. C'est le phénomène d'oscillations de Gibbs. L'amplitude de ces oscillations varie fortement d'un événement à l'autre et peut devenir plus importante que celle du signal recherché. Ainsi les 300 ns des extrémités de chaque signal sont ignorées dans la suite de l'analyse. Nous verrons que cette réduction ne pénalise que très peu la prise de données (une impulsion au début ou à la fin du signal MATACQ ne pourra être retrouvée). Dans le cas contraire, il est possible d'appliquer une fenêtre Tukey au signal temporel brut, afin de lisser artificiellement le début et la fin du signal vers une amplitude nulle limitant le phénomène oscillatoire et permettant de rechercher l'impulsion dans tout l'échantillon.

La recherche et le marquage des impulsions constituent l'étape suivante de l'analyse. Dans chacun des signaux filtrés des antennes, une impulsion va être recherchée. Elle pourrait signer le passage radio d'une gerbe atmosphérique sur le détecteur. Au final, deux informations vont être obtenues. La présence ou non d'une impulsion, et, si elle existe, son temps et son amplitude associés. Cette recherche d'impulsion peut se faire de deux manières différentes :

- par une méthode classique par seuil

⁸Les maximums de l'impulsion entre le signal brut et le signal filtré peuvent cependant être décalés. Le filtrage joue en effet le rôle d'une dérivation en temps du signal. La position du maximum du signal filtré sera proche de celle de la pente maximale du signal brut.

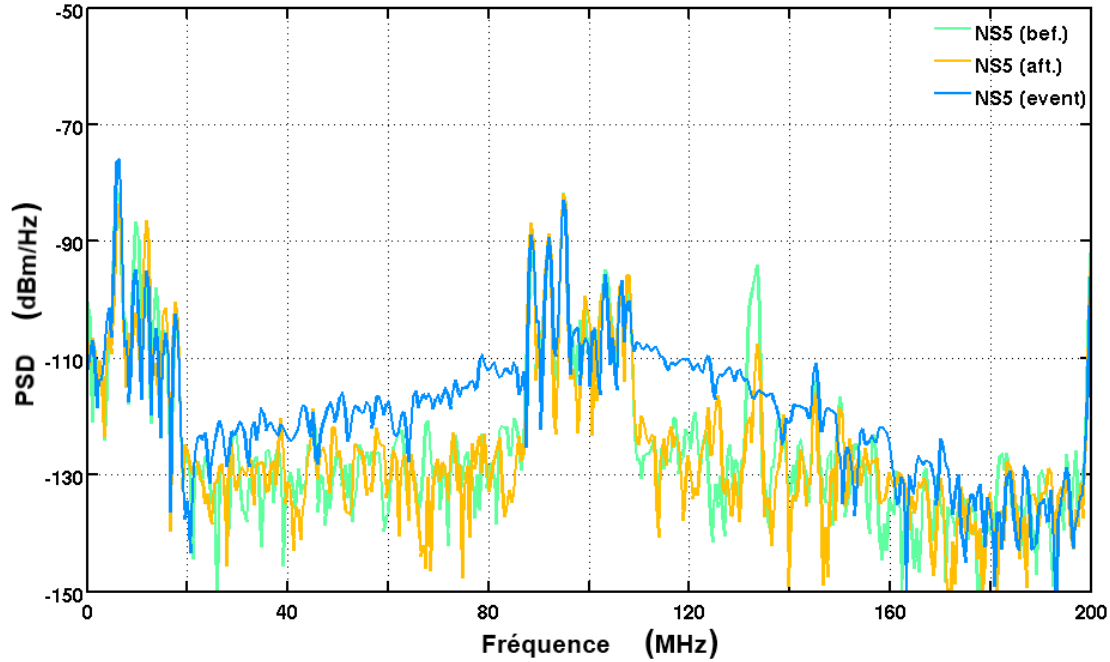


FIGURE 2.21 – Spectres en fréquence de deux évènements typiques enregistrés à CODALEMA, et d'un évènement particulièrement puissant (et rare). Pour ce dernier on remarque que le spectre est en première approximation très proche de celui de la réponse d'antenne.

- par une méthode plus élaborée, dite LPC, utilisée pour la recherche du signal dans les données actuelles.

La méthode par seuil permet de retrouver une impulsion, induite par le passage d'une onde électromagnétique sur le détecteur, supérieure au bruit dans le reste du signal. La validation de sa présence se fait en plusieurs étapes.

- Le maximum du signal au carré est recherché V_{max}^2
- Une fenêtre de 200 ns est fixée autour de ce maximum. Elle comprend l'ensemble de l'éventuelle impulsion filtrée associée à un rayon cosmique.
- En dehors de cette fenêtre le bruit du signal $\mu_b = \langle V^2 \rangle$ et son écart type $\sigma_b = \sqrt{\langle (V^2 - \mu_b)^2 \rangle}$ sont calculés.
- Un seuil de détection est fixé $seuil = k \cdot \mu_b$. La valeur du paramètre k est importante. Trop haute, des signaux associés aux gerbes ne pourront être détectés, le lot de données sera plus faible, les distributions latérales de champ moins bien reconstruites. Trop basse, la détection d'impulsions fortuites, et/ou non corrélées à une gerbe devient importante. La valeur du paramètre k a été fixée à 25 afin de ne tomber dans aucun de ces deux excès. En valeur absolue, le signal doit donc être supérieur à 5 fois le bruit pour être détecté et marqué.

La mise en œuvre de la méthode LPC plus élaborée, plus pertinente et plus efficace, a été développée au cours de la thèse de Sandra Valcarès à SUBATECH [79]. Cette méthode LPC (pour Linear Predicting Coding) permet d'éliminer des émetteurs parasites qui peuvent apparaître dans la gamme de fréquence de filtrage. En effet, bien que celle-ci soit réduite à une bande comprise entre 23 et 82 MHz, il n'est pas exclu que des émetteurs locaux, ponctuels en temps, apparaissent et puissent, dans le cadre de la première méthode causer une impulsion marquée comme un candidat gerbe. Ces émetteurs sont l'une des raisons de la valeur de seuil relativement élevée utilisée précédemment. Ainsi, la méthode LPC permet de mettre en évidence des signaux de plus faibles amplitudes que dans le cadre de la méthode par seuil. Cette méthode se base donc sur la prédiction du signal. Elle prend l'hypothèse, qu'en dehors de l'impulsion, chaque point $x(k)$ du signal est une combinaison linéaire d'un certain nombre de points qui le précèdent. La valeur prédite par le signal est donc :

$$x_p(k) = \sum a_i x(k-i) \quad (2.10)$$

avec a_i les coefficients du LPC. L'erreur entre la prédiction et le signal réel devient :

$$e(k) = x(k) - x_p(k) \quad (2.11)$$

Lors d'un premier passage le LPC 'apprend' le signal et calcule les coefficients du filtre. Pour cela, une minimisation est réalisée sur la distance totale entre la prédiction et le signal pour l'ensemble du signal. Ensuite, une méthode par seuil est utilisée, non pas sur le signal $x(k)$ (cas de la première méthode), mais sur $e(k)$, soit la différence du signal à sa prédiction. Deux paramètres libres sont à définir :

- Le nombre de coefficients : Trop élevé, la méthode va apprendre sur l'ensemble du signal y compris l'impulsion pour l'ensemble des points de l'échantillon. L'impulsion elle-même est prédite et la différence au signal ne la met plus en évidence. Trop bas, les émetteurs ne sont pas assez bien prédits. Expérimentalement, la méthode LPC est la plus efficace pour $N=400$ échantillons.
- Le choix du seuil pose les mêmes difficultés que pour la première méthode. Trop haut, il empêche la détection de signaux réels associés à des cosmiques. Trop bas, il cause le marquage d'événements fortuits. Une valeur de $13 \times \mu$ du signal prédit est un bon compromis.

Cette méthode appliquée à un lot test a montré qu'elle permettait la mise en évidence de 30% de gerbes atmosphériques radiodétectées supplémentaires. Inversement, 3% des événements détectés par la méthode seuil ne le sont pas par la méthode LPC. Ainsi, et bien que la méthode basée sur la prédiction du signal soit indiscutablement plus efficace, les deux méthodes sont utilisées conjointement. De plus, l'évaluation de l'amplitude du signal maximum ne peut-être faite par la méthode LPC. Elle se fait sur les signaux filtrés numériquement, au temps prévu par la méthode LPC.

Les signaux filtrés et corrigés sont disponibles pour la suite des analyses. A partir de signaux bruts large bande, les corrections d'atténuation et de retard dans les câbles ont été effectuées. Les impulsions ont été marquées en temps et en amplitude (Fig. 2.22)

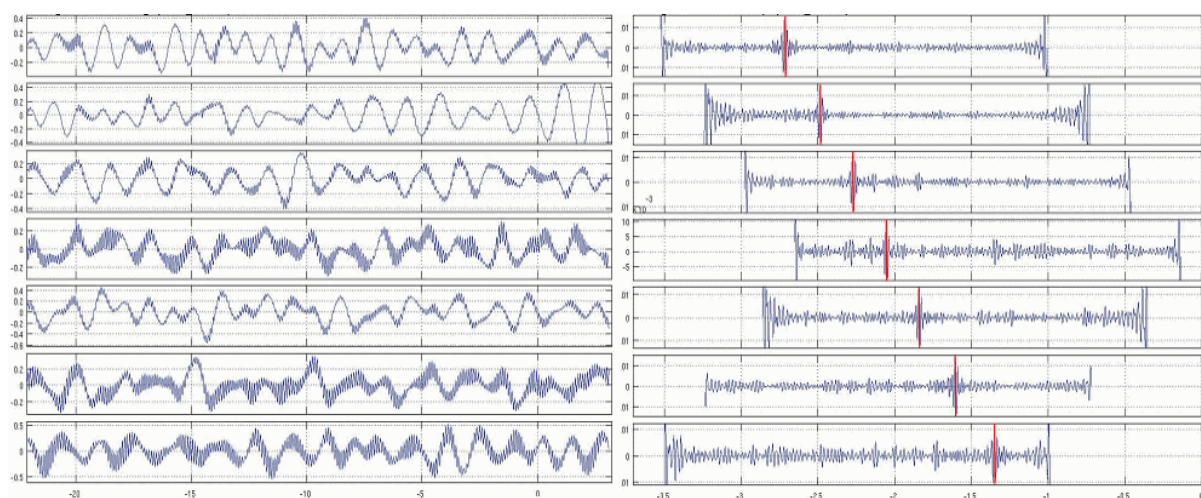


FIGURE 2.22 – Exemple de filtrage sur un évènement de CODALEMA. A gauche le signal brut. Les oscillations associées aux bandes AM et FM apparaissent clairement. A droite, une fois le signal filtré les impulsions sont identifiables. Les phénomènes oscillants en début et fin d'échantillon sont également visibles et valident le choix d'ignorer les 300 ns à l'extrémité des signaux pour la recherche d'un maximum.

La configuration du réseau

C'est en octobre 2005 que la deuxième phase de l'expérience CODALEMA est entrée en fonctionnement. Plusieurs changements ont été réalisés dans la disposition et le nombre de détecteurs ainsi que dans le processus de déclenchement. Sans rentrer dans les détails de chacune de ces configurations nous allons les lister.

- Octobre 2005 : La phase de transition entre CODALEMA-I et CODALEMA-II commence. Les 7 antennes log-périodiques sur la ligne Est-Ouest sont toujours en fonctionnement. Les 4 scintillateurs du LAL fournissent toujours le trigger de l'expérience. Une ligne Nord-Sud, constituée de 7 antennes dipôles est déployée. 5 stations de détection de particules du LPSC sont installées. Elles créent leur propre déclenchement afin de s'assurer une compatibilité avec celui fourni par les scintillateurs du LAL. Dorénavant, et excepté pour 2 antennes log-périodiques, l'acquisition des évènements est réalisée par des cartes d'acquisition MATAcq. Ainsi le filtre analogique 23-82MHz, nécessaire pour la dynamique trop faible des oscilloscopes utilisés précédemment, devenait obsolète et pouvait être retiré des antennes log-périodiques.
- Octobre 2006 : Les 7 antennes log-périodiques sont remplacées par des dipôles. 2 dipôles croisés sont également mis en place. 4 scintillateurs supplémentaires du LPSC sont installés, portant leur total à 9. Le déclenchement des deux réseaux est dorénavant fourni par ces scintillateurs. L'ensemble de l'acquisition est réalisé par des cartes MATAcq. C'est le début de la phase CODALEMA-II
- Janvier 2007 : Le réseau de scintillateurs passe à 13 détecteurs.

- Juillet 2007 : Le dipôle croisé est séparé en deux antennes réparties sur le terrain.
- Octobre 2007 : 8 nouvelles antennes dipolaires sont déployées sur le terrain, portant leur total à 24. Elles permettent de densifier le centre du réseau.
- Janvier 2008 : 4 scintillateurs supplémentaires sont installés. Il y a dorénavant 17 détecteurs au sol.
- Juillet 2009 : Les 4 stations entourant le scintillateur central sont retirées. Cela ne pénalise pas fortement la détection radio. En effet, le seuil de détection radio est supérieur à celui des particules. Bien que le taux de déclenchement soit trois fois moindre (environ une fois toutes les 20 minutes), les événements particulièrement énergétiques (et donc radiodétectés) sont conservés. Cependant, la résolution en énergie est abaissée.

C'est sur les cinq dernières phases qu'a principalement porté ce travail de thèse. Résumons la dernière configuration (Fig. 2.24).

- 14 antennes dipolaires forment une croix de 700 par 600 mètres selon les axes Nord-Sud et Est-Ouest. 10 antennes supplémentaires (8 dipôles, et 2 antennes papillons, prototypes des antennes utilisées sur les stations autonomes dont nous parlerons plus tard) sont réparties autour du centre de réseau afin de densifier celui-ci.
- 13 scintillateurs permettent le déclenchement et une mesure, indépendante des dipôles, des caractéristiques de la gerbe (énergie, temps et direction d'arrivée)
- 1 conteneur d'acquisition avec cartes MATAQ et deux PC d'acquisition, reliés à différents serveurs pour le stockage des données.

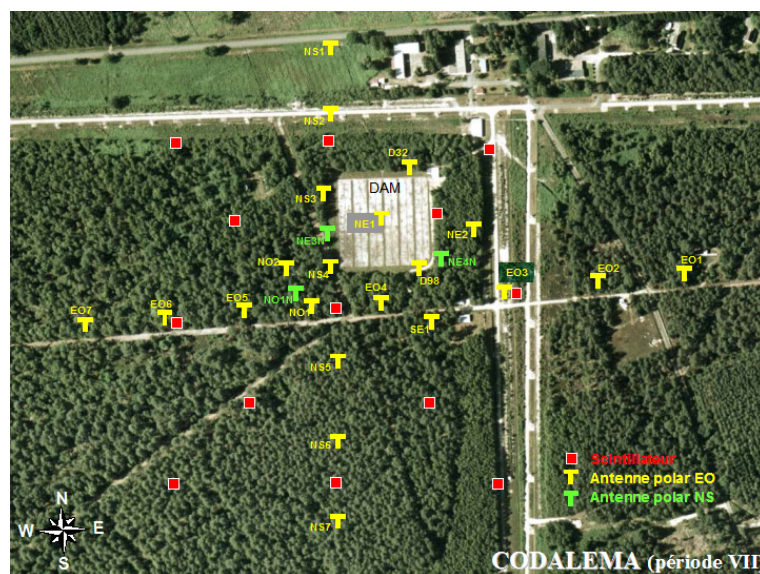


FIGURE 2.23 – Configuration de l'expérience au 1er janvier 2010



FIGURE 2.24 – A gauche : une antenne du bras Est-Ouest et un scintillateur sous sa bâche plastique protectrice. A droite : une antenne sensible à la polarisation Nord-Sud du champ. Sont également visibles : le conteneur (au fond), le réseau du DAM et l’ancien abri métallique d’un scintillateur du LAL.

2.3.3 Le signal radio au long de la chaîne expérimentale

Nous allons maintenant présenter en détail la propagation du signal radio à travers la chaîne expérimentale, ce qui va nous permettre d’introduire un certain nombre de concepts utiles pour la suite de ce manuscrit. La chaîne expérimentale à prendre en compte pour passer d’un champ électrique ε à un signal mesuré V en sortie d’acquisition est représentée dans la figure 2.26 . Elle comprend le radiateur (qui permet d’introduire les concepts de fréquence de résonance f_0 , longueur effective L_{eff} et d’impédance d’antenne Z_{ant}) qui va principalement fixer le diagramme de réception de l’antenne et sa sensibilité de polarisation, le LNA dédié (à travers la fonction de transfert $H(f)$ et le gain $A(f)$) qui assure la large bande passante de l’antenne avec une bonne linéarité et un bruit faible, le câble (qui induit une certaine atténuation du signal, $Att(f)$), et enfin la carte d’acquisition MATAcq qui permet la numérisation du signal, et que nous convertirons en spectre en fréquence, tel que mesuré par un analyseur de spectres.

Une antenne convertit un champ électrique ε en une différence de potentiel V_{out} . La simulation de la réponse d’antenne est complexe, et doit être réalisée par des logiciels de simulation sur lesquels nous reviendrons plus tard. Cependant, pour certains cas limites, des modèles relativement simples peuvent être construits, et les grandeurs calculées de manière analytique. Nous allons en présenter quelques-uns.

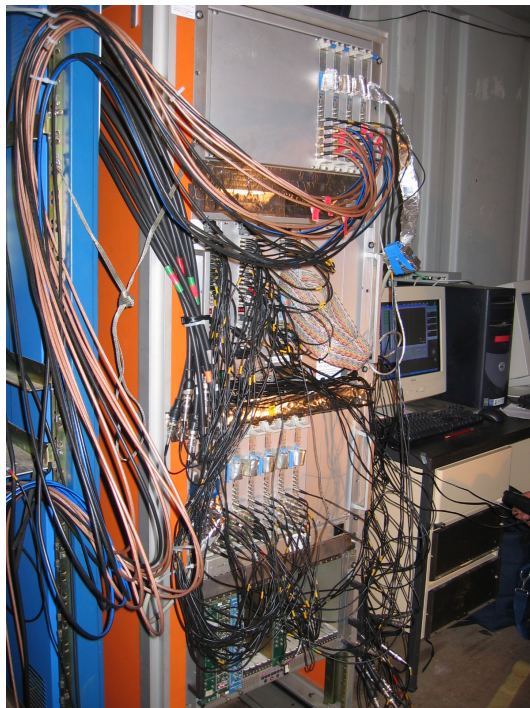


FIGURE 2.25 – Intérieur du conteneur abritant l’acquisition de l’expérience CODALEMA-II. Au premier plan les cartes MATAcq et trigger. Quelques câbles discrets sont visibles. Au second plan, les PC d’acquisition, pour les scintillateurs et les antennes.

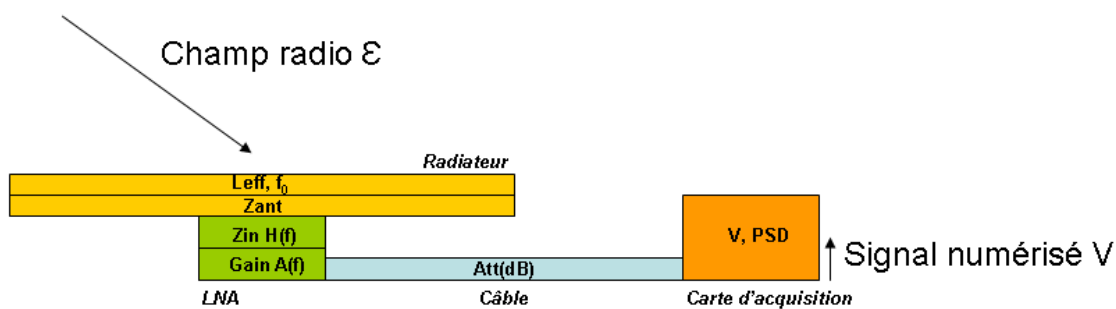


FIGURE 2.26 – Schéma équivalent de la chaîne expérimentale entre le radiateur d’antenne, recevant un champ radio ε et la carte d’acquisition renvoyant une tension V .

Le radiateur d'antenne : fréquence de résonance, longueur réelle, et longueur effective

Pour une antenne dipolaire de longueur L , la fréquence de résonance est de :

$$f_0 = \frac{c}{2L} \quad (2.12)$$

C'est l'analogie de la corde de violon. La fréquence de résonance est atteinte quand la longueur de l'antenne vaut la moitié de la longueur d'onde. L'objectif est d'obtenir une réponse en fréquence relativement plate de l'antenne. f_0 doit donc se situer en dehors de la bande d'observation comprise entre 10 et 100 MHz. Par ailleurs, comme on le verra dans les simulations, les antennes actives sont efficaces au-dessous de la fréquence de première résonance. Un bon compromis est une fréquence de résonance de 125 MHz, soit une longueur de 1.2 m. Dans la réalité, la fréquence de résonance est un peu plus basse, car l'antenne n'est pas infiniment fine. Pour le dipôle de CODALEMA-II, la fréquence de résonance simulée en champ libre est de 110 MHz. Dans le cas d'un sol parfait jouant le rôle d'un réflecteur, la fréquence de résonance passe à 120 MHz.

L'antenne dipolaire n'est logiquement sensible qu'à la composante de polarisation du champ parallèle à son orientation. Pour la suite de l'exposé, on fera donc l'hypothèse que le champ à mesurer est polarisé parallèlement au dipôle. Un champ électrique ϵ induit sur le terminal d'antenne une tension V_{ant} obtenue à partir de la longueur effective de l'antenne : L_{eff} . La longueur effective de l'antenne est donc exprimée en mètres afin de conserver une dimension homogène.

$$V_{ant} = L_{eff} \cdot \epsilon \quad (2.13)$$

La longueur effective de l'antenne est définie par :

$$L_{eff} = \int_{-L/2}^{L/2} \frac{I(z)}{I_0} dz \quad (2.14)$$

C'est l'intégrale de courant dans le dipôle. Cette distribution varie, pour une antenne en champ libre, entre une sinusoïde, à la résonance, et une forme triangulaire, loin de f_0 (Fig. 2.27). A partir de l'intégrale, on trouve qu'à basse fréquence, loin de la fréquence de résonance, $L_{eff} = \frac{L}{2}$. Pour $f=f_0$, la longueur effective est de $\frac{2L}{\pi}$. On peut également remarquer que la longueur effective (et donc la tension V_{ant}) est proportionnelle à la longueur réelle de l'antenne. Dit autrement, plus l'antenne sera longue plus la tension mesurée sera grande (et plus sa fréquence de résonance sera basse).

Le radiateur d'antenne : impédance d'antenne

Une antenne peut être électriquement modélisée par la mise en série d'une tension d'entrée V_{ant} précédemment introduite et d'une impédance d'antenne $Z_{ant}(f)$. L'impédance d'entrée⁹ de toute antenne (hors amplificateur) est exprimable par :

$$Z_{ant}(f) = R_{ant}(f) + j.X_{ant}(f) \quad (2.15)$$

⁹Dans la littérature, on parle d'impédance d'entrée car on utilise le plus souvent le cas d'une antenne en émission

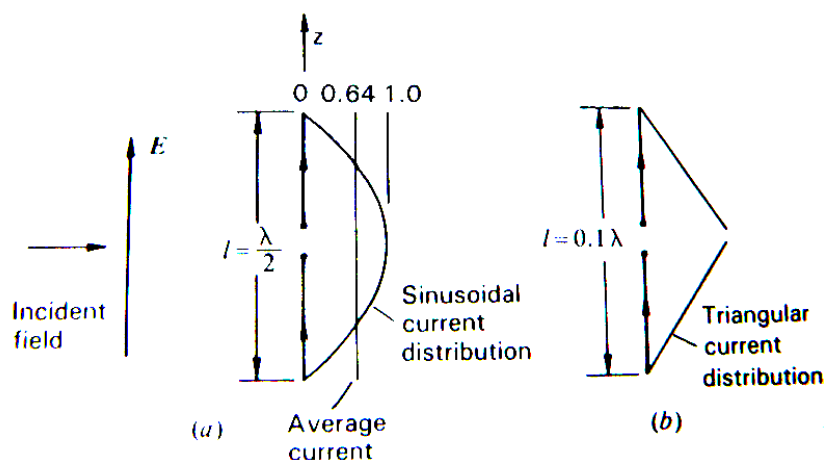


FIGURE 2.27 – Intégrales de courant dans le dipôle à la fréquence de résonance et à basse fréquence. La longueur effective, liée au gain de l'antenne varie légèrement. Figure tirée de [80]

dans un modèle simplifié (valable autour de la résonance et au-dessous), l'impédance de l'antenne peut-être modélisée par la mise en série d'une résistance de rayonnement, d'une capacité et d'une inductance. C'est le modèle '2 pôles, 1 zéro' Ainsi :

$$Z_{ant}(f) = R_{ant}(f) + j \cdot (L_{ant} \cdot 2\pi \cdot f - \frac{1}{C_{ant} \cdot 2\pi \cdot f}) \quad (2.16)$$

Largement au-dessous de la fréquence de résonance, une bonne approximation de la partie résistive, dans le cas d'une antenne en champ libre (c'est-à-dire sans sol¹⁰) est la suivante [80] :

$$R_{ant}(f) = 20 \cdot (\pi^2 \frac{L \cdot f}{c})^2 \quad (2.17)$$

En extrapolant à la fréquence de résonance, c'est à dire largement en dehors du domaine de validité de ce modèle, on trouve $R_{ant}=50$ ohms. En réalité, la partie réelle de l'impédance d'un dipôle fin à la résonance vaut 75 ohms. A petite fréquence la résistance de rayonnement de l'antenne tend vers 0. Quant à la partie imaginaire de l'impédance, elle est capacitive à basse fréquence, puis inductive au-delà de la première résonance. Autrement dit, pour une fréquence largement inférieure à f_0 , l'antenne est équivalente à la mise en série d'une source de tension d'entrée et d'une capacité.

La capacité C_{ant} est intrinsèquement liée à la géométrie de l'antenne. La capacité d'un monopole cylindrique, de longueur L et de rayon a vaut [81] :

$$C_{mon} = \frac{2\pi\epsilon_0 L}{\ln(\frac{L}{a})} \quad (2.18)$$

La capacité d'un dipôle de mêmes dimensions est moitié moindre, soit :

¹⁰Dans le cas d'un sol parfait, R_{ant} varie en f^4 , traduisant le couplage avec une antenne virtuelle. C'est cet effet qui donne une fréquence de résonance différente en sol parfait ou en champ libre.

$$C_{ant} = \frac{\pi \epsilon_0 L}{\ln\left(\frac{L}{a}\right)} \quad (2.19)$$

Il nous reste à évaluer l'inductance L_{ant} du dipôle. A la résonance, la partie imaginaire de l'impédance d'antenne Z_{ant} est nulle. Autrement dit :

$$\begin{aligned} X_{ant} = 0 &= L_{ant} \cdot 2\pi \cdot f - \frac{1}{C_{ant} \cdot 2\pi \cdot f} \\ L_{ant} &= \frac{1}{4\pi^2 \cdot C_{ant} \cdot f_0^2} \\ \omega_0 = 2\pi \cdot f_0 &= \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{LC}} \end{aligned} \quad (2.20)$$

Dans le modèle 2 pôles-1 zéro, le facteur de qualité Q , largeur de résonance à 3 dB autour de f_0 , vaut :

$$Q = \frac{L\omega_0}{R} = \frac{1}{2\pi \cdot R_{ant}} \sqrt{\left(\frac{L_{ant}}{C_{ant}}\right)} \quad (2.21)$$

Cette grandeur sera d'autant plus faible que C_{ant} sera grand. La résonance sera bien marquée. Ainsi en dehors de la fréquence de résonance f_0 , la réponse d'antenne sera plus plate. Par ailleurs, les pertes ohmiques seront également réduites en augmentant la taille de l'antenne (et donc sa capacité). Une largeur de dipôle de $l=11$ cm, donne un rayon équivalent pour le dipôle cylindrique de $a=2.75$ cm, par l'équivalence $a = 0.25 \times l$ ([82]). On trouve une capacité de l'ordre de 8.8 pF, et donc $L_{ant}=200$ nH avec l'égalité précédente.

Maintenant que les caractéristiques de notre antenne sont fixées (longueur, résistance, capacité et inductance), nous allons pouvoir comparer l'impédance de l'antenne en fonction de la fréquence, pour le cas analytique de notre modèle simple valable à basse fréquence et jusqu'à f_0 , et les résultats simulés par un logiciel dédié, 4nec2 [83]. Ce dernier utilise la méthode des moments pour déterminer la distribution de courant sur l'antenne [80]. Pour cette étude nous nous sommes restreints à la bande de fréquence de 1 à 200 MHz. Nous nous plaçons en champ libre, sauf mention contraire. Les limites du modèle simplifié apparaissent rapidement quand la fréquence approche puis dépasse f_0 (Fig. 2.28 et Fig. 2.29). Des modèles plus complexes ('2 pôles, 2 zéros') permettent notamment de reproduire l'anti-résonance¹¹. Les schémas équivalents de ces modèles deviennent alors de plus en plus complexes. Une étude approfondie a notamment été réalisée dans [84].

Le LNA de l'antenne : fonction de transfert, gain

La tension V_{out} en sortie d'amplificateur est donnée par son gain $V_{out} = A(f) \cdot V_{in}$, avec V_{in} , la tension en entrée de l'amplificateur. L'amplificateur a été développé par Didier Charrier du laboratoire SUB-ATECH [78]. Son gain en tension est de 35 dB, avec une bande passante à -3dB comprise entre 80 kHz et 230 MHz (soit bien supérieure aux bandes utiles évoquées précédemment). Le temps de propagation de groupe qui traduit la déformation en fréquence du signal est lui aussi constant sur la bande de fréquence observée, entre 10 et 100 MHz. Au-dessus de cette fréquence, une légère déformation temporelle com-

¹¹L'anti-résonance est parfois utilisée en électronique pour atténuer des signaux.

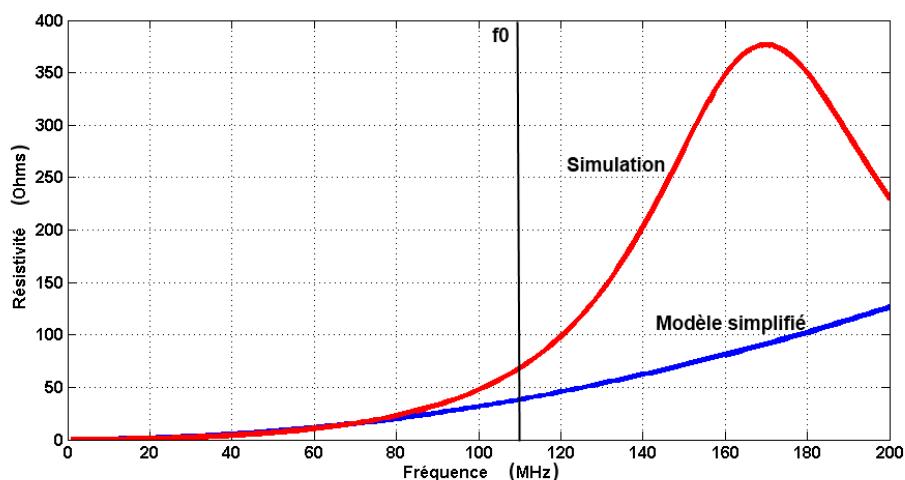


FIGURE 2.28 – Comparaison de l'évolution de la partie réelle de l'impédance de l'antenne entre la simulation 4nec2 (rouge, trait sombre, courbe du dessus) et le modèle 2 pôles, 1 zéro (bleu, trait un peu plus clair, courbe du dessous). La fréquence de résonance est indiquée par un trait vertical.

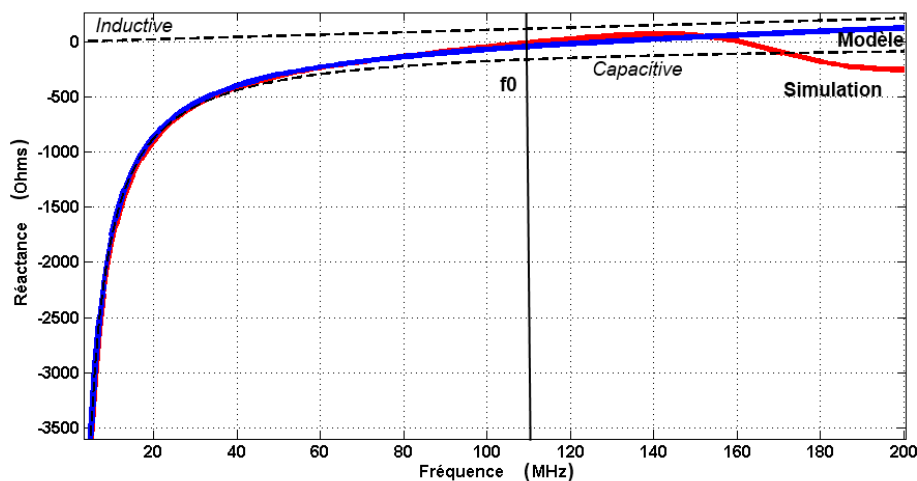


FIGURE 2.29 – Comparaison de l'évolution de la partie imaginaire de l'impédance de l'antenne entre la simulation 4nec2 (rouge, trait sombre, courbe du dessus) et le modèle 2 pôles, 1 zéro (bleu, trait un peu plus clair, courbe du dessous). La fréquence de résonance est indiquée par un trait vertical. Les courbes en pointillé correspondent à une impédance purement inductive (en haut) et capacitive (en bas).

mence à apparaître. Ce temps de propagation de groupe est égal à l'opposée de la dérivée du déphasage en fonction de la fréquence. En termes d'équations, on trouve :

$$\tau = -\frac{d\phi(\omega)}{d\omega} = -\frac{d\phi(f)}{2\pi \cdot df} = -\frac{1}{2\pi} \frac{d\phi(f)}{df} \quad (2.22)$$

L'amplificateur d'antenne possède également sa propre impédance d'entrée. Dans le cas du dipôle, elle est uniquement capacitive, $Z_{in} = C_{in} = 10\text{pF}$. Arrêtons-nous sur les caractéristiques de l'amplificateur. Si l'antenne avait été passive, c'est à dire sans préamplificateur au contact de l'antenne, il aurait fallu adapter l'impédance d'entrée de l'antenne à l'impédance caractéristique du câble, ce qui n'est facilement réalisable qu'à la fréquence de résonance. Le transfert de puissance aurait alors été total. C'est par exemple le cas de nos antennes de télévision classiques. A la résonance, leur résistance est de 75 ohms (voir plus haut), il faut donc que le câble reliant l'antenne à la télévision ait une impédance caractéristique égale.

Dans le cas d'une antenne accordée, soit avec $R_{in} = R_{ant}$, on calcule que la puissance reçue par l'amplificateur vaut :

$$P_{in} = \frac{V_{in}^2}{4 \cdot R_{in}} = \frac{V_{in}^2}{4 \cdot R_{ant}} \quad (2.23)$$

or cette puissance est également exprimable par ce que reçoit l'antenne.

$$P_{in} = \frac{\epsilon^2}{120\pi} \cdot \frac{G\lambda^2}{4\pi} \quad (2.24)$$

La puissance reçue par l'amplificateur est proportionnelle au champ au carré, et au gain de l'antenne, et au carré de la longueur d'onde. Avec la définition de la longueur effective, on trouve en égalisant les deux précédentes équations :

$$L_{eff} = \frac{V_{in}}{\epsilon} = \frac{c}{f} \sqrt{\frac{R_{ant} \cdot G}{120 \cdot \pi^2}} \quad (2.25)$$

Le LNA de l'antenne dipolaire est directement relié au radiateur du dipôle. Le transfert de tension entre le terminal d'antenne et l'entrée de l'amplificateur s'écrit comme :

$$H(f) = \frac{Z_{in}}{Z_{in} + Z_{ant}} \quad (2.26)$$

En l'appliquant au cas particulier de notre amplificateur capacitif, nous obtenons :

$$H(f) = \frac{1}{1 + j \cdot 2 \cdot \pi \cdot Z_{ant} \cdot C_{in} \cdot f} \quad (2.27)$$

en partant du cas accordé, et en greffant le transfert de tension, nous trouvons :

$$L_{eff} = \frac{c}{f} \sqrt{\frac{R_{ant} \cdot G}{120 \cdot \pi^2}} \cdot H(f) \quad (2.28)$$

$$L_{eff} = \frac{c}{f} \sqrt{\frac{R_{ant} \cdot G}{120 \cdot \pi^2}} \cdot \frac{1}{1 + j \cdot 2 \cdot \pi \cdot Z_{ant} \cdot C_{in} \cdot f}$$

La seule inconnue restante est le gain de l'antenne $G(\theta, \phi)$. Il est lié à la distribution de courant (et donc à la longueur effective) que nous avons introduite un peu plus haut. Pour une antenne émettrice, le gain dans une direction donnée est le rapport de la puissance émise dans cette direction, sur la puissance moyenne émise. En termes d'équations cela donne donc :

$$G(\theta, \phi) = \frac{P(\theta, \phi)}{4\pi P_0} \quad (2.29)$$

On trouve un effet d'angle tel que la puissance émise par un dipôle est nulle le long de l'axe de celui-ci. Dans le cas de l'antenne émettrice, la puissance rayonnée est nulle dans cette direction (Fig. 2.30). Pour le cas d'une antenne réceptrice, elle ne détectera pas le champ électrique en provenance de cette direction¹².

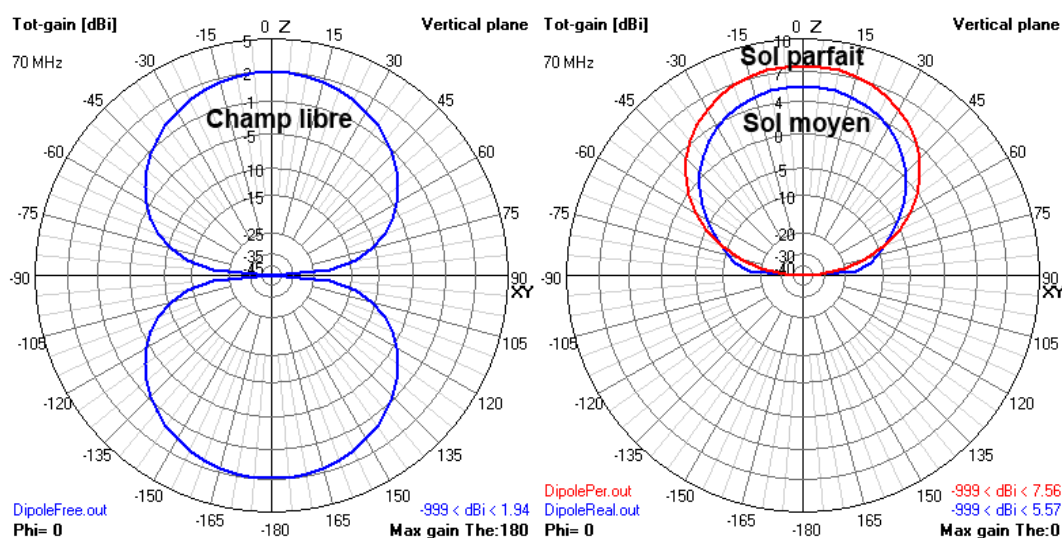


FIGURE 2.30 – A gauche : diagramme de réception de l'antenne, en champ libre, dans le plan de l'antenne. Le long du dipôle, le gain est nul. A droite, les mêmes diagrammes pour un sol parfait et un sol réel.

Le diagramme d'émission d'une antenne dipolaire en espace libre prend finalement la forme d'un tore. La présence d'un sol va fortement modifier ce diagramme de réception, car il joue un rôle de réflecteur. A certaines fréquences, il agit comme interféromètre destructif (Fig. 2.31). La réflexion sur le sol induisant un déphasage de 180 degrés du champ électrique, une différence de chemin de $2h = \lambda$, avec h la hauteur de l'antenne, annulera cette longueur d'onde pour une direction d'arrivée au zénith. Imaginons par exemple que l'on veuille préserver les longueurs d'onde jusqu'à environ 100 MHz, l'antenne doit se trouver à $h < 1.1\text{m}$. Au final une hauteur $h=1\text{m}$ a été choisie. Entre 20 et 100 MHz, la puissance est augmentée de 6 dB, soit un facteur 2 en champ électrique (interférences constructives). A 150 MHz, les interférences destructives annulent le gain de l'antenne en sol parfait. Si ces remarques s'appliquent complètement à des ondes stationnaires, elle sont moins vraies dans le cas de signaux impulsionnels. Lorsque le début du train d'onde revient sur l'antenne, la fin du train peut déjà avoir fini son premier passage, ce qui signifie qu'il faut éloigner un minimum l'antenne du sol. Cependant, on verra dans les chapitres suivants que de tels phénomènes d'interférométrie ont été enregistrés sur le réseau de CODALEMA. Les logiciels de simulation permettent également de simuler la réponse de sols dits 'réels' dont nous avons indiqué un exemple dans la figure 2.30.

¹²Un théorème de réciprocité existe en théorie des antennes. Il indique que les gains en réception et en émission d'une antenne sont égaux.

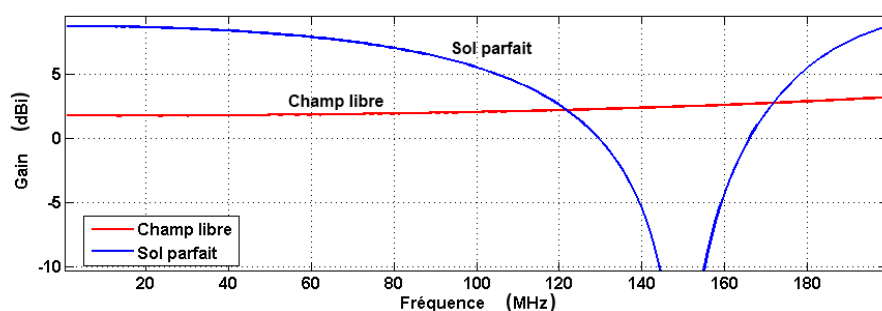


FIGURE 2.31 – Comparaison du gain en dBi de l’antenne en sol parfait et en champ libre, pour la direction du zénith.

La description de l’antenne et de son LNA est maintenant bouclée. Les réponses typiques pour le zénith, et nos trois conditions (champ libre, sol parfait, sol moyen) sont indiquées dans les courbes suivantes (Fig. 2.32). Les grandeurs comprises dans ces courbes sont donc l’impédance de l’antenne (dépendant de ses dimensions et de la fréquence), le gain de l’antenne (dépendant de la fréquence, de l’angle d’arrivée et de la hauteur d’antenne), et la réponse de l’amplificateur (à travers son impédance d’entrée).

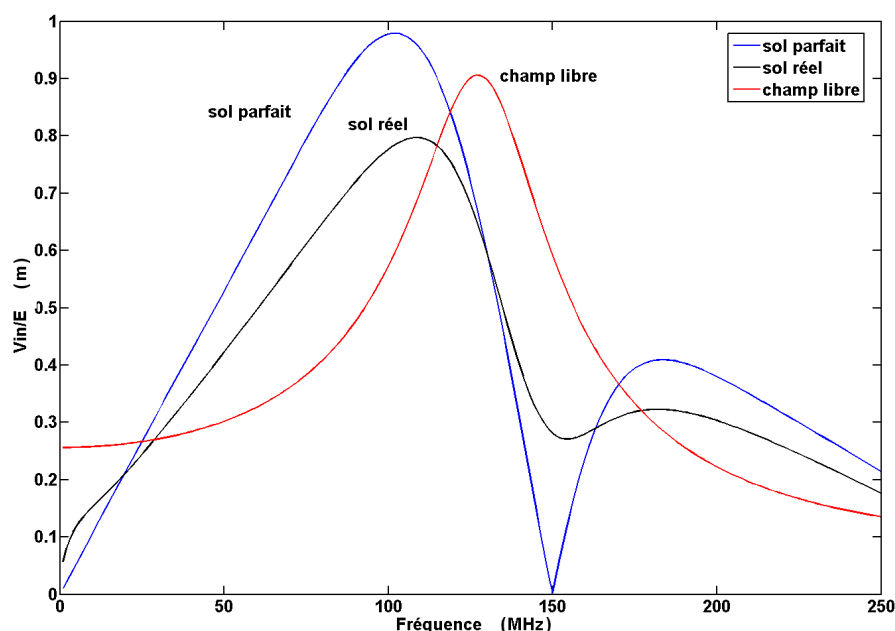


FIGURE 2.32 – Comparaison de la réponse d’antennes pour le cas d’une antenne simulée en champ libre, en sol parfait et en sol réel. V_{in} est la tension en entrée d’amplificateur. Le gain de l’amplificateur (35 dB environ) n’est pas pris en compte. La direction d’arrivée de l’onde simulée est le zénith.

Ainsi, la relation entre un champ ε , et la tension V_{out} récupérée en sortie d'amplificateur est de la forme suivante :

$$V_{out} = L_{eff} \cdot H(f) \cdot A(f) \quad (2.30)$$

Nous sommes maintenant capables de construire le schéma électrique équivalent d'une antenne réceptrice, chargée par son LNA, indiqué figure 2.33.

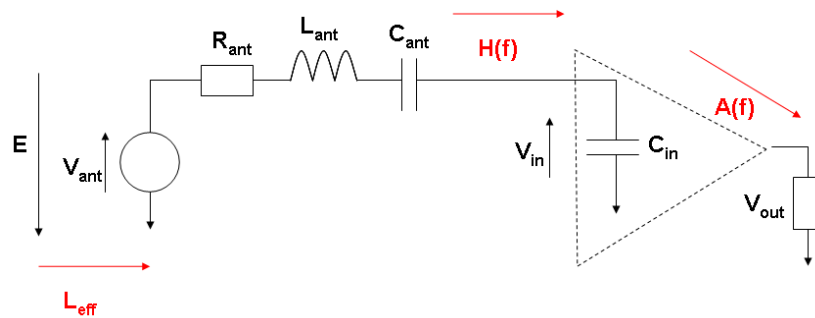


FIGURE 2.33 – Schéma électrique équivalent de la réponse d'antenne.

Les câbles : atténuation

La longueur du câble conduit à un retard du signal mais également à une atténuation de son amplitude. Cette dernière étant liée à des grandeurs de la gerbe, comme sa direction d'arrivée, son énergie, et sa position par rapport au réseau, il est nécessaire de corriger au mieux cette atténuation. L'atténuation dépend des caractéristiques et de la longueur du câble mais également de la fréquence. Plus celle-ci est élevée, plus l'atténuation sera grande. Une approximation de l'atténuation dans ces câbles par unité de longueur est donnée par le constructeur :

$$Attenuation(dB/m) = (A \times \sqrt{f(GHz)}) + B \times f(GHz) \quad (2.31)$$

avec $A=0.0817$, et $B=0.025$. Certains câbles supplémentaires et des connectiques additionnelles augmentent encore l'atténuation. Au final, un générateur de bruit blanc (en entrée de câble, à la place de l'antenne), et un analyseur de spectre (à la place de la carte d'acquisition), permettent d'évaluer l'atténuation de chacun des câbles de manière expérimentale. A 80 MHz, cette atténuation varie de 2 à 8 dBm selon la longueur et la qualité des câbles (Fig. 2.34). En corrigeant le spectre en fréquence de chacun des signaux, de cette atténuation mesurée expérimentalement, le signal en sortie d'antenne est corrigé.

La carte d'acquisition MATAcq : du signal numérisé à un spectre en fréquence mesuré à l'analyseur

Un objectif intéressant est de pouvoir convertir le signal numérisé par la MATAcq (canaux ADC), en un spectre de fréquence en puissance (dBm/Hz), tel que le mesurerait un analyseur de spectre utilisé à

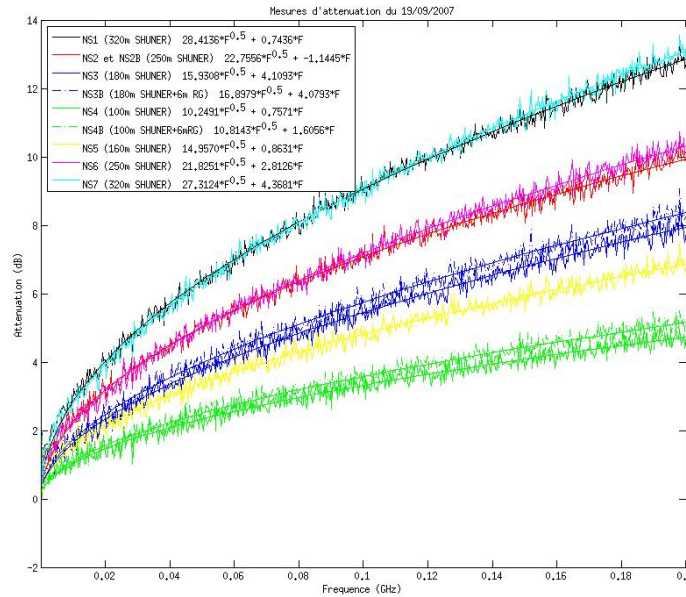


FIGURE 2.34 – Atténuation en dB en fonction de la fréquence, en sortie de câble, d'un signal de type bruit blanc injecté en entrée de câble.

la place de la MATACQ. Cela permet tout d'abord d'obtenir des valeurs et des grandeurs bien connues et aisément compréhensibles pour des diagnostics d'éventuelles pannes. Mieux, en remontant à une valeur exprimée dans de telles unités, la comparaison aux densités spectrales d'énergie données par les simulations sera possible, une fois prises en compte les différentes réponses des câbles, du LNA et de l'antenne.

Un analyseur de spectres mesure la puissance d'un signal en balayant une bande de fréquence prédéfinie. Chaque mesure du spectre se fait avec un certain décalage avec la précédente et sur une largeur de résolution appelée RBW (pour Resolution BandWidth). La puissance affichée en dB par l'analyseur doit donc être corrigée de ce RBW pour pouvoir être exprimée en dBm/Hz. Par exemple pour un RBW de 1kHz, la conversion entre dB et dBm/Hz se fait par une soustraction de 30 dB ($10 \text{ dB} = 10^{30/10}$ soit un facteur 1000 en puissance).

La carte MATACQ numérise un signal temporel en canaux ADC, échantillonné sur 2520 points, à une fréquence de 1Gs/s.

La première étape consiste à calculer le LSB de la carte d'acquisition, ce que nous avons déjà fait plus haut. Il vaut donc 0.244 mV. Le signal exprimé en V est donc le suivant :

$$V = LSB.Canal_{ADC} \quad (2.32)$$

Afin d'obtenir une grandeur compatible avec l'analyseur de spectre, il faut basculer dans le domaine fréquentiel. Le calcul de la transformée de Fourier discrète (DFT) appliqué sur un signal s quelconque de $N=2520$ pts donne :

$$DFT(k) = \sum_{j=0}^{N-1} s(j) \cdot e^{\frac{-2i\pi}{N} \cdot j \cdot k} \quad (2.33)$$

On ne conserve que les 1260 derniers points de la DFT, correspondant aux fréquences positives et nulle. Afin de normaliser la DFT et d'en extraire la puissance, on garde la valeur absolue, qu'on divise par le nombre de points dans l'échantillon, et qu'on multiplie par deux. Pour obtenir une unité de tension efficace¹³, on divise finalement par $\sqrt{2}$, pour obtenir une densité spectrale de puissance (PSD).

$$PSD_V = \sqrt{2} \frac{|DFT_V|}{N} \quad (2.34)$$

La conversion de Volts en dBm est ensuite réalisée. Cette dernière unité exprime le niveau d'un signal par rapport à un signal dissipant 1mW sur l'impédance caractéristique de la liaison considérée (souvent 600 Ohms en audio, 75 Ohms en vidéo, 50 Ohms en RF). Dans notre cas, cela donne donc :

$$P_{dBm} = 10 \cdot \text{Log}(P_{Watt} \cdot 1000) \quad (2.35)$$

et

$$P_{Watt} = V_{eff}^2 / R \quad (2.36)$$

soit

$$P_{dBm} = 10 \cdot \text{Log}(1000 \cdot \frac{V^2}{R}) \quad (2.37)$$

Et donc,

$$PSD_{dB} = 10 \cdot \text{Log}(1000 \cdot \frac{PSD_V^2}{50}) \quad (2.38)$$

La dernière étape consiste à passer de dBm à dBm/Hz. Pour ce faire il faut calculer le RBW équivalent de la MATACQ. La PSD est calculée sur 2520/2=1260 points et sur une bande de fréquence allant de 0 à $(0.5 - 1/2520) \times F_e = 499.6\text{MHz}$ ¹⁴. Chaque valeur de notre PSD couvre donc une largeur de $500/1260 = 396\text{kHz}$ (soit $10 \cdot \log(396000) = 55.97\text{dB}$). C'est le RBW équivalent de la MATACQ.

$$PSD_{dBm/Hz} = PSD_{dB} - 56 \quad (2.39)$$

Cette méthode peut-être utilisée pour n'importe quelle configuration de MATACQ et notamment celles des stations autonomes les plus récentes. Les premières études réalisées montrent un accord à moins de 3dB pour le réseau câblé entre le signal mesuré par la MATACQ correctement converti en dBm/Hz et par un analyseur de spectre. Ainsi, nous sommes techniquement capables de retrouver spectre initial à la sortie de l'antenne, à partir du signal temporel enregistré par les cartes d'acquisition. Associé à la connaissance des autres réponses de la chaîne expérimentale, cela permet de remonter au spectre en fréquence du champ radio détecté.

¹³Un même signal sinusoïdal peut être exprimé de 2 manières différentes. 2V pic-pic, et $1/\sqrt{2}$ V_{eff}

¹⁴En première approximation, la fréquence maximale est de 500 MHz, soit $F_e/2$ qui correspond à la fréquence de Nyquist.

Chapitre 3

CODALEMA-II : Performances et sensibilité de l'expérience

L'un des objectifs principaux de la radiodétection est de proposer une alternative sérieuse aux techniques classiques de détection des gerbes atmosphériques, notamment sur de grandes surfaces dans le cadre de détecteurs géants comme Auger. Pour cela, la radiodétection doit remplir plusieurs critères.

- Un certain nombre d'informations relatives à la gerbe doivent être retrouvées, notamment le temps et la direction d'arrivée. Une bonne manière de valider la robustesse de cette reconstruction est de comparer les résultats obtenus de manière indépendante (mais avec un déclenchement commun) par les deux réseaux, scintillateurs et antennes, de CODALEMA-II. Une information sur l'énergie doit également être extraite des données. L'objectif est de trouver un estimateur ε_r corrélé à l'énergie de la gerbe. Une étape importante vers une détection autonome sera alors franchie. Il deviendra possible d'obtenir un certain nombre des caractéristiques principales sur la gerbe, en s'affranchissant des données d'autres types de détecteurs.
- Une expérience sur une grande surface induit des environnements variés. Il est important de quantifier l'impact qu'auraient ces derniers sur les antennes. Des effets d'interférences et d'écrantage doivent ainsi être recherchés, analysés et compris. Les environnements relativement variés des antennes de CODALEMA-II permettent une première étude de ces effets.

Dans ce chapitre seront présentés les principaux résultats de l'expérience CODALEMA-II, obtenus entre 2007 et 2010. Dans le cadre d'une réflexion sur la détection autonome, la deuxième partie du chapitre sera consacrée à une discussion sur la sensibilité des antennes et notamment à leur environnement. Enfin, la corrélation en énergie observée entre l'énergie déduite des scintillateurs et les signaux radio sera présentée.

3.1 Les principaux résultats

Sauf mention explicitement contraire, ces résultats ont été obtenus dans les conditions suivantes :

- Le réseau d'antennes dipolaires.

- Les antennes orientées dans la direction Est-Ouest et donc sensibles à la composante du champ électrique dans cette même direction.
- Les évènements dont l'enregistrement est déclenché par les scintillateurs.
- Les évènements de multiplicité (nombre d'antennes touchées) supérieure ou égale à 3.
- Une recherche des impulsions avec la méthode LPC.

Le tableau 3.1 résume la statistique utilisée dans le cadre de ce chapitre.

Période	27/11/06 - 03/01/2010
Temps total	1131 j.
Temps utile	1031 j.
Nombre de triggers	168726
Coïncidences	2596
Coïncidences angulaires et temporelles	2029
Coïncidences angulaires et temporelles + internes	604

TABLE 3.1 – Statistique de CODALEMA-II utilisée dans le manuscrit.

Entre le 27 novembre 2006, premières prises de données de production avec 14 antennes dipolaires sur le réseau, et le 3 janvier 2010, se sont écoulés 1131 jours. Durant cette période, CODALEMA-II a été pleinement opérationnelle, en déclenchement scintillateurs durant 1030 jours, soit un cycle utile supérieur à 90%. Les périodes d'intervention sur site pour l'implantation de nouvelles antennes ou de nouveaux scintillateurs et quelques pannes ponctuelles expliquent cette différence d'une centaine de jours. Sur les 168726 évènements détectés par les scintillateurs, 2029 coïncident avec des impulsions enregistrées par les antennes. On verra que cette différence est due à un seuil de détection en énergie différent pour les deux réseaux. Enfin, 604 évènements sont internes, c'est-à-dire donnant une énergie scintillateurs déterminée avec une bonne confiance.

3.1.1 Les coïncidences angulaires et temporelles

La première confrontation des données scintillateurs et radio se fait à travers les directions et les temps d'arrivée dont les écarts angulaires et temporels sont présentés sur la figure. 3.1. Cette confrontation permet d'évaluer la robustesse de la reconstruction radio et de sélectionner les évènements pour la suite des analyses grâce à la coupure suivante : une différence angulaire d_α inférieure à 20° , et une différence temporelle $dt = |t_{ant} - t_{sci}|$ plus petite que 100 ns. t_{ant} et t_{sci} sont les temps de passage de la gerbe au centre du réseau, reconstruits respectivement avec le réseau d'antennes et de scintillateurs. Les statistiques associées apparaissent dans le tableau 3.1.

Les évènements se distribuent au premier ordre sous une forme ressemblant à un arbre et que l'on peut séparer en deux régions :

- Un certain nombre d'évènements sont très dispersés, avec des différences temporelles et angulaires importantes. Ils forment l'équivalent du feuillage de l'arbre. Il s'agit d'évènements très mal reconstruits par les antennes ou les scintillateurs et de signaux radio fortuits enregistrés en coïncidence avec les scintillateurs.

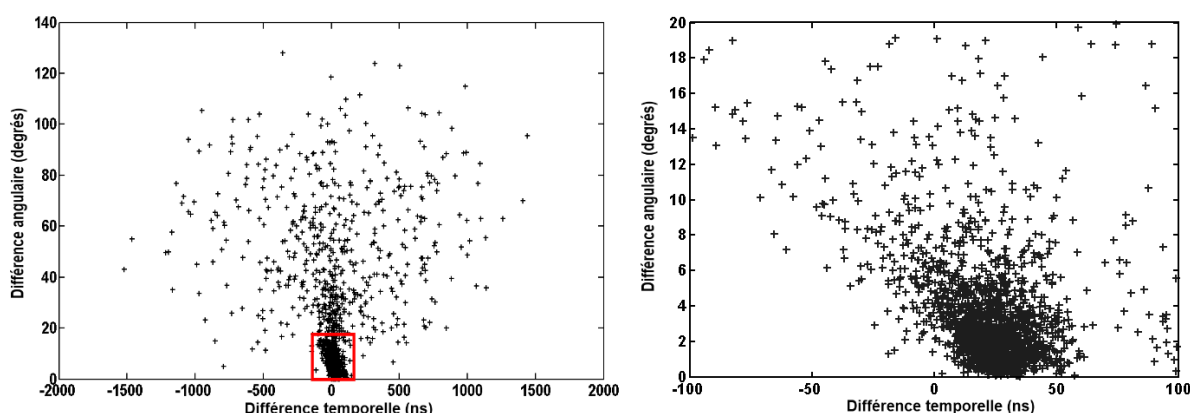


FIGURE 3.1 – Différence angulaire en fonction de la différence temporelle des évènements détectés en coïncidence par les deux réseaux. A gauche, la zone rectangulaire correspond aux critères de coïncidence utilisés pour la suite des analyses : $d_\alpha < 20^\circ$ et $|dt| < 100$ ns. A droite, zoom de cette même zone.

- Les évènements avec des différences angulaire et temporelle faibles forment le tronc. Ces évènements sont ceux compris dans la coupure dont nous parlons plus haut. Ils sont utilisés dans l'ensemble de l'analyse qui va suivre. Il existe également un prolongement (moins dense) du tronc avec un dt faible mais un d_α plus important.

Nous comprenons et expliquons de manière satisfaisante cette figure dans sa globalité. Cependant, quelques caractéristiques secondaires apparaissent, lorsqu'on se penche sur la partie centrale.

- Le tronc est décalé par rapport à l'origine.
- Le tronc est relativement large : la largeur de la distribution des différences temporelles enregistrées, de l'ordre de 50 ns, est un peu trop importante.
- Le tronc est incliné : lorsque la différence angulaire d_α augmente, la différence temporelle dt a tendance à diminuer.

Le premier de ces trois effets est bien expliqué. Il est dû à des mesures initiales imprécises de câble, mesures utilisées pour l'ensemble des routines d'analyse. Ainsi un décalage systématique et global apparaît pour l'ensemble des antennes (Fig. 3.2) entre t_{sci} et t_{ant} . Cet effet global est dû à la présence de câbles SMA reliant les câbles signaux à l'entrée des cartes d'acquisition MATACQ, à laquelle se rajoute un certain nombre de décalages individuels. De nouvelles mesures ont été réalisées pour toutes les antennes, présentées en partie dans le tableau 3.2. Par exemple pour l'antenne NS7, il est apparu un désaccord de 17 ns (à rajouter aux 20 ns du câble SMA) avec les mesures initiales. Ces décalages systématiques sont cependant faibles (ils sont par exemple largement inférieurs à la coupure temporelle de coïncidences), et n'ont pas d'impact sur les résultats présentés dans la suite de ce manuscrit. Il pourrait se révéler important de connaître les temps de propagation dans les câbles et les positions des antennes avec une très grande précision afin de remonter à des informations telles que la courbure du front d'onde radio. De plus, une nouvelle analyse des données avec les temps de retard corrigés est toujours possible.

antenne	retard réel	retard prévu	différence
NS1	1328 ns	1312 ns	16 ns
NS2b	1043 ns	1027 ns	16 ns
NS3b	785 ns	764 ns	21 ns
NS4b	459 ns	438 ns	21 ns
NS5b	675 ns	653 ns	22 ns
NS6	1042 ns	1027 ns	15 ns
NS7	1330 ns	1293 ns	37 ns

TABLE 3.2 – Retards réels : mesures réalisées en 2010 sur les retards des câbles du bras Nord-Sud. Retards prévus : mesures réalisées initialement et utilisées pour les routines.

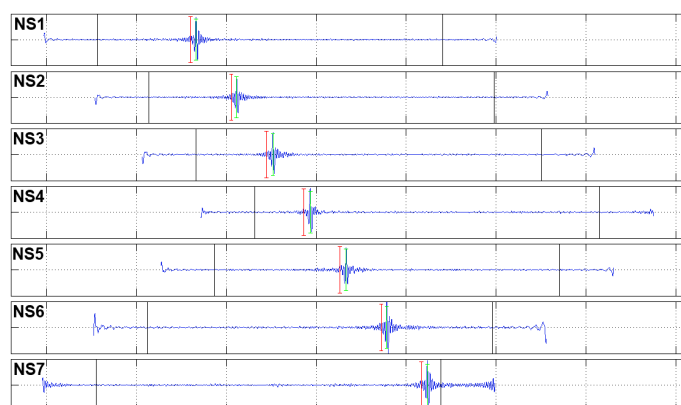


FIGURE 3.2 – Traces temporelles ($2.5 \mu\text{s}$) d'un évènement enregistré par le réseau d'antennes, sur le bras Nord-Sud. En rouge, positions des impulsions radio prévues par les scintillateurs. En vert impulsions détectées par les antennes. Un décalage systématique apparaît entre les deux réseaux, accentué par l'inclinaison de la gerbe (voir plus bas).

La largeur du tronc est explicable par un certain nombre d'interventions réalisées sur le site. Ainsi, de la même manière que pour la distribution azimutale mesurée par les scintillateurs, certaines interventions matérielles sont visibles (Fig. 3.3) dans l'évolution du décalage temporel enregistré entre les deux réseaux, autour des triggers numéros 100, 200 et 600. Corrigée de ces effets, la largeur de la distribution réelle des dt est inférieure à celle montrée dans la figure 3.1.

Enfin, l'inclinaison du tronc a une explication physique moins certaine :

- Les évènements les mieux reconstruits, avec la différence angulaire la plus faible sont ceux avec des multiplicités élevées. En effet, un grand nombre d'antennes touchées, formant un bras de levier plus important, améliore la reconstruction. La différence angulaire de reconstruction¹ entre les deux réseaux passe d'une valeur de 3.3° pour les multiplicités égales à 3 à 1.4° pour les multiplicités égales à 16. Cette valeur corrigée de la résolution des scintillateurs, de l'ordre de 1° (voir chapitre 2), donne une première estimation de la résolution angulaire du détecteur radio de CODALEMA-II, inférieure à 1° . A titre de comparaison, la résolution angulaire de CODALEMA-I

¹ajustée par une distribution gaussienne pondérée par un sinus pour tenir compte de l'effet d'angle solide

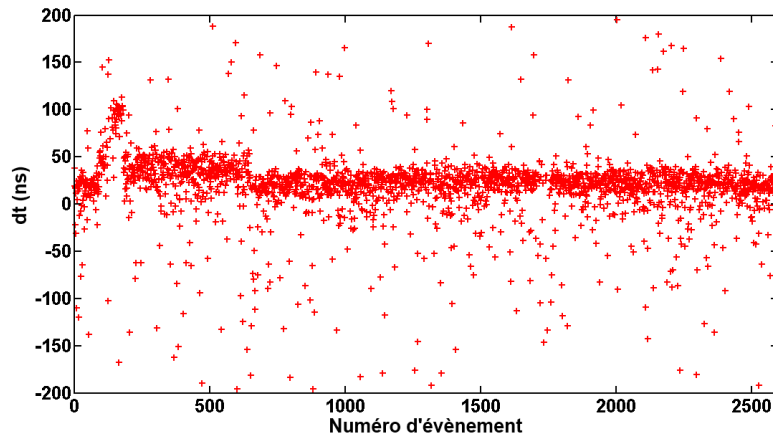


FIGURE 3.3 – dt en fonction du numéro de trigger, et donc du temps, pour les évènements détectés en coïncidence.

avait été obtenue lors du suivi d'une éruption solaire. La trajectoire du soleil, déduite de la corrélation des signaux provenant des différentes antennes, avait été ajustée avec une résolution de 0.71° [85].

- Ces évènements à grande multiplicité correspondent à des gerbes inclinées, plus facilement vues par l'ensemble du réseau d'antennes. En effet, lorsque l'angle zénithal augmente, la surface du réseau d'antennes dans le plan de la gerbe diminue. Un plus grand nombre d'antennes étant plus proche de l'axe de la gerbe, la multiplicité augmente (Fig.3.4).

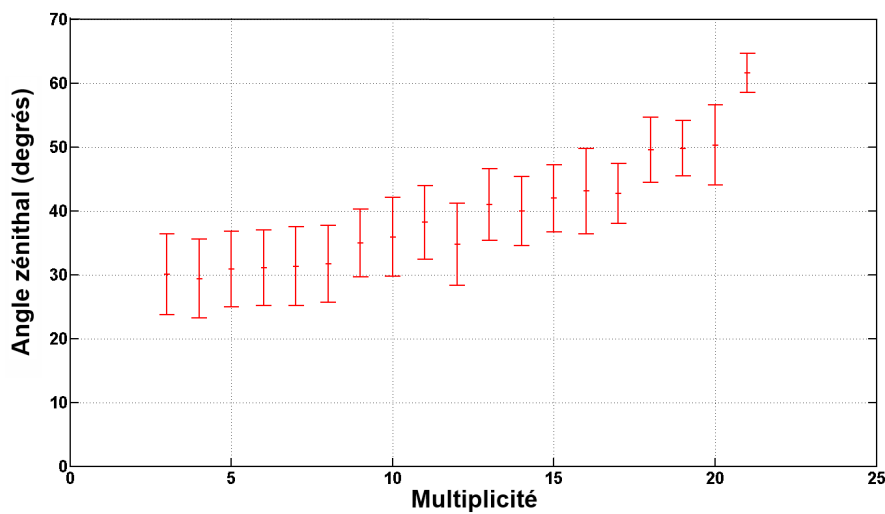


FIGURE 3.4 – Angle zénithal moyen en fonction de la multiplicité. Les barres d'erreurs sont fixées par l'écart-type de chaque échantillon.

- Pour résumer, les événements à la base du tronc correspondent à des événements très bien résolus par les antennes et inclinés, puis au fur et à mesure que l'on remonte le tronc, et que le dt diminue les événements deviennent de plus en plus verticaux et la résolution angulaire diminue. Il semble y avoir une corrélation entre l'angle zénithal et la différence temporelle enregistrée entre les deux réseaux (Fig. 3.5). Cette différence passe de 20 ns à 0° à 40 ns pour un angle de 70° . Cet effet pourrait s'expliquer de la manière suivante : plus la gerbe est inclinée, plus le point d'émission radio et la formation de la galette de particules sont éloignés des détecteurs. Les deux objets ne se propageant pas à la même vitesse, plus le chemin à parcourir est grand, c'est-à-dire plus la gerbe est inclinée, plus la différence temporelle d'arrivée entre particules et onde radio sera importante. Les données semblent indiquer que les particules arrivent de plus en plus tôt par rapport au front d'onde radio indiquant une gerbe se déplaçant à une vitesse moyenne supérieure à c/n .

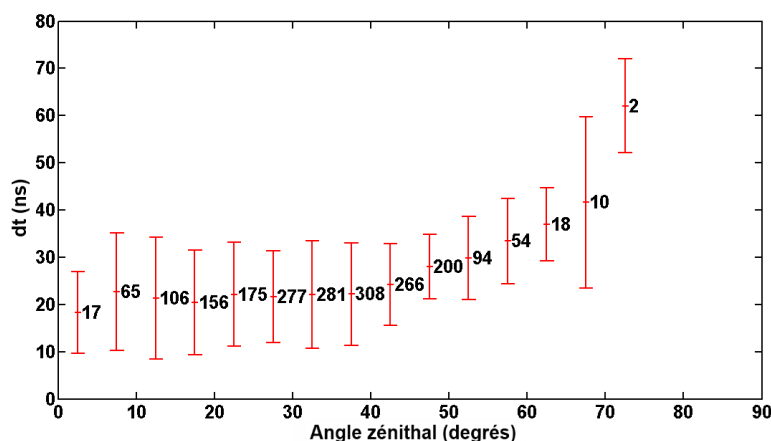


FIGURE 3.5 – La différence temporelle des événements en coïncidence entre les deux réseaux a tendance à croître avec l'inclinaison de la gerbe. Les barres d'erreurs sont fixées par l'écart-type de chaque échantillon. Le nombre d'événements dans chaque échantillon est indiqué directement sur la figure.

3.1.2 Les directions d'arrivée

Le modèle géomagnétique

Cette partie est une actualisation des résultats présentés dans [86]. La statistique élargie permet une analyse plus fine des résultats, notamment des résultats obtenus par les antennes sensibles à la polarisation Nord-Sud.

Les directions d'arrivée des événements détectés en coïncidence permettent de mettre en évidence les processus physiques à l'origine de l'émission radio de la gerbe. Rappelons que les directions d'arrivée obtenues par les scintillateurs sont en première approximation isotropes en azimuth. La distribution zénithale est la conséquence des phénomènes d'extinction de gerbe, et d'acceptance du réseau et des scintillateurs (voir chapitre 2).

La répartition des directions d'arrivée des 2029 événements en coïncidence angulaire et temporelle est présentée dans la figure 3.6. Cette carte montre une asymétrie Nord-Sud importante. Sur les 2029

événements, 1709 événements proviennent de la moitié Nord du ciel et 321 de la moitié Sud. Le rapport est donc de 0.18 cohérent avec la valeur de 0.19 obtenue avec la statistique utilisée auparavant [86]. Un effet statistique pur est exclu à 15 sigma.

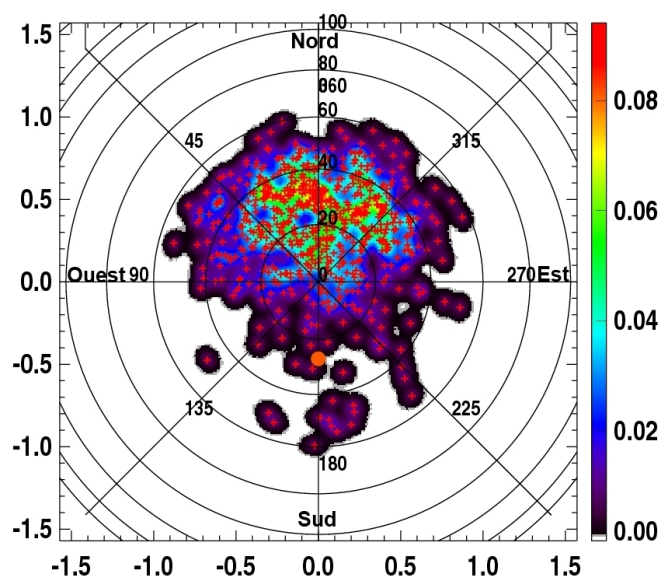


FIGURE 3.6 – Carte du ciel des événements vus par les antennes sensibles à la polarisation Est-Ouest : croix rouges pour les directions d’arrivée, en échelle de couleurs pour la carte avec lissage gaussien de 5° . L’orientation du champ magnétique est indiquée par un cercle orange.

Une source potentielle de cette asymétrie est le champ géomagnétique terrestre. Son effet avait été observé par H. R. Allan dans son expérience d’Haverah Park à la fin des années 1960 mais avec une statistique relativement faible, et en désaccord avec d’autres expériences contemporaines. Le champ géomagnétique est également à la base d’un grand nombre des modèles théoriques actuels, où le mécanisme initiateur du rayonnement radio de la gerbe est la déviation des particules chargées sous l’action de la force de Lorentz :

$$\vec{F} = q \cdot \vec{v} \wedge \vec{B} \quad (3.1)$$

avec $\vec{B}$ le champ magnétique terrestre, q la charge de la particule et $\vec{v}$ sa vitesse. La force de Lorentz est proportionnelle au sinus de l’angle d’incidence entre la direction d’arrivée de la particule et le champ magnétique $\vec{B}$. Elle sera maximale pour une particule arrivant perpendiculairement au champ géomagnétique. À l’inverse, elle sera nulle pour une direction d’arrivée parallèle à $\vec{B}$.

Dans le cas d’une gerbe atmosphérique constituée de plusieurs milliards de particules, le raisonnement précédent est généralisable. Globalement les directions d’arrivée des particules prises une à une sont celles de la gerbe atmosphérique. La force de Lorentz appliquée à l’ensemble de la gerbe sera donc liée à l’angle entre sa direction d’arrivée et le champ $\vec{B}$. Pour des expériences travaillant au seuil de détection, comme CODALEMA-II, un déficit d’événements dans les directions d’arrivée proches du champ

magnétique peut donc être attendu. Prenons l'exemple de deux gerbes de même énergie arrivant perpendiculairement (au Nord, pour le cas de Nançay) et parallèlement au champ magnétique (au Sud). Les particules de la première gerbe subiront une force de Lorentz maximum, et produiront donc un champ électrique élevé, détecté par le réseau d'antennes. Pour la seconde, la force de Lorentz sera minimale, comme le champ produit. Le seuil de détection ne sera donc pas dépassé, et la gerbe ne sera pas détectée. C'est ce qui semble être observé par l'expérience CODALEMA-II dont les données ont été confrontées à un modèle géomagnétique d'émission radio que nous allons introduire maintenant.

Ce modèle est basé sur l'hypothèse suivante : le seul mécanisme à l'origine de la création du champ électrique est la force de Lorentz appliquée à l'ensemble de la gerbe.

$$\begin{aligned}
\vec{\mathcal{E}} &\propto \vec{v} \wedge \vec{B} \\
&\text{avec} \\
\vec{v} &= \begin{pmatrix} \sin(\theta) \cdot \cos(\phi) \\ \sin(\theta) \cdot \sin(\phi) \\ \cos(\theta) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} e_x \\ e_y \\ e_z \end{pmatrix} \\
&\text{et} \\
\vec{B} &= \begin{pmatrix} -\sin(27) \\ 0 \\ \cos(27) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} e_x \\ e_y \\ e_z \end{pmatrix} \\
&\text{soit} \\
\vec{\mathcal{E}} = \begin{pmatrix} \mathcal{E}_x \\ \mathcal{E}_y \\ \mathcal{E}_z \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} \sin(\theta) \cdot \sin(\phi) \cdot \cos(27) \\ -\sin(\theta) \cdot \cos(\phi) \cdot \cos(27) - \cos(\theta) \cdot \sin(27) \\ \sin(\theta) \cdot \sin(\phi) \cdot \sin(27) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} e_x \\ e_y \\ e_z \end{pmatrix} \quad (3.2)
\end{aligned}$$

avec $\vec{v}$ la direction d'arrivée de la gerbe et $\vec{B}$ le champ magnétique à Nançay orienté vers le Sud, avec un angle de 27° . $\vec{v}$ et $\vec{B}$ sont des vecteurs unitaires. Il n'est en effet pas ici question de quantifier la valeur du champ électrique, qui est la somme des contributions individuelles de chacune des particules de la gerbe, mais d'évaluer l'efficacité de détection en fonction de la direction d'arrivée de la gerbe. Cette efficacité modélisée n'est valable qu'au seuil en énergie. A plus haute énergie, l'émission radio est accrue et toutes les gerbes doivent devenir détectables quelles que soient leurs directions d'arrivée. De même, d'autres mécanismes, indépendants du champ géomagnétique, pourraient exister et rendre détectables des gerbes arrivant parallèlement au champ $\vec{B}$ (champ coulombien). Notons enfin que les composantes $\mathcal{E}_x$ et $\mathcal{E}_z$ sont proportionnelles à un facteur $\tan(27^\circ)$ près, à Nançay. Dans le cadre de ce modèle, la mesure de la polarisation verticale est donc redondante.

La polarisation du champ est également complètement définie dans le cas du modèle géomagnétique. Par définition de la force de Lorentz, le champ électrique induit par une gerbe atmosphérique est perpendiculaire à la direction d'arrivée de la gerbe et au champ $\vec{B}$.

La polarisation Est-Ouest

Le champ électrique total émis par la gerbe dans le cadre de ce modèle relativement simpliste est donc défini. Cependant, avant de le confronter aux données obtenues, il est nécessaire de le convoluer d'un certain nombre de facteurs :

- La distribution zénithale des scintillateurs déclenchant l'enregistrement des signaux antennes : comme nous l'avons montré dans le chapitre précédent, elle est proportionnelle à une distribution de Fermi-Dirac et à $\Gamma \cdot \sin(\theta) \cdot \cos^2(\theta)$ qui reproduit l'acceptance du détecteur. Les paramètres de la fonction de Fermi Dirac sont déterminés pour les événements de 10^{17} eV, c'est à dire au maximum de la distribution en énergie des événements (voir plus bas).
- Le lobe de l'antenne dipolaire : les 21 dipôles du réseau câblé utilisés pour cette étude sont plus sensibles aux directions d'arrivée Nord et Sud. De plus, l'antenne n'est sensible qu'à une polarisation du champ, en l'occurrence la polarisation Est-Ouest. C'est donc uniquement la deuxième composante du champ électrique, ε_y , qui est détectée par les antennes.

La distribution attendue des directions d'arrivée est donc proportionnelle à la convolution de la carte de l'intensité du champ électrique selon la polarisation Est-Ouest de la force de Lorentz, de la distribution azimutale des scintillateurs, et du lobe de l'antenne dipolaire (Fig. 3.7).

$$\varepsilon \propto (\vec{v} \wedge \vec{B}) \otimes \vec{e}_y \cdot \Gamma \cdot \sin(\theta) \otimes \cos(\theta)^2 \cdot \text{Lobe}_{EW} \quad (3.3)$$

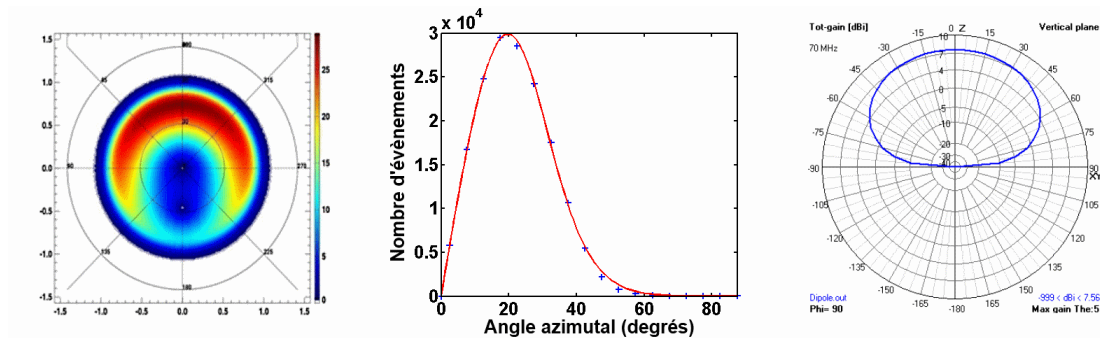


FIGURE 3.7 – 'Ingrédients' du modèle géomagnétique. De gauche à droite. La projection dans le ciel de l'amplitude du produit vectoriel $\vec{v} \wedge \vec{B}$. L'acceptance zénithale du réseau de scintillateurs. Le lobe de l'antenne dipolaire.

L'accord entre mesures expérimentales et prédictions du modèle géomagnétique est satisfaisant. Les cartes de ciel sont assez semblables (Fig. 3.8). Les distributions angulaires sont également compatibles, notamment en ce qui concerne le maximum local au Sud (Fig. 3.9). Au second ordre, de légères différences apparaissent entre données et simulations (distributions plus piquées pour les données). La première configuration de l'expérience, CODALEMA-I, n'avait pas mis en évidence une telle asymétrie Nord-Sud. Il est probable que la directivité des antennes log-périodiques, vers le Sud, compense le déficit attendu au Sud.

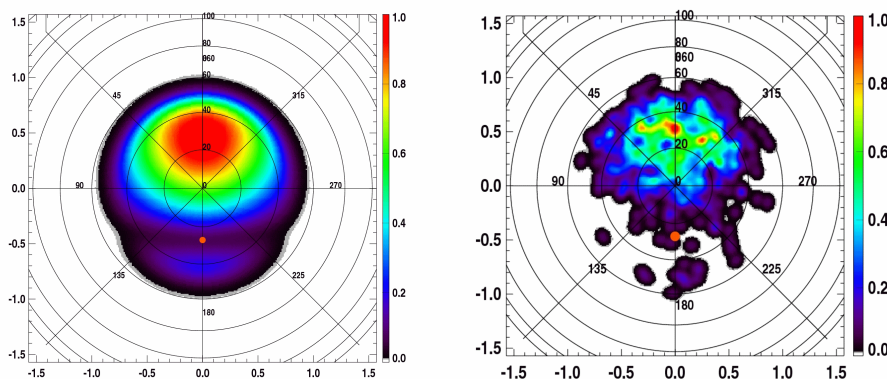


FIGURE 3.8 – Confrontation des cartes de ciel prédite selon le modèle géomagnétique (à gauche) et obtenue par les données (à droite avec lissage gaussien).

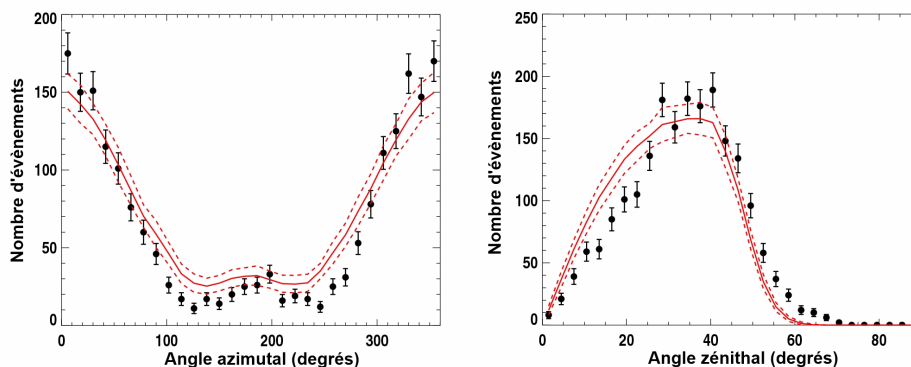


FIGURE 3.9 – Distribution zénithale et azimutale des directions d'arrivée observées par les antennes sensibles à la polarisation Est-Ouest. En rouge, le modèle géomagnétique.

Le modèle géomagnétique donne une autre prédiction. Compte tenu de l'expression de la force de Lorentz, le signe (la polarité) du maximum des signaux doit également dépendre de la direction d'arrivée. La carte prédite des polarités correspond donc à celle précédemment introduite avec une information supplémentaire sur le signe. Dans la simulation, les signaux positifs sont arbitrairement associés aux gerbes provenant du Nord (Fig. 3.10).

Ces résultats confirment que le principal mécanisme initiateur du champ électrique produit par les gerbes est lié au champ magnétique terrestre $\vec{B}$. Le modèle géomagnétique permet de reproduire en première approximation les distributions angulaires et les polarités des signaux.

La polarisation Nord-Sud

En plus des 21 antennes sensibles à la polarisation Est-Ouest du champ, 3 dipôles orientés selon l'axe Nord-Sud ont été installés en octobre 2007. La figure 3.11 donne leur localisation. Malgré la statistique

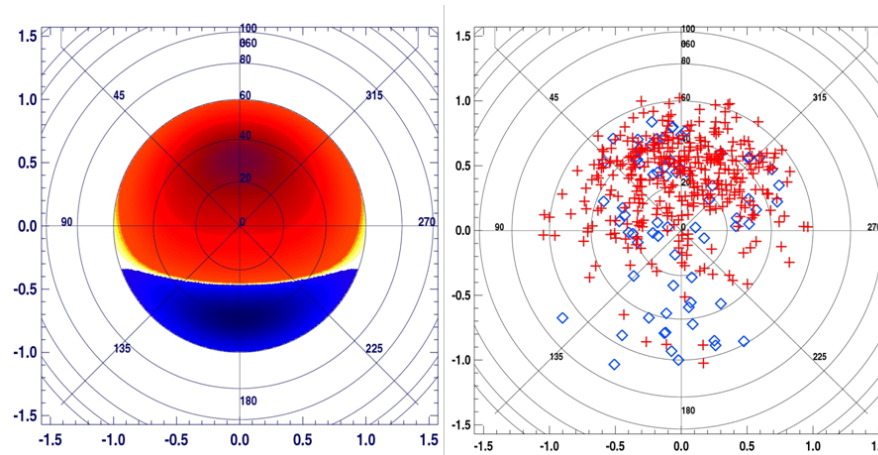


FIGURE 3.10 – A gauche : polarités des signaux prévues par le modèle géomagnétique. A droite : polarités observées des signaux enregistrés. Figure tirée de [86].

réduite, il est possible de considérer dans le processus d'analyse ces 3 antennes comme un réseau indépendant, et de rechercher de manière analogue à l'étude précédente, les coïncidences entre ce mini-réseau et les scintillateurs, afin d'en extraire les directions d'arrivée.

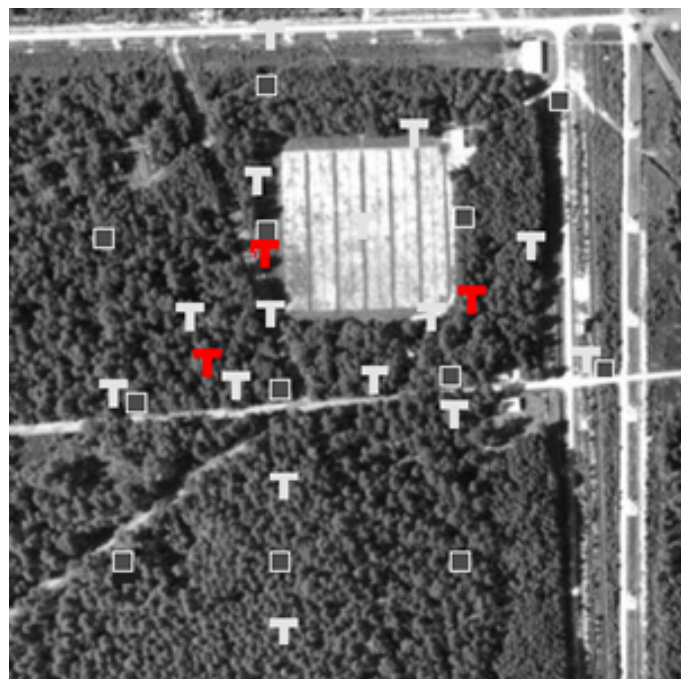


FIGURE 3.11 – Localisation des 3 antennes sensibles à la polarisation Nord-Sud (en rouge), au centre du réseau.

192 événements ont été détectés par les trois antennes, en coïncidence avec le réseau de scintillateurs.

Le modèle géomagnétique introduit plus haut s'applique également pour ce réseau, avec les caractéristiques adéquates. On considère cette fois-ci la projection sur l'axe Nord-Sud, et le lobe de l'antenne est pivoté de 90 degrés afin de tenir compte de la nouvelle orientation des dipôles. Evidemment, la couverture angulaire des scintillateurs ne change pas. L'expression adéquate devient donc :

$$\varepsilon \propto (\vec{v} \wedge \vec{B}) \cdot \vec{e}_x \otimes \Gamma \cdot \sin(\theta) \otimes \cos(\theta)^2 \cdot Lobe_{NS} \quad (3.4)$$

L'accord entre simulation et données est globalement satisfaisant. Les détections des événements des directions Est et Ouest sont favorisées, au contraire de ce qu'on observait pour les antennes sensibles à la polarisation Est-Ouest. La composante Nord-Sud du champ, détectée par les antennes, est nulle le long de l'axe Nord-Sud. Dans les données, il existe une asymétrie du second ordre entre l'Est et l'Ouest, qui n'est pas prédite par le modèle. Ce désaccord n'est pour le moment pas expliqué mais il pourrait s'agir d'une fluctuation statistique due au lot de données relativement faible (101 directions d'arrivée reconstruites vers l'Ouest, 91 vers l'Est).

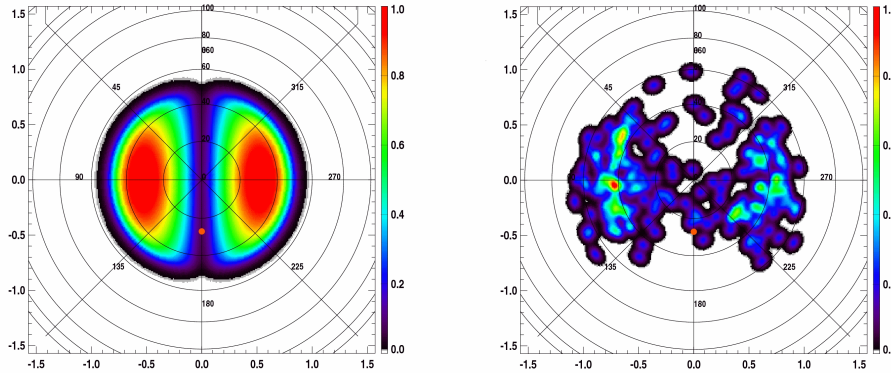


FIGURE 3.12 – Confrontation du modèle prédit par le modèle géomagnétique, à gauche, et la carte lissée des directions d'arrivée à droite pour la polarisation Nord-Sud.

Au delà d'un modèle simple

Il est possible avec la statistique actuelle plus importante et donc grâce aux barres d'erreurs réduites par rapport à celle utilisée dans le cadre de l'article [86], de tester l'accord avec d'autres modèles en hypothèses plus poussées avec les données de CODALEMA-II. Deux modèles seront comparés à travers les distributions angulaires des directions d'arrivée prédites présentées dans la figure 3.14.

- Le modèle inverse-Compton : il se base sur un changement de repère. Dans le référentiel des électrons, le champ $\vec{B}$ n'est plus statique mais formé de photons virtuels, qui diffusent sur les électrons. Il a été appliqué aux gerbes atmosphériques par Didier Lebrun, et Joël Chauvin du LPSC [63]. Il semble que ce modèle ne reproduise pas le maximum local au Sud (Fig. 3.14). Cependant, ce premier modèle ne prend pas en compte l'anisotropie des photons virtuels. Si, dans

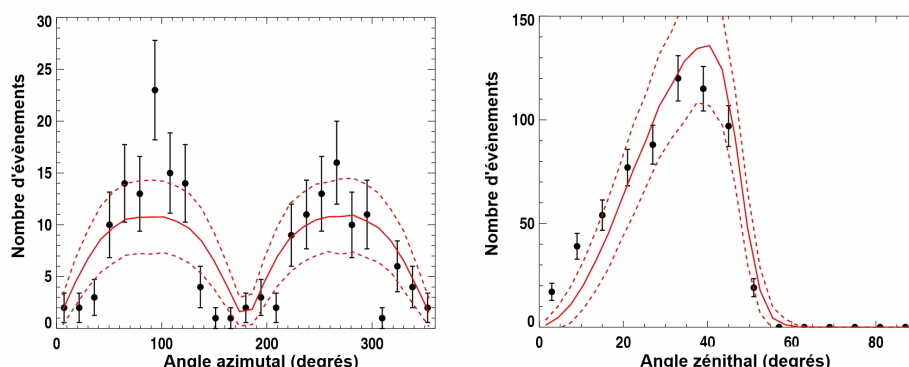


FIGURE 3.13 – Distributions zénithale et azimutale des directions d’arrivée détectées par les antennes sensibles à la polarisation Nord-Sud. En rouge, les prédictions du modèle géomagnétique simple.

la plupart des applications en astrophysique, cette hypothèse est justifiée (bain de photons type CMB), elle n’est plus valable dans le cas où la distribution des photons n’est pas isotrope, et c’est le cas pour le champ magnétique terrestre. Dans une version plus élaborée et pas encore publiée, prenant en compte cette anisotropie, le maximum local au Sud apparaît et l’accord avec les données est fortement amélioré [87].

- Le modèle géomagnétique avec un paramètre libre supplémentaire, une puissance p : $\varepsilon \propto (\vec{v} \wedge \vec{B})^p$. Comme nous pouvons le remarquer sur les distributions angulaires (Fig. 3.9), il semble exister un léger désaccord entre le modèle géomagnétique et les données sur la forme exacte de cette distribution. En laissant libre le paramètre de puissance, ce désaccord peut-être largement réduit, dans les deux polarisations. Il est nécessaire d’obtenir des distributions azimutales prédites plus ‘pentues’ pour ajuster les données. Une puissance inférieure à 1 aura tendance à aplatir la distribution. Inversement, plus la puissance sera élevée, plus la distribution sera creusée. Le meilleur ajustement est obtenu avec une puissance de 1.5 environ, que ce soit pour les résultats en polarisation Est-Ouest comme ceux en Nord-Sud (Fig. 3.14). L’amélioration est importante, mais n’a pas, pour le moment, pu être justifiée physiquement. On peut simplement dire que l’hypothèse d’une simple dépendance linéaire entre le champ et l’efficacité de détection n’est probablement pas complètement valide.

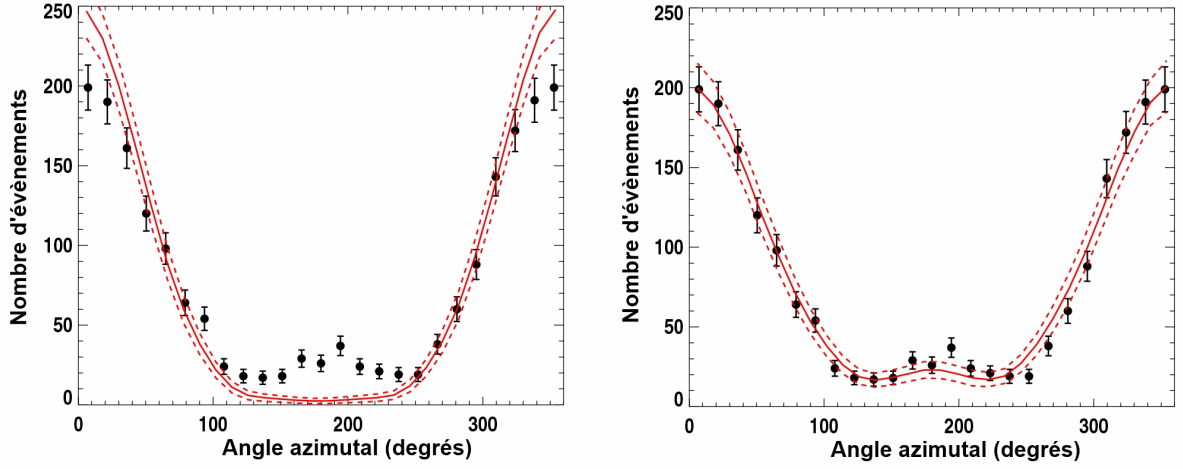


FIGURE 3.14 – Distributions angulaires prédites pour, à gauche : Modèle Inverse-Compton, et à droite : Modèle géomagnétique modifié (puissance 1.5).

3.1.3 Les distributions en énergie

L'analyse des données scintillateurs de CODALEMA-II donne accès à une autre grandeur intéressante pour la radiodétection : l'estimation de l'énergie de la gerbe. Cette information apporte un principal avantage, que n'offrait pas l'expérience CODALEMA-I : la corrélation entre un estimateur radio ε_r et l'énergie déduite des scintillateurs devient possible.

La statistique est réduite par rapport à la section précédente. En effet, une coupure supplémentaire est ajoutée. Afin d'obtenir une bonne confiance dans l'énergie déduite des données scintillateurs, la station ayant mesuré le signal maximum ne doit pas être une station du bord du réseau, ce qui permet de contraindre la distribution reconstruite de particules au sol.

Les distributions en énergie des deux réseaux sont indiquées dans la figure 3.15. Le seuil en énergie des scintillateurs, non représenté, se situe aux alentours des 10^{15} eV. Pour la radio le seuil apparaît vers les $10^{16.7}$ eV. Au delà de 10^{17} eV, le nombre d'événements détectés en radio, comme celui en scintillateurs diminue². On retrouve qualitativement le spectre du flux des rayons cosmiques. L'efficacité de la radio correspond au rapport des deux distributions (Fig. 3.16). Celui-ci confirme clairement l'intuition que l'on pouvait avoir. L'efficacité de détection en radio croît avec l'énergie et tend vers 1 au delà de 10^{18} eV. Cela signifie qu'à une telle énergie, en polarisation Est-Ouest, l'ensemble des directions d'arrivée devient détectable. Aux énergies intermédiaires, deux effets entrent en compte pour expliquer l'efficacité : le seuil en énergie de détection et, à travers la direction d'arrivée, le mécanisme géomagnétique de création du champ électrique.

²ce qui justifie le choix des paramètres de la fonction de Fermi Dirac utilisée pour le modèle géomagnétique utilisé plus haut

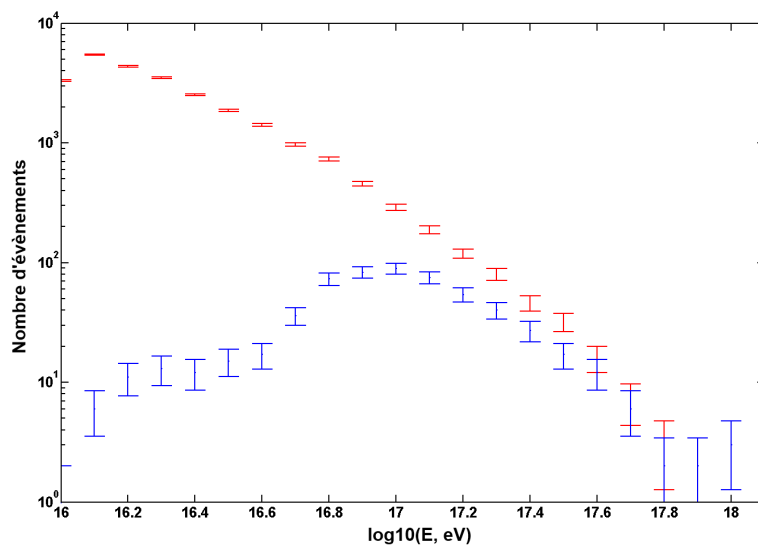


FIGURE 3.15 – Distributions en énergie des événements détectés par les deux réseaux. Courbe supérieure : événements détectés par les scintillateurs. Courbe inférieure : événements (à l'enregistrement déclenché par les scintillateurs) détectés par les antennes.

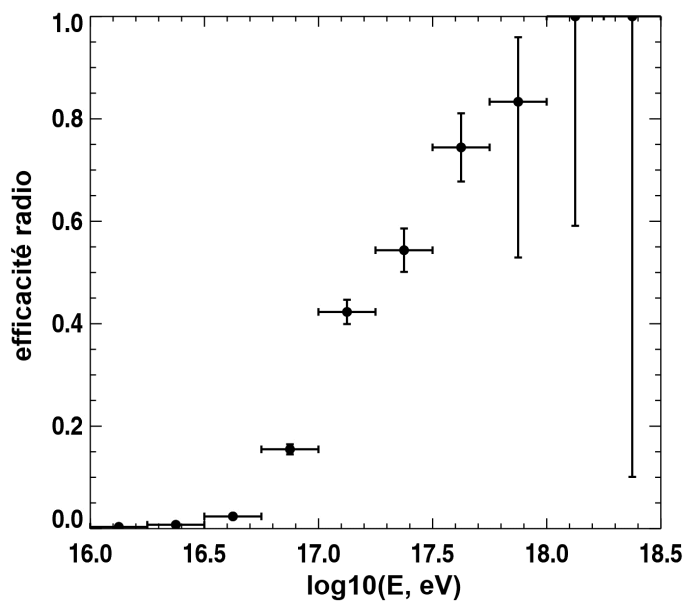


FIGURE 3.16 – Efficacité de la détection radio en fonction de l'énergie.

Les directions d'arrivée et les énergies détectées sont deux caractéristiques capitales à connaître dans le cadre de la détection de gerbes atmosphériques. Ces grandeurs sont liées à deux informations données par les signaux des antennes : la présence ou non d'une impulsion, et l'information temporelle associée. L'amplitude de cette impulsion n'a pas été utilisée pour ces deux premières études. Elle va permettre de nombreuses autres analyses :

- Celle de la distribution latérale (ou profil) du champ électrique mesuré, événement par événement. Cette distribution peut-être comparée aux prédictions théoriques, notamment la formule proposée par Allan (équation 1.5). D'une manière analogue à ce qui est réalisé pour les scintillateurs, on peut également reconstruire la position du pied de gerbe.
- La corrélation en énergie entre l'estimateur donné par les scintillateurs E_p , et une grandeur radio à définir ϵ_r , reliée au profil précédemment calculé. Cette corrélation validée, un estimateur radio de l'énergie de la gerbe sera obtenu, permettant une mesure indépendante de l'énergie associée à une gerbe atmosphérique.

3.2 Les sensibilités d'antennes

Nous présenterons les études des deux points mentionnés ci-dessus à la fin de ce chapitre. Une variation parfois importante des signaux, en temps et entre antennes, semble éloigner certaines distributions latérales de leur forme attendue. Dans le but de les comprendre et de les analyser, plusieurs études ont été menées parallèlement et seront présentées auparavant :

- Un suivi de qualité de l'expérience a été mis en place, afin de mettre rapidement et efficacement en évidence d'éventuelles pannes et dégradations des antennes.
- La sensibilité au bruit galactique a été évaluée et a permis de mettre en lumière un certain nombre de défauts propres à la carte d'acquisition MATACQ.
- Des effets d'environnement ont été étudiés à travers des interférences visibles dans certains spectres en fréquence, et des effets d'écrantage empêchant la détection de certaines impulsions radio par les antennes.

3.2.1 Le suivi de qualité

Afin d'optimiser les prises de données et de simplifier les analyses, le suivi de qualité a été mis en place au début de l'année 2008. Il permet de mettre en évidence les pannes et dysfonctionnements qui peuvent affecter les antennes. La détection, la compréhension et donc la réparation en sont ainsi plus rapides. Ce suivi de qualité ne fonctionne pas en temps réel, mais uniquement à la réception des données sur les serveurs du laboratoire. Sur ce dernier point, il diffère donc du monitoring en temps réel présenté dans le chapitre précédent.

Ce suivi de qualité porte sur plusieurs grandeurs. Il s'agit notamment des temps moyens de déclenchement et du nombre d'impulsions détectées. Les variations de température, de pression et d'humidité

sont enregistrées indépendamment. Au final, il s'est avéré que le meilleur indicateur du bon fonctionnement ou non d'une antenne est la valeur de bruit enregistré. Rappelons que cette valeur est définie comme le RMS du signal en dehors des 200 ns entourant l'impulsion. Ainsi, une valeur de bruit peut être associée à chaque évènement et chaque antenne.

Nous allons maintenant dresser un petit catalogue des différents pannes et dysfonctionnements pouvant survenir sur les antennes en étudiant les variations de ce bruit sur différentes échelles de temps.

Sur un run correspondant généralement à une semaine d'acquisition (1600 évènements pour l'exemple ci-dessous), il est possible d'observer les variations du bruit. Elles permettent de mettre en évidence un dysfonctionnement d'une antenne comme on peut le voir dans la figure 3.17. Les petites oscillations (8 sur l'exemple de la figure) entre 0.5 et 1 μV^2 , pour une bande filtrée entre 23 et 82 MHz, présentent une période de l'ordre de 24 h, et correspondent aux variations galactiques (voir plus bas). Les brusques variations (plusieurs μV^2 à quelques mV^2) sont liées à l'apparition d'émetteurs ponctuels dans la bande de fréquence considérée.

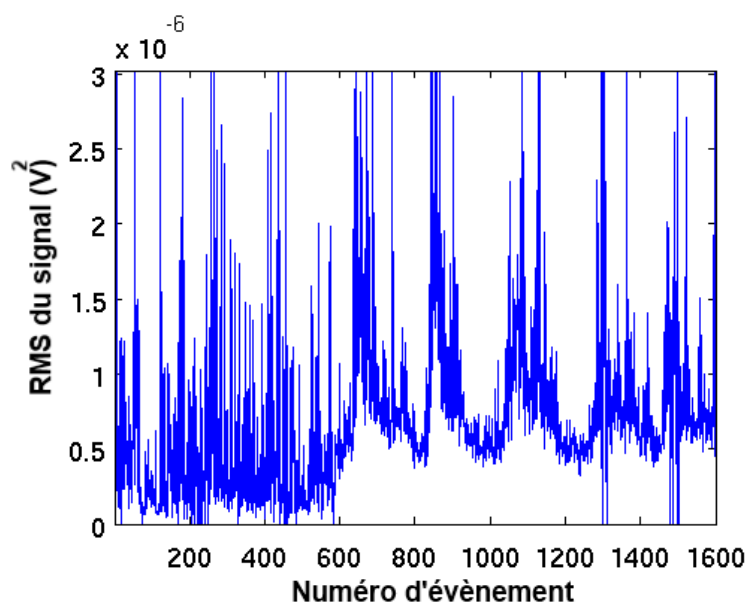


FIGURE 3.17 – L'évolution du bruit au cours d'un run peut permettre de déceler un problème sur une antenne. Ici, des fougères entouraient l'antenne NS1. La différence avant/après le défrichage est visible autour de l'évènement 650.

Le suivi de qualité permet de mettre en évidence des problèmes à plus grande échelle, frappant l'ensemble des antennes, que nous illustrons par la figure 3.18. Une brusque variation du signal observée de manière synchrone permet de déceler un signal parasite apparaissant autour de l'évènement 750.

L'apparition ponctuelle d'émetteurs cause une difficulté : si l'on cherche à évaluer le bruit 'moyen' enregistré sur un run, et à le comparer à d'autres 'moyennes' sur d'autres runs, quelle définition de la moyenne faut-il utiliser, afin de ne pas être fortement impacté par l'occurrence de ce bruit, attendu, tout en retranscrivant une éventuelle variation réelle mesurée sur une période plus longue ? La moyenne arithmétique est clairement la plus naturelle. Cependant elle donne un poids trop fort aux valeurs hautes

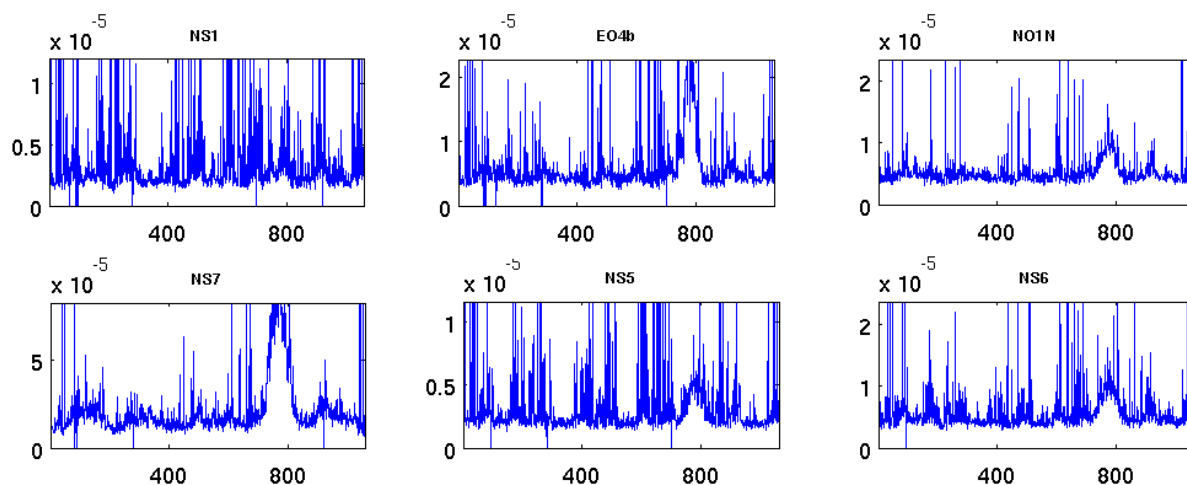


FIGURE 3.18 – Exemple d'évolution du bruit enregistré pour 6 antennes, sur un run.

mesurées ponctuellement (attendues et non liées à un dysfonctionnement de l'antenne). La médiane statistique (valeur permettant de séparer la série numérique ordonnée en deux parties de même nombre d'éléments) est relativement adaptée à ce type de distribution. Dans le cadre d'un fonctionnement normal, les quelques points avec de hautes valeurs de bruits ne modifieront que peu la médiane. Une variation de l'ensemble des points sera par contre clairement visible. Enfin, si la valeur de bruit mesuré devient anormale, elle sera visible au maximum en un temps équivalent à la moitié de la période étudiée. C'est au final cette dernière caractéristique qui a été choisie. Dans la suite de ce manuscrit le terme 'moyen', ou 'moyenné' sera utilisé pour définir cette médiane. Appliquée sur un run, elle permet de confronter les valeurs retrouvées et de réaliser des cartes de bruit mesurées par le réseau (Fig. 3.19). Ainsi, la localisation de la source potentielle devient plus facile.

Il est également possible d'utiliser cette valeur médiane sur un run pour observer les variations du signal, sur de grandes échelles de temps, mesurées par les antennes. Ainsi, des dysfonctionnements à plus long terme deviennent visibles (Fig. 3.20).

3.2.2 La sensibilité au bruit galactique

La sensibilité idéale que peut atteindre une expérience de radiodétection est le bruit galactique. Celui-ci est dû au rayonnement synchrotron des électrons spiralant dans le champ magnétique de la galaxie. Ce rayonnement électromagnétique est principalement produit dans le centre et dans le disque galactique. Sur une période de rotation du globe terrestre dans le repère galactique de 23h56, correspondant à une journée LST, le lobe de l'antenne aura intercepté des zones d'émission radio plus ou moins intenses, et le bruit mesuré aura donc varié. Ainsi, moyennée sur plusieurs périodes afin d'éliminer les variations anthropiques, une variation galactique pourra être mesurée. CODALEMA-I avait montré des résultats prometteurs quant à la variation galactique enregistrée par les antennes log-périodiques [85]. Globalement, l'expérience CODALEMA-II n'a pas progressé sur ce point³, et montre des variations d'amplitude

³L'effort de développement ayant porté sur d'autres points, comme la compacité d'antenne.

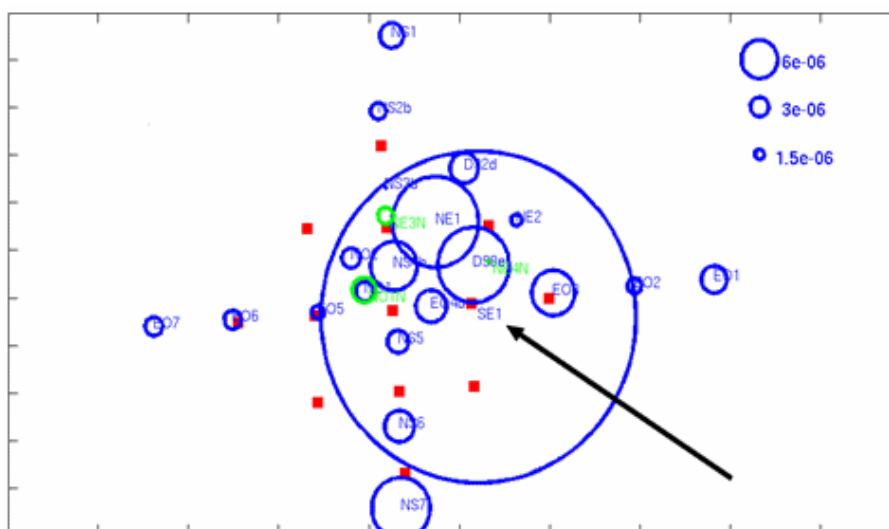


FIGURE 3.19 – Les cartes de bruit permettent de localiser les sources émettrices de bruit sur le réseau. La taille du cercle, centré sur chaque antenne du réseau est proportionnelle au bruit médian enregistré durant le run. Ici une source parasite au centre du réseau pollue l'ensemble du réseau, il s'agit de SE1b (marquée par une flèche) qui mesure par ailleurs le plus grand signal.

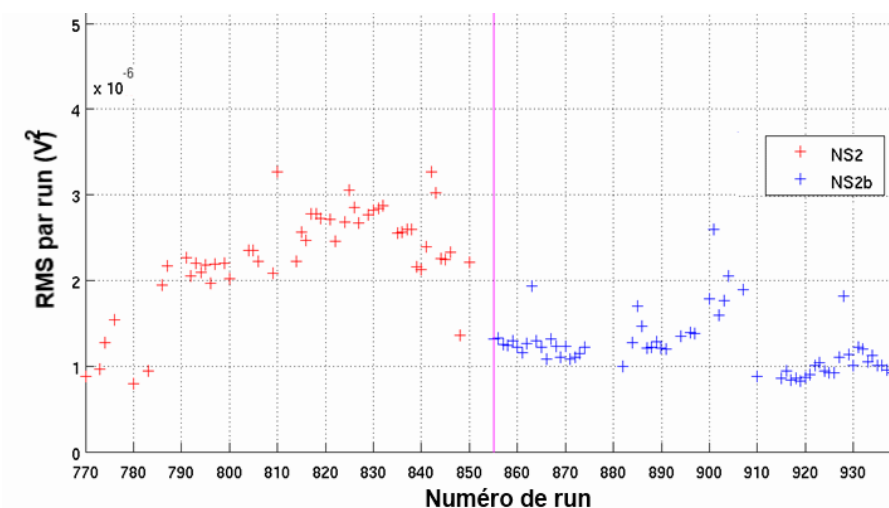


FIGURE 3.20 – L'évolution du bruit médian en fonction du run permet de montrer l'évolution d'une antenne sur une longue période (plusieurs mois), et notamment une lente dégradation de ses performances. Ici l'antenne NS2 montre des signes de panne (run 790), puis est déplacée (run 855). Ensuite de nouvelles pannes surviennent, réparées autour du run 910.

comprises entre 1 et 2 dB selon l'antenne et la fréquence, entre le minimum (10h LST) et le maximum (19h LST) galactique. Dans le cas idéal, la variation galactique mesurée par les antennes devrait atteindre 2 dB (Fig. 3.21). De plus la dispersion des mesures autour de la valeur moyenne est bien supérieure à ce que l'on pourrait attendre.

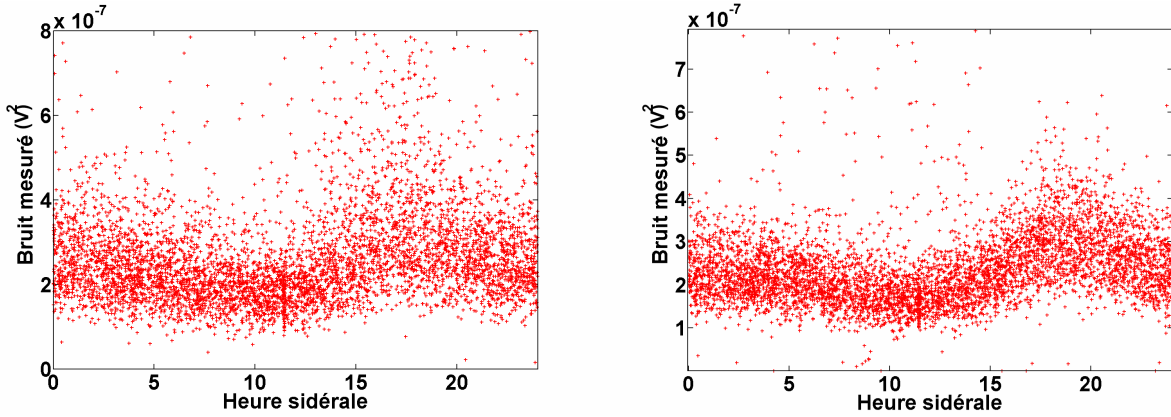


FIGURE 3.21 – A gauche : RMS des champs mesurés entre 55 et 65 MHz en heure LST vue par NS5, antenne dipolaire (2 dB de variation). A droite : RMS des champs mesurés entre 55 et 65 MHz en heure LST vue par NO2b, nouvelle antenne papillon (2.7 dB de variation).

La sensibilité à la variation galactique peut être réduite par la chaîne expérimentale. L'environnement en fait partie (la nature du sol modifiant la réponse d'antenne, elle va également impacter sa sensibilité au bruit galactique). Cependant, pour CODALEMA-II, cette sensibilité est surtout réduite par les défauts de certains composants électroniques, notamment la carte d'acquisition MATAcq, que nous allons présenter maintenant, du plus faible au plus important. Ces défauts ne grèvent pas seulement la sensibilité au bruit galactique mais aussi la gamme en fréquence utilisable pour l'analyse des transitoires.

Les défauts des cartes d'acquisition MATAcq

Les piédestaux Les mémoires analogiques de la carte MATAcq, définie dans le chapitre 2, présentent des dispersions de piédestal d'une cellule à l'autre. Cette dispersion peut atteindre la dizaine de mV. La structure de la puce ayant une périodicité principale de 20 cellules soit 20 ns, cette dispersion apparaît comme un bruit à la fréquence de 50 MHz et aux fréquences de ses harmoniques. Cet effet est réduit par la soustraction aux signaux MATAcq de la mesure à tension d'entrée nulle. Des variations à long terme apparaissant dans les piédestaux, il est nécessaire de réaliser cette calibration de manière régulière.

Intermodulations L'intermodulation de la carte d'acquisition est liée à la non-linéarité des amplificateurs dans la puce MATAcq pour des valeurs élevées. Le nombre de canaux ADC obtenus en sortie n'est pas linéairement proportionnel à la tension en entrée. A haute tension en entrée, le nombre de canaux ADC sera inférieur à celui attendu. On parle de phénomène de compression.

Dans le cas d'un amplificateur parfaitement linéaire en amplitude, deux pics en fréquence F_1 et F_2 , seront bien reproduits tels quels en sortie. Dans le cas d'une amplification non linéaire, un certain nombre d'autres pics en fréquence $F_{n,m}=nF_1+mF_2$ vont apparaître en sortie, avec n et m deux nombres relatifs. Ils sont dus à la compression des signaux F_1 et F_2 à grande amplitude. La valeur $n+m$ indique l'ordre de l'intermodulation. Par exemple, si $F_1=90$ MHz et $F_2=95$ MHz, $F_{1,1}=-1 \times 90 + 1 \times 95 = 5$ MHz, est une intermodulation d'ordre 2. Il n'y a pas de limites aux nombres d'intermodulations, mais cependant, seul

un petit nombre a des conséquences significatives sur la reconstruction du signal. En effet, l'amplitude du pic $F_{n,m}$, est inversement proportionnelle à l'ordre de l'intermodulation. De même les intermodulations d'ordre pair vont se retrouver dans des fréquences relativement éloignées des fréquences F_1 et F_2 , et donc en dehors de la bande utile étudiée. C'est le cas pour l'expérience CODALEMA-II : la fréquence utile se trouvant au maximum entre 20 et 150 MHz, seules les intermodulations d'ordre impair de la FM auront un impact important. Au final, les principales intermodulations observées et pénalisantes pour l'expérience, sont donc celles d'ordre 3, parfois d'ordre 5.

Les 3 émetteurs les plus puissants reçus à Nançay sont ceux de France Culture (88.5 MHz), France Musique (91.8 MHz), France Inter (94.9 MHz) [88]. C'est donc avec ces émetteurs que se produiront les intermodulations les plus visibles.

Lors d'une mesure du spectre moyen en fréquence faite à l'analyseur, les intermodulations sont absentes (Fig. 3.22). Cela écarte la possibilité qu'elles soient créées au niveau du LNA des antennes. Par contre, en observant les signaux enregistrés par les MATAcq, elles sont clairement visibles (Fig. 3.23). Elles sont donc bien causées par les cartes d'acquisition. Ces phénomènes sont particulièrement présents pour les antennes proches du conteneur central aux câbles les plus courts. L'explication est la suivante : ce câble joue le rôle d'un atténuateur. Plus celui-ci est long, plus l'atténuation est forte, et moins la FM sera puissante en entrée de MATAcq (Fig. 3.25). Ainsi, seules les antennes aux câbles les plus courts vont causer une intermodulation. Les valeurs en fréquence sont compatibles avec des intermodulations IP3 indiquées dans le tableau 3.3. Ainsi, les 3 émetteurs les plus puissants de la bande FM vont causer 6 intermodulations IP3 dont 4 seront visibles. Dans les conditions les plus défavorables, d'autres intermodulations apparaissent et la bande de fréquence utilisée pour l'analyse des signaux radio est affectée (Fig. 3.24). Le fond du spectre est fortement modifié à proximité de la FM. Les intermodulations deviennent problématiques et s'étalent sur la bande 23-82 MHz. Les intermodulations IP2, ou avec les émetteurs AM n'ont pour le moment pas été mises en évidence.

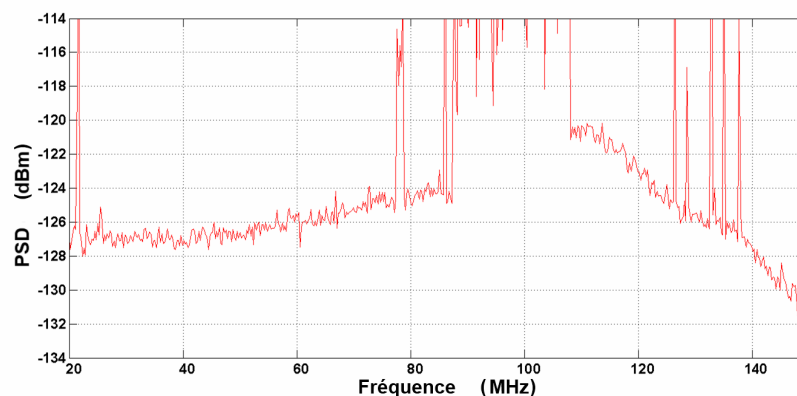


FIGURE 3.22 – Spectre enregistré pour l'antenne EO4 avec l'analyseur de spectre. Les émetteurs FM entre 88 et 110 Mhz sont visibles. D'autres émetteurs, comme celui de la gendarmerie (78 MHz) et ceux associés aux communications avions (130 MHz) apparaissent.

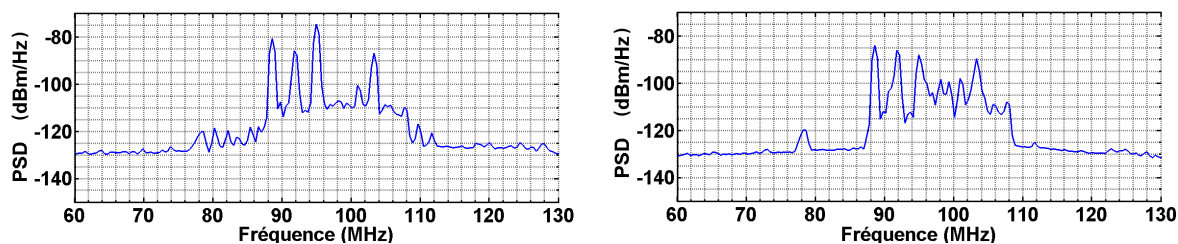


FIGURE 3.23 – A gauche, le spectre mesuré en sortie de MATAcq pour l'antenne EO4. Des intermodulations de la FM apparaissent (tableau 3.3). A droite, le spectre pris sur la même période pour l'antenne EO1.

F1 \ F2	88.5	91.8	94.9
	88.5	91.8	94.9
88.5	*	85.3	82.2
91.8	95.1	*	98.1
94.9	101.5	88.7	*

TABLE 3.3 – Identification des intermodulations IP3, exprimées en MHz, de type 2F1-F2. En gras, les intermodulations IP3 visibles dans la figure 3.23. Les autres intermodulations sont confondues avec d'autres émetteurs FM.

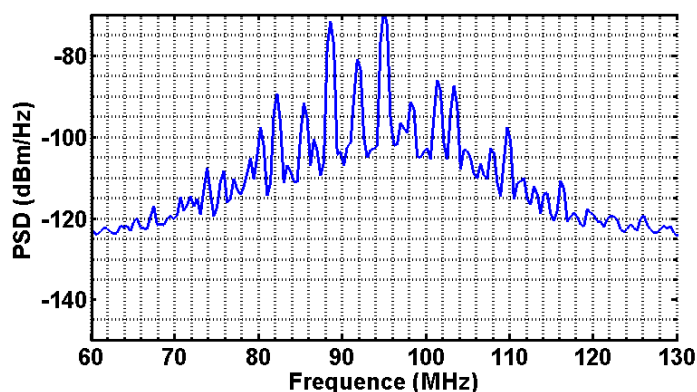


FIGURE 3.24 – Spectre mesuré en sortie de l'antenne pour l'antenne NS4 sur la même période que la figure 3.23.

Répliques et effet Jitter La fine incertitude temporelle à chaque coup de l'horloge interne de la carte d'acquisition cause des répliques des pics en fréquence décalés de 50 MHz. Ainsi un pic à 108 MHz, va se retrouver à 58, 158 et 208 MHz.

Un spectre moyenné sur plusieurs événements enregistrés par la carte MATAcq présente des pics entre 30 et 70 MHz (Fig. 3.25) absents lors d'une mesure à l'analyseur (Fig. 3.22). L'amplitude, et la position des pics indiquent qu'il s'agit des copies des principaux émetteurs FM comme indiqué par les mesures reportées dans le tableau 3.4. Il ne s'agit pas ici d'un problème de repliement de spectre, car il

n'y a pas d'effet miroir autour des fréquences de décalage. Ces répliques ont fait l'objet d'une étude et d'une analyse poussée mais n'ont pu être directement expliquées.

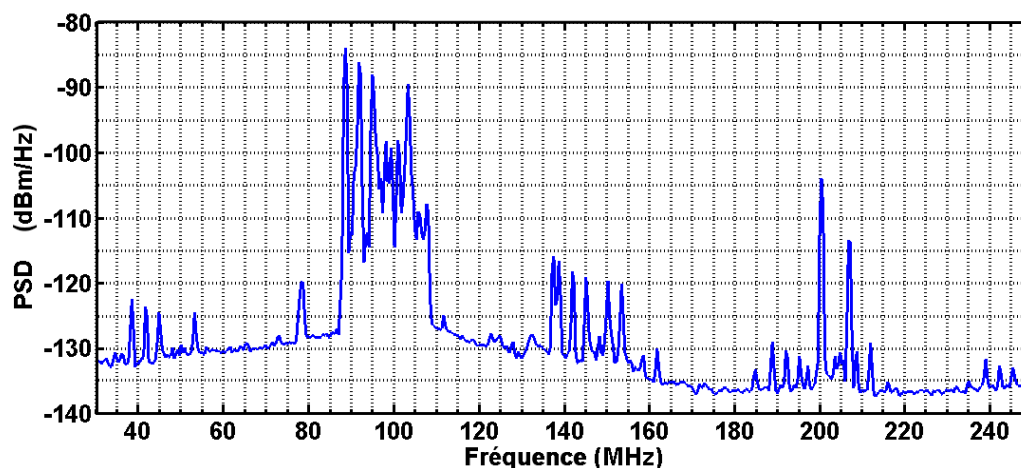


FIGURE 3.25 – Spectre enregistré pour EO1 sur une large bande de fréquence, les répliques des 4 principaux émetteurs FM sont présentes autour de 50, 150 et 250 MHz.

Radio	bande FM	groupe 1	groupe 2	groupe 3	groupe 4
France Culture	88.5	38.5	138.5	188.5	238.5
France Musique	91.8	41.8	141.8	191.9	241.7
France Inter	94.8	44.9	144.9	194.8	244.9
France Bleu Berry	103.2	53.2	153.3	203.1	*

TABLE 3.4 – Identification des fréquences (en MHz) des répliques FM dans la figure 3.25.

Réjecteurs FM Ces différents défauts inhérents à la carte d'acquisition utilisée sont gênants pour la radiodétection et devaient donc être corrigés. S'ils n'empêchent pas la détection de gerbes atmosphériques et l'analyse de la plupart de certains résultats (directions d'arrivée), ils sont un frein pour l'étude spectrale des événements. L'allongement des câbles signaux n'est pas une alternative possible. Bien que ceux-ci jouent le rôle d'atténuateurs en abaissant le niveau de la FM en entrée de MATAcq et permettent de réduire en partie les défauts observés, la perte de puissance du signal se fait dans toutes les bandes en fréquence notamment celles contenant la contribution radio des gerbes atmosphériques.

La mise en place de réjecteurs FM a été finalement choisie comme solution la plus appropriée. La bande FM étant inutilisable car dominant presque toujours la contribution de la gerbe, la perte totale d'information dans cette bande de fréquence n'est pas un problème. Par contre, l'atténuation de la FM élimine les intermodulations et les répliques, notamment dans la bande de fréquence 23-83 MHz.

Les premiers tests réalisés avec des réjecteurs FM en entrée de MATAcq sont prometteurs. Comme attendu, les défauts observés jusqu'alors disparaissent comme illustré dans la figure 3.26. Dans les prochains mois, l'ensemble des antennes sera équipé de réjecteurs similaires. Des analyses spectrales plus

finies deviendront alors possibles sur l'ensemble des antennes. La méthode classique de recherche d'impulsions pourrait également se montrer plus efficace. En effet, le bruit dans les bandes en fréquence classiquement utilisées va nettement diminuer. Une même impulsion pourrait devenir détectable avec le réjecteur FM alors qu'elle ne l'était pas avant la mise en place de celui-ci.

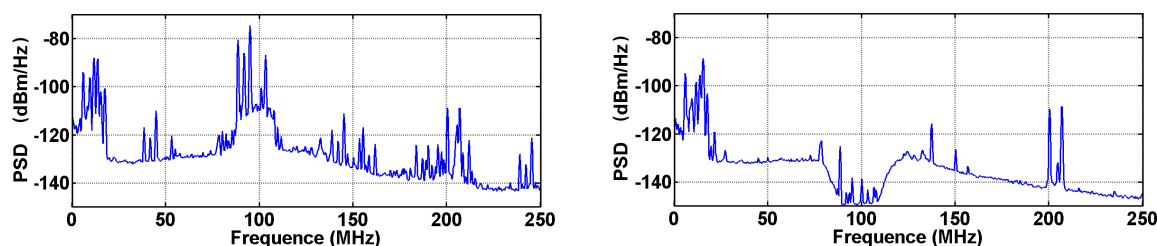


FIGURE 3.26 – Effet de la pose d'un réjecteur FM à l'entrée MATAcq. A gauche, avant la pose du réjecteur, des intermodulations et des répliques FM sont présentes. A droite, après la pose, elles sont absentes. Seuls les pics à 50-100-150 MHz, dûs aux piédestaux (et intervenant en aval du réjecteur) sont présents. La résonance de l'antenne autour de 110 MHz n'est plus visible.

Conclusion sur la variation galactique

Ce sont donc les différents effets de l'électronique de l'antenne et du LNA qui expliquent la sensibilité limitée au bruit galactique : jusqu'à 50 MHz, le bruit radio de la galaxie est dominé par celui du LNA de l'antenne. Entre 38.5 et 53.2 MHz, les répliques des 4 principaux émetteurs FM apparaissent. Au delà d'une fréquence variable selon les antennes et de l'ordre de 70 MHz, les intermodulations dominent à nouveau le bruit galactique. Au final, les bandes de fréquence adaptées à la recherche d'une variation galactique sont étroites et doivent être recherchées entre 55 et 70 MHz, ou au delà de la FM, malgré un bruit galactique décroissant avec la fréquence. Dans tous les cas, des émetteurs ponctuels peuvent affecter la variation mesurée. On verra au chapitre suivant que les antennes papillons montrent, dans certaines conditions, des résultats beaucoup plus satisfaisants grâce à une résonance plus basse en fréquence, un bruit du LNA largement inférieur au bruit galactique mesuré, et un environnement avec une puissance de la bande FM réduite.

3.2.3 Les effets d'environnement

Il est important de s'assurer qu'un environnement relativement défavorable ne pénalise pas la radio-détection, et que, s'il a un impact, il devienne possible de le quantifier et de le corriger. L'expérience CODALEMA-II donne un bon aperçu de ces environnements variés. Certaines antennes se trouvent dans des zones dégagées. D'autres antennes se trouvent à proximité immédiate d'arbres, dans la forêt, au Sud du réseau. Quelques antennes sont proches d'autres instruments de l'Observatoire (le Radiohéliographe par exemple), ou d'abris métalliques. Une antenne a également été placée au centre du réseau du DAM (c'est-à-dire au milieu d'une 'forêt' de 144 mâts métalliques de 6 m de hauteur), afin de vérifier si la radiodétection dans un environnement particulièrement défavorable était possible.

L'objectif de cette étude est donc de répondre aux questions suivantes :

- Effets d'interférences : Quel est l'impact de l'environnement sur les formes des signaux mesurés par les antennes ?
- Effets d'écrantage : Quel est l'impact de l'environnement sur la capacité de détection d'une antenne ?

Les effets d'interférences visibles dans le spectre en fréquence

Une analyse possible des effets d'environnements consiste à examiner les spectres en fréquences observés par les antennes, en recherchant d'éventuels effets d'interférences qui pourraient apparaître. Rappelons que l'un de ces effets est déjà présent pour toutes les antennes puisque le sol joue le rôle d'un réflecteur, et introduit une interférence destructive ou constructive suivant la longueur d'onde (voir chapitre 2). La différence de chemin entre l'onde directe et l'onde réfléchie dépend de deux paramètres : l'inclinaison de la gerbe, et la hauteur du dipôle. Ainsi pour une hauteur deux fois plus faible, la première interférence destructive surviendra à une fréquence deux fois plus élevée. De même, à hauteur de dipôle égale, une gerbe inclinée de 60° causera une interférence destructive à une fréquence deux fois plus élevée qu'une gerbe verticale.

Ces effets d'interférences peuvent également prendre leur origine dans des réflexions sur des obstacles entourant le dipôle. Nous étudierons le cas de l'abri métallique⁴ se trouvant à proximité immédiate d'une antenne du réseau de CODALEMA-II, NE4N (Fig. 3.27). La mise en fréquence indubitable des effets d'interférences dans les spectres en fréquence est complexe, à double titre :

- Premièrement, il est nécessaire que l'évènement soit particulièrement puissant, de façon à ce que la contribution associée à l'impulsion du rayon cosmique soit largement visible dans le domaine fréquentiel. Ces évènements sont peu nombreux et correspondent aux gerbes d'énergie particulièrement élevée.
- Deuxièmement, la direction d'arrivée de l'évènement doit être telle que le phénomène d'interférences devienne possible. Pour le cas particulier de NE4N, les conditions géométriques sont réunies pour les évènements provenant du Nord-Est et présentant une inclinaison de l'ordre de 60° .

Les évènements possédant ces deux caractéristiques sont donc particulièrement rares, et nous nous concentrerons pour cette analyse sur un unique évènement, pour lequel le spectre en fréquence de l'antenne NE4N présente des structures régulières de largeur caractéristique proche de 40 MHz. Ces structures ne sont pas visibles sur les évènements enregistrés avant et après pour cette antenne, et ne sont pas observées pour les autres antennes du réseau (Fig. 3.28, gauche). La direction d'arrivée associée est la suivante : $\theta=63^\circ$ (27° sur l'horizon) et $\phi=334^\circ$ (NNE). Afin de valider l'hypothèse des interférences sur l'abri métallique, une simulation complète a été réalisée avec le logiciel de simulation 4nec2, en utilisant les éléments suivants :

- Le dipôle est modélisé par un cylindre métallique de 1m20 de long, placé à une hauteur de 1 mètre au-dessus d'un sol parfait, et d'un diamètre de 27 mm, équivalent à une largeur de radiateur plat de 11 cm.

⁴Dans la première phase de CODALEMA, cet abri protégeait l'un des scintillateurs du LAL.

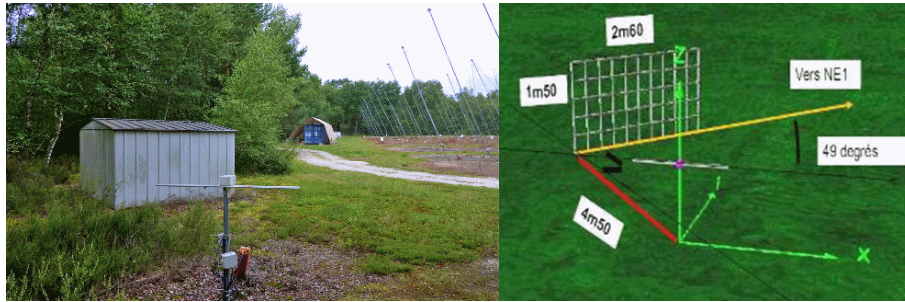


FIGURE 3.27 – Environnement proche de NE4N. L'abri métallique, à gauche de l'image joue le rôle d'un réflecteur et cause des interférences pour certaines directions d'arrivée des gerbes atmosphériques.

- L'abri métallique est modélisé par un grillage de dimensions équivalentes : le maillage est suffisamment fin pour qu'aux longueurs d'ondes étudiées l'obstacle apparaisse en première approximation comme une surface réfléchissante. L'antenne est placée à 4m50 de l'abri.
- Une onde avec la direction d'arrivée de la gerbe.

L'abri métallique modifiant principalement le gain de l'antenne, c'est donc cette dernière grandeur qui a été étudiée. La comparaison entre données et simulations s'est faite sur la valeur des interférences constructives et destructives simulées et mesurées (Fig. 3.28). Le gain a été évalué pour 4 cas.

- En l'absence d'abri métallique aucune interférence n'apparaît. Seul l'effet de sol est visible au delà de 200 MHz, compte tenu de l'inclinaison de la gerbe. Cela correspond au comportement attendu et notamment aux spectres généralement vus pour les événements les plus puissants enregistrés.
- En présence de l'abri métallique, et pour une direction correspondant à l'angle d'arrivée du rayon cosmique observé pour l'évènement étudié, des interférences apparaissent. Il y a un bon accord sur les valeurs en fréquence des interférences entre les données et les simulations.
- En éloignant l'abri métallique, la largeur des interférences se réduit et n'est plus en accord avec les données. La différence de chemin augmente, et la fréquence d'interférence diminue de manière proportionnelle à la distance entre l'antenne et la cabane.
- Pour un angle azimutal d'arrivée pivoté de 90 degrés par rapport à celui enregistré aucune interférence n'apparaît.

Le résultat de l'étude est satisfaisant au premier ordre. Les valeurs en fréquence des interférences sont correctement retrouvées par la simulation. Cependant la forme des interférences est plus marquée (plus piquée), dans les données que dans les simulations. Cela est dû à la limite imposée par le logiciel 4nec2 sur la finesse du maillage. Il est probable que la surface modélisée ne soit donc pas parfaitement réfléchissante et donne une légère modulation par rapport aux interférences simulées pour un sol parfait. Aucun autre effet d'interférence aussi clair n'a été observé pour le moment, même pour l'antenne NS6, située à quelques dizaines de centimètres d'un arbre.

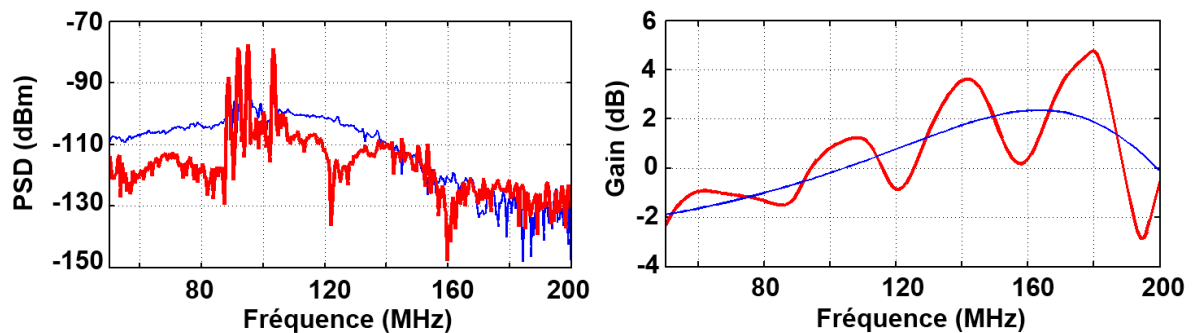


FIGURE 3.28 – A gauche : spectre mesuré pour une antenne à l'environnement dégagé (bleu) et pour NE4N (rouge). A droite, gains simulés sans abri (bleu) et avec abri (rouge).

Les effets d'écrantage sur la détection des impulsions

Une autre manière possible de rechercher des effets d'environnement est d'observer si certaines directions d'arrivée deviennent masquées par l'environnement de l'antenne. Il serait par exemple possible que l'antenne NE1, au centre du DAM, ne puisse détecter les gerbes ayant une direction d'arrivée coïncidant avec les antennes log-périodiques (Fig. 3.29).

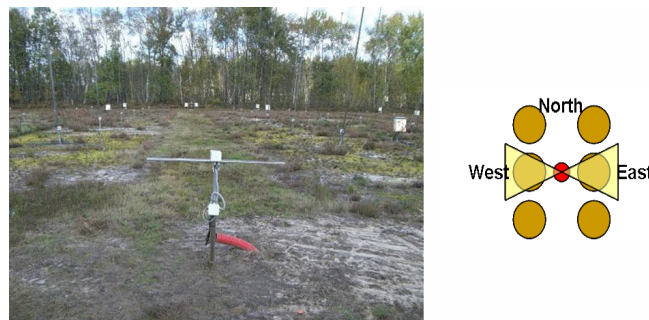


FIGURE 3.29 – A gauche photo de NE1, entourée des antennes du DAM. A droite, vue schématique, par dessus de l'antenne NE1, en rouge. Les antennes proches du DAM sont représentées par des cercles marron. Les deux principales directions potentiellement écrantées sont indiquées en jaune.

La principale difficulté de cette étude réside dans le fait que la distribution azimutale attendue est rendue largement asymétrique par l'effet géomagnétique. Il faudra donc en tenir compte. Pour ce faire, les deux distributions azimutales et normalisées suivantes seront comparées :

- La distribution azimutale des événements avec une multiplicité égale ou supérieure à 3 : c'est la distribution globale observée par le réseau d'antennes et discutée sur la figure 3.9.
- La distribution azimutale des événements détectés par l'antenne étudiée et ayant une multiplicité de 3 au minimum : c'est la distribution individuelle observée par l'antenne.

Une différence entre ces deux distributions pourrait révéler un effet d'environnement. Trois antennes permettent de résumer l'ensemble des distributions observées. Les barres d'erreurs associées correspondent à l'ensemble des paramètres de la loi de Poisson donnant plus de 68% de probabilité d'obtenir la valeur observée :

Les antennes peuvent être séparées en deux populations distinctes :

- Une population présentant une distribution des événements détectés semblable à la distribution globale (Fig. 3.30). Ces antennes peuvent être dans des environnements particulièrement dégagés, mais également dans des lieux a priori moins favorables (proches d'arbres, d'antennes du radiohéliographe, ...).
- Une population présentant une distribution des événements détectés s'éloignant particulièrement de la distribution globale. C'est le cas des antennes placées en bord de réseau (notamment les deux antennes extrêmes de l'axe Est-Ouest) qui montrent un déficit d'événements pour certaines directions d'arrivée (Fig. 3.31). Celui-ci ne peut être associé à l'environnement de l'antenne. Il s'agit ici d'un effet d'acceptance du réseau : à leur arrivée au niveau des cartes d'acquisition, les signaux sont retardés par le temps de propagation du signal dans les câbles. Pour les antennes les plus éloignées, et des géométries d'arrivée de la gerbe défavorables, l'impulsion associée à la gerbe se retrouve en dehors de la plage d'enregistrement, et l'antenne ne 'détecte' pas le signal⁵. Dans le cadre d'une détection autonome, cet effet d'acceptance ne sera pas présent, les antennes déclenchant sur leur propre signal.

L'antenne NE1, au centre du réseau décimétrique est à rapprocher de la première population : bien que les directions d'arrivée à l'Est et à l'Ouest soient potentiellement écrantées par les antennes log-périodiques les plus proches du dipôle, cet effet ne se retrouve pas clairement dans la distribution individuelle observée (Fig. 3.32), même si une légère modulation par rapport à la distribution globale semble apparaître pour les angles autour de 60° et 300°. Ce résultat signifie que, dans la gamme d'énergie à laquelle fonctionne l'expérience CODALEMA-II, la capacité de détection ne semble pas être altérée par l'environnement de l'antenne.

Une étude complémentaire a été réalisée afin de valider ces résultats. Il s'agit ici de considérer un sous-ensemble du réseau constitué des 4 antennes entourant le DAM et de l'antenne NE1 (Fig. 3.33). Les cartes du ciel des événements détectés par uniquement les 4 antennes externes pourraient mettre en évidence des effets d'écrantage du réseau décimétrique sur l'antenne NE1. 300 événements ont été détectés par toutes les antennes (multiplicité 5/5). 20 autres ont été détectés par les 4 antennes externes (multiplicité 4/5). Le rapport est inférieur à 10% qui donne donc une limite supérieure de l'impact de l'environnement de l'antenne NE1 sur sa détection. Les directions d'arrivée de ces événements à multiplicité 4 ont une distribution différente de celle vue par l'ensemble du sous-réseau (multiplicité 5). Certaines directions d'arrivée semblent donc être plus difficilement détectables que d'autres pour l'antenne NE1 (Fig. 3.34). Pour la moitié d'entre elles, elles correspondent à la position des antennes log-périodiques entourant l'antenne. Cependant, la statistique de cette dernière analyse est limitée. D'autres études menées sur des antennes à l'environnement a priori défavorables (NS2 proche du radiohéliographe et NS5

⁵pour certains événements, l'impulsion est présente dans les oscillations de Gibbs du signal filtré, elle est donc ignorée dans la phase d'analyse des formes d'onde.

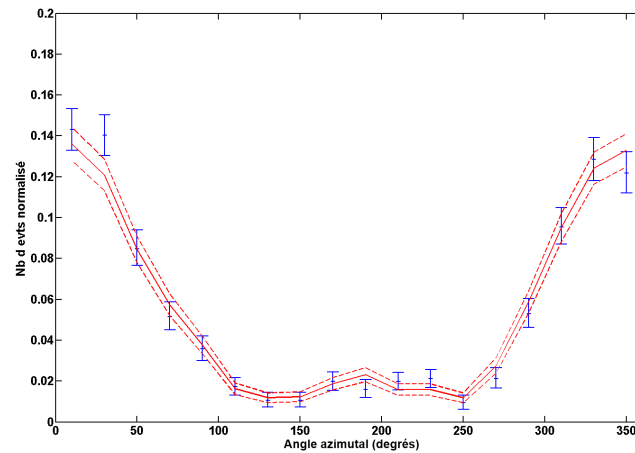


FIGURE 3.30 – Distribution azimutale des directions d'arrivée détectées par EO3 (en bleu) et par l'ensemble du réseau (en rouge).

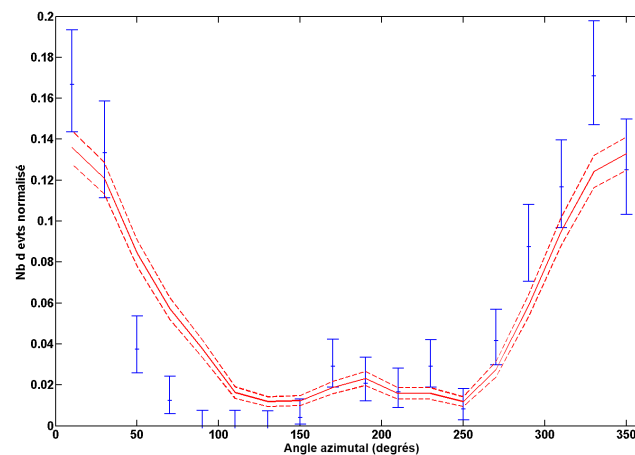


FIGURE 3.31 – Distribution azimutale des directions d'arrivée détectées par EO1 (en bleu) et par l'ensemble du réseau (en rouge).

proche d'un arbre) n'ont donné aucun résultat sur des biais de détection. Des effets ont également été recherchés par des comparaisons avant/après sur des antennes déplacées par précaution.

Conclusion sur les effets d'environnement

Au vu des différentes études présentées, on peut conclure que les effets d'environnement sur l'expérience CODALEMA-II sont très faibles. Très ponctuellement, des effets d'interférences induits par le voisinage des antennes sont visibles. Pour les antennes placées dans des environnement particulièrement défavorables, comme NE1, la limite supérieure du ratio des événements non détectés à cause de cet écran-

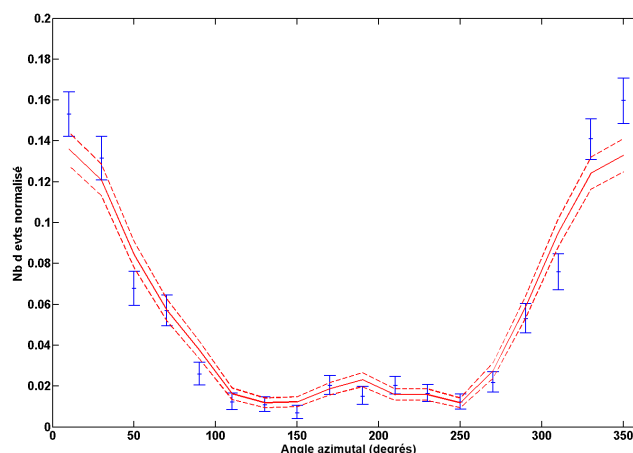


FIGURE 3.32 – Distribution azimutale des directions d'arrivée détectées par NE1 et par l'ensemble du réseau (en rouge).

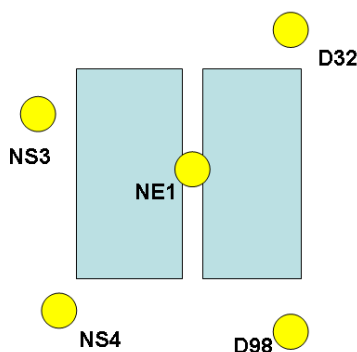


FIGURE 3.33 – Configuration du mini-réseau constitué des antennes NE1, NS3, NS4, D32, et D98. Les rectangles correspondent au réseau du DAM.

tage ne dépasse pas 10%. Dans le cadre d'une instrumentation sur de grandes surfaces, le maillage large entre les détecteurs permettra une certaine liberté dans le choix du positionnement précis des antennes. Il sera donc possible de les éloigner suffisamment d'éléments potentiellement réflecteurs, et les effets d'environnement seront alors négligeables. D'une manière plus globale, les distributions anormales de champ radio observées lors de la détection de gerbes atmosphériques ne peuvent être expliquées par les seuls effets d'environnement [89].

3.2.4 La distribution latérale du champ radio

Dans cette section, on s'intéressera à la distribution latérale du champ radio mesurée lors de la détection des rayons cosmiques. Pour construire le profil, puis pour corrélérer le champ radio détecté à l'énergie du primaire, il est nécessaire de corriger les signaux de chaque antenne d'un certain nombre de facteurs

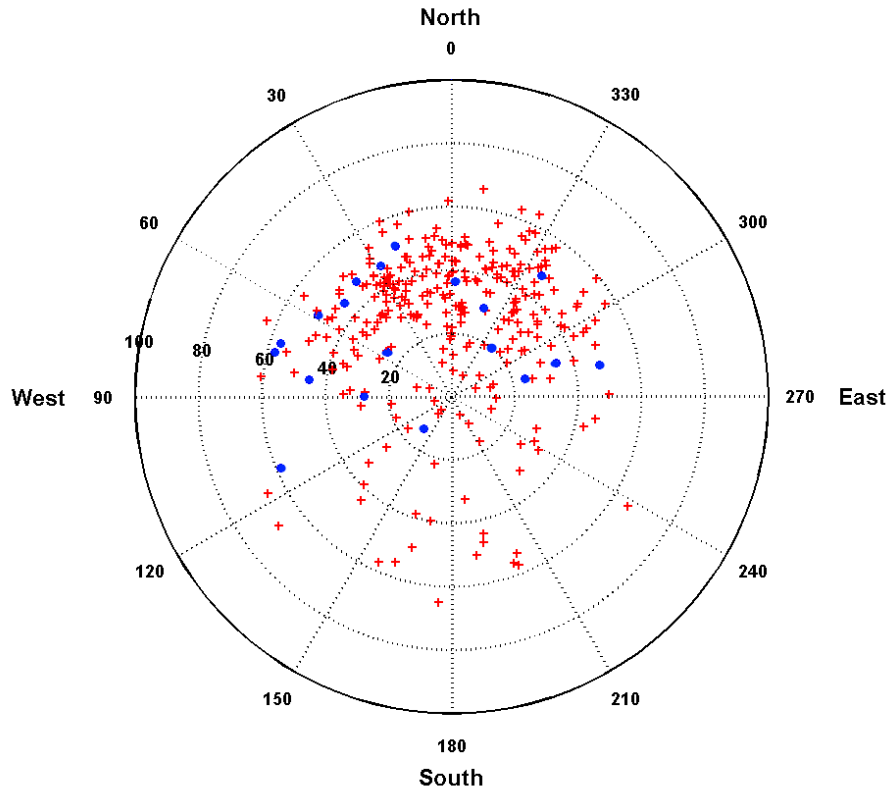


FIGURE 3.34 – Carte du ciel des évènements détectés par le sous-ensemble du réseau décrit figure 3.33. En croix les évènements vus par les 5 antennes (multiplicité 5/5). En cercles les évènements non détectés par NE1 (multiplicité 4/5).

que nous avons pour la plupart déjà identifiés dans le chapitre 2.

- La réponse de l'antenne : c'est à dire sa longueur effective $L_{eff}(f)$, rapport d'une tension mesurée à ses bornes exprimée en V_{ant} et d'un champ exprimé en V/m. La correction de lobe est réalisée suivant la direction d'arrivée reconstruite de la gerbe⁶.
- La fonction de transfert $H(f)$ entre le champ mesuré aux bornes de l'antenne, V_{ant} , et la tension récupérée en sortie de préamplificateur V_{in} .
- Le gain du préamplificateur $A(f)$ entre V_{in} et V_{out} .
- L'atténuation dans les câbles $Att(f)$ reliant les antennes à la carte de numérisation.

⁶Compte tenu du rapport des distances entre point d'émission radio (de l'ordre de quelques km) et distance à l'axe (de l'ordre de la centaine de mètres pour les évènements internes), cette approximation est justifiée. Elle avait été implicitement faite dans l'étude sur les directions d'arrivée. Dans le cas d'une expérience réalisée à très grand paramètre d'impact, il faudra corriger, non plus de l'angle de direction d'arrivée, mais de l'angle réel de l'émission radio de la gerbe par rapport à l'antenne. Cela implique de connaître avec une relative précision l'altitude à laquelle est principalement émis le champ radio de la gerbe, voire la distribution longitudinale de celui-ci, avec laquelle on convoluera l'angle d'observation.

On peut synthétiser ces corrections dans l'expression suivante :

$$\varepsilon = \frac{V_{out}}{L_{eff} \cdot H(f) \cdot A(f) \cdot Att(f)} \quad (3.5)$$

Par simplicité, nous définirons ε comme la valeur maximale du champ, correspondant à l'impulsion. L'expérience de Haverah Park avait permis à Allan de poser une forme de profil attendu suivant la fonction :

$$\varepsilon(d) = \varepsilon_0 \cdot e^{-\frac{d}{d_0}} \quad (3.6)$$

Cette dépendance est utilisée pour l'ajustement des profils dans CODALEMA-II. ε est le champ maximum, corrigé de la chaîne expérimentale de l'antenne, d est la distance à l'axe de la gerbe. Les 4 paramètres libres de cette expression sont d_0 , ε_0 , et implicitement x_0 et y_0 , coordonnées du pied de gerbe, contenus dans d .

La forme attendue de la distribution latérale est symétrique autour de l'axe de la gerbe⁷. Cette hypothèse est confortée par les théories actuelles qui trouvent au premier ordre une symétrie du motif au sol, pour la polarisation perpendiculaire au champ magnétique, et une gerbe verticale. Ce motif théorique change et se déforme lorsque la gerbe s'incline, et quand la polarisation étudiée change (Est-Ouest à Nord-Sud). Dans ce dernier cas, il devient complexe (forme de trèfle), et il serait vain de rechercher une distribution latérale symétrique.

Afin de le contraindre dans une certaine mesure, l'ajustement des profils est réalisé pour les événements dont la multiplicité est supérieure ou égale à 5 antennes touchées (pour 4 paramètres libres). Sur l'échantillon initial de 2029 coïncidences établies, 1206 événements satisfont ce critère. Il est important de noter que ce lot de données ne pourra pas être exhaustivement utilisé pour la corrélation en énergie, car l'information sur l'énergie donnée par les scintillateurs n'est pertinente que dans le cas des événements internes ce qui réduit fortement le nombre d'événements.

L'ajustement du profil avec la fonction exponentielle se fait via la méthode des moindres carrés. L'erreur sur chaque mesure de champ est définie comme le bruit enregistré par l'antenne durant le signal : $\sigma(\varepsilon)$. Pour limiter le temps de calcul des routines, les paramètres libres sont bornés à des valeurs au-delà desquelles on peut considérer que la minimisation diverge : ± 1000 mètres pour le x_0 et le y_0 , $10000 \mu V$ pour ε_0 . La borne qui aura le plus d'impact sur la suite des analyses est celle du d_0 , limité à 1000 m. Pour les valeurs de d_0 approchant ou atteignant cette limite, on parle de 'profils plats'.

La cartographie 2D du champ électrique

Pour chaque événement satisfaisant les conditions de coïncidence et de multiplicité, une fiche précise du champ radio peut être réalisée (Fig. 3.35). Elle contient 3 informations :

- Une cartographie 2D du champ radio mesuré au sol. Les lignes de contour du champ radio sont

⁷Il est important de souligner que cette symétrie est recherchée dans le plan de la gerbe, et non au sol. Une forme ovoïde au sol n'indique pas forcément une asymétrie dans le plan de la gerbe.

interpolées sur les mesures faites par chacune des antennes.

- Les distributions des champs mesurés selon les deux axes principaux du champ d'antennes : l'axe Nord-Sud et l'axe Est-Ouest. Cette représentation permet par exemple d'observer si une asymétrie importante apparaît selon l'orientation de l'axe d'antennes.
- La distribution latérale du champ, avec les 4 paramètres libres. x_0 , y_0 , ϵ_0 et d_0 .

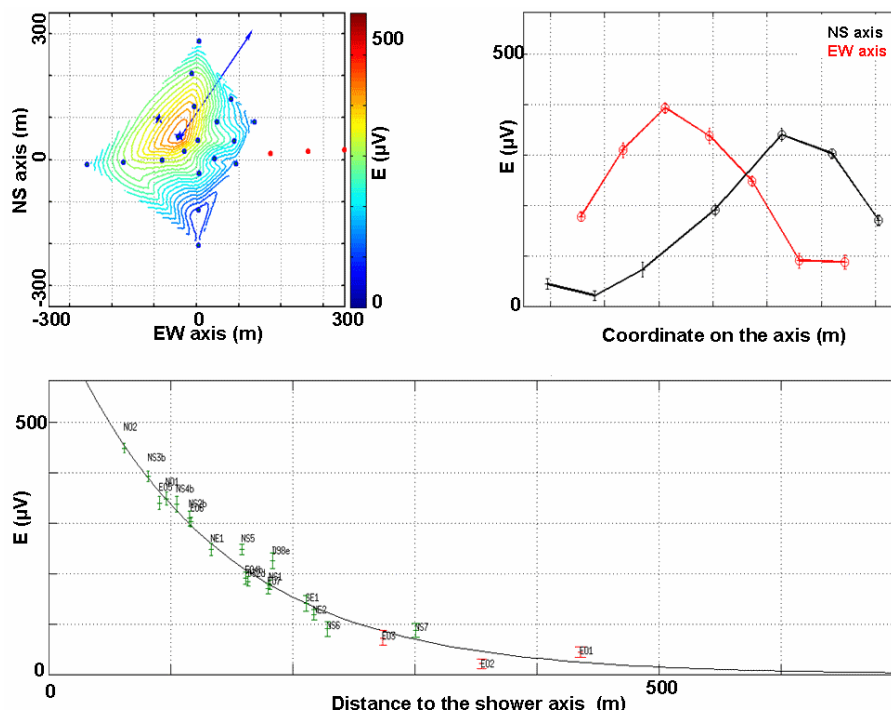


FIGURE 3.35 – Cartographie radio d'un événement. En haut à gauche : carte 2D du champ interpolé. En haut à droite : distributions selon l'axe Nord-Sud et l'axe Est-Ouest de la croix d'antennes. En bas : profil exponentiel ajusté.

Ces cartes permettent notamment de détecter des dysfonctionnements des dipôles pour certains événements pathologiques. Un exemple est représenté dans la figure 3.36 : le profil initial démontre un ajustement médiocre. La plupart des champs mesurés sont éloignés du profil ajusté. La carte interpolée du champ radio, ainsi que les distributions mesurées sur deux axes du réseau indiquent clairement l'origine du problème : la cinquième antenne du bras Est-Ouest a enregistré un champ très faible qui biaise l'ajustement. En ignorant l'antenne E05 lors de la minimisation, on retrouve une forme de profil exponentiel correctement ajusté sur les champs mesurés. Initialement, avec le seul profil latéral, la mise en valeur de ce type de panne n'était pas aisée. La mise en évidence de ces dysfonctionnements permet de réduire les erreurs sur l'estimation du paramètre ϵ_0 . La corrélation en énergie réalisée en aval sera ainsi plus satisfaisante.

Il est possible de réaliser ces ré-ajustements de trois manières différentes :

- Par l'observation systématique des cartes d'évènements par la recherche de la présence d'une antenne mesurant un champ incorrect.
- Par l'utilisation d'un script automatique : pour chaque évènement, les antennes ayant enregistré une impulsion sont ignorées une par une et un nouvel ajustement est à chaque fois réalisé. Un gain particulièrement important sur le nouveau χ^2 obtenu peut alors révéler un dysfonctionnement de l'antenne ignorée. C'est une technique d' 'outlier removal'.
- Par le suivi de qualité de l'expérience présenté dans ce chapitre. Les pannes sont clairement identifiées, les antennes présentant un dysfonctionnement ignorées des analyses et les profils correctement ajustés.

Ces trois méthodes montrent des résultats semblables : par exemple le défaut du profil de l'évènement de la figure 3.36 est identifié par les trois analyses.

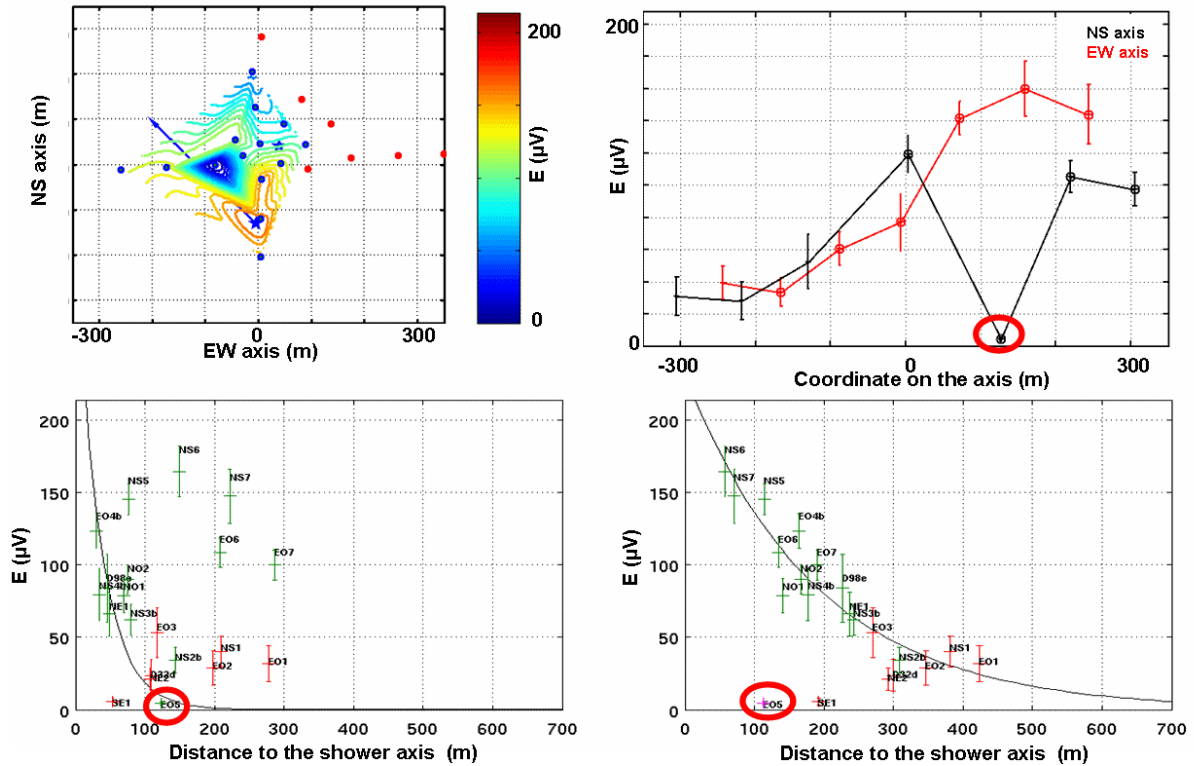


FIGURE 3.36 – Cartographie radio d'un évènement pathologique. En haut à gauche, carte 2D du champ interpolé. En haut à droite : distributions selon l'axe Nord-Sud et l'axe Est-Ouest de la croix d'antennes. En bas à gauche : profil ajusté initialement. En bas à droite : profil ajusté en ignorant l'antenne EO5, entouré d'un cercle rouge sur les 4 parties du graphique.

L'extension latérale du champ radio

Les distributions latérales mesurées par l'expérience CODALEMA-II peuvent se séparer en deux catégories :

- Les 2/3 des profils ont un comportement clairement exponentiel avec un d_0 de l'ordre de la centaine de mètres. La plupart de ces événements est correctement ajustée par le modèle exponentiel. Un exemple est donné dans la figure 3.35. La carte 2D du champ radio indique une symétrie autour de l'axe de la gerbe.
- 1/3 des événements montre un profil plat. A nouveau cette famille peut être séparée en deux ensembles.
 - une grande partie de ces événements ont un profil plat selon tous les axes du réseau. Le d_0 évalué est largement supérieur à ceux des profils exponentiels, mais avec un χ^2 satisfaisant. De ce dernier point de vue, ces profils pourraient être rapprochés de la première famille des profils dit 'exponentiels'.
 - Certains événements présentent des profils anormaux. Les distributions latérales indiquent des variations locales importantes du champ radio sans montrer une décroissance exponentielle d'ensemble marquée. La position du cœur radio étant libre dans l'ajustement, et compte tenu de la présence de ces variations, le profil retrouvé est très peu satisfaisant. Les valeurs de d_0 et ε_0 retrouvées sont alors aberrantes. Avant leur correction, les événements associés à des pannes ou des dysfonctionnements des antennes font partie de cet ensemble.

La distribution des d_0 est présentée dans la figure 3.37. Plusieurs remarques peuvent être faites. La distribution est centrée autour d'une valeur la plus probable de 120 mètres. La queue de distribution se prolonge jusqu'à 1000 mètres. Dans ce pic se trouvent les deux sous-familles que nous venons d'évoquer. Celles avec un d_0 vraiment important, et celles dont le d_0 est artificiellement surévalué par les larges variations anormales du champ. Le pic à 1000 mètres est un artefact dû à la borne supérieure du paramètre libre dans le processus de minimisation. Les valeurs réelles des paramètres peuplant le pic sont donc supérieures à cette valeur.

Cette variation de d_0 avec l'angle zénithal est notamment prédite par le modèle géosynchrotron de Tim Huege [90] : plus la gerbe est inclinée plus le ε_0 va diminuer, et a contrario le d_0 augmenter (Fig. 3.38).

Il est possible pour comprendre cet effet d'augmentation du d_0 avec l'angle zénithal, d'utiliser l'analogie d'une lampe torche. Dans le plan du sol, la tache lumineuse n'a pas la même taille selon l'inclinaison de la lampe torche (cela correspond à la forme ovoïde observée dans les cartes 2D des champs radio). La forme et l'intensité de la tache ne vont par contre pas changer dans un plan perpendiculaire au faisceau lumineux (équivalent au plan de la gerbe dans lequel le profil est ajusté). Cependant, lorsque la gerbe est inclinée, le premier point d'interaction et, a priori, le maximum d'émission radio a lieu plus loin du sol. Pour revenir à notre analogie, on va éloigner la lampe de notre feuille test, et donc observer une tache plus large. Le d_0 va donc augmenter et le ε_0 diminuer, afin de conserver l'énergie totale, d'autant plus que la gerbe sera inclinée (Fig. 3.39).

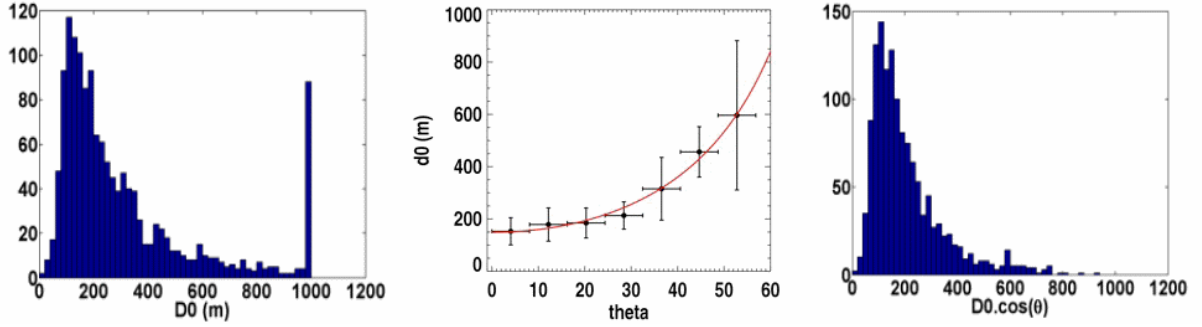


FIGURE 3.37 – A gauche : distribution des d_0 retrouvés par l'ajustement exponentiel. Au centre : évolution du d_0 avec l'angle zénithal. A droite : distribution des $d_0 \cos \theta$. Les événements avec $d_0=1000$ m sont ignorés.

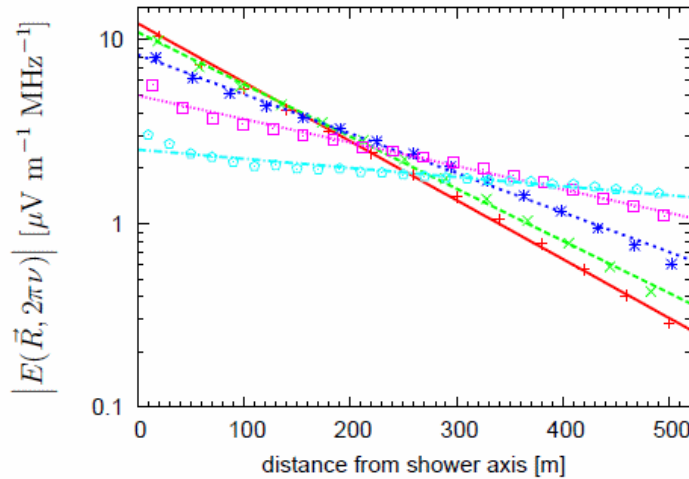


FIGURE 3.38 – Différents profils en fonction de l'angle zénithal dans le modèle analytique de Huege. De haut en bas, pour une distance nulle : 0° , 15° , 30° , 40° et 60° . Figure tirée de [90]

Cet effet attendu d'augmentation du d_0 en fonction de l'angle zénithal est bien présent dans les données (Fig. 3.37) et explique en partie la largeur de la distribution des d_0 observés. Compte tenu de la relation apparente entre le d_0 et le $\cos(\theta)$, il est possible de corriger le d_0 de cet effet d'inclinaison de gerbe. Dans ce cas, la largeur de la distribution diminue légèrement (Fig. 3.37, droite). La largeur de cette dernière distribution pourrait être due à l'énergie, à la fluctuation gerbe à gerbe ou à des effets expérimentaux.

La position du pied de gerbe reconstruit en radio

La position du pied de gerbe reconstruit en radio est, en première approximation, proche de celle déduite des scintillateurs. Notons, par exemple, qu'un critère de sélection, utilisé plus tard pour la corrél-

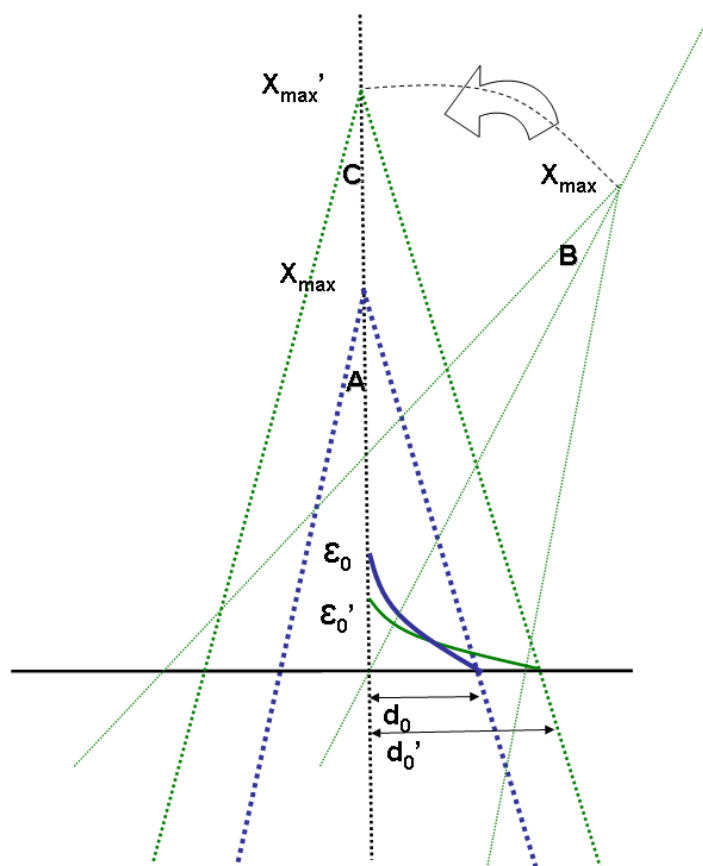


FIGURE 3.39 – Deux gerbes A et B ont une même énergie E_p . Leurs X_{max} sont donc identiques. Du point de vue de la radio, la gerbe B est identique à la gerbe C obtenue par rotation géométrique en faisant la double hypothèse que le champ radio est émis en un flash au moment du X_{max} et focalisé selon un angle fixé. Le d'_0 , de B et de C est donc supérieur au d_0 de A. La conservation de l'énergie donne $\epsilon'_0 < \epsilon_0$.

lation en énergie, est une distance entre les deux cœurs inférieure à 300 m. Cependant, ces deux estimations correspondent à des lieux distincts : celui du maximum du champ radio émis le long de la gerbe et focalisé vers le sol, et celui du maximum de la distribution de particules au sol. D'une manière similaire au dt entre temps d'arrivée du front d'onde radio et de la galette de particules, on peut s'attendre à des différences de second ordre, qui soient liées à un éventuel effet physique. Les particules de la galette pourraient ainsi être déviées de leur trajectoire initiale par le champ magnétique entre le maximum de l'émission radio et l'arrivée au sol de la gerbe. Il est également possible que les motifs de polarisation légèrement asymétriques, même en polarisation Est-Ouest, et ajustés par une fonction ne tenant pas compte de cette asymétrie donnent un décalage de cœurs. Les résultats des analyses obtenus avec le DAM et les antennes dipolaires sont les suivants :

- Les données obtenues par les antennes du DAM mettent en évidence un décalage systématique d'une cinquantaine de mètres selon l'axe Est-Ouest de la position du cœur radio, et du cœur particules [70].

- La position moyenne des pieds de gerbe déduits de l'ajustement exponentiel des profils par les antennes dipolaires est décalée du même ordre de grandeur et selon la même direction par rapport à la position du pied de gerbe particules. Un décalage selon l'axe Nord-Sud, d'environ 20 m apparaît également (Fig. 3.40).

Il n'est cependant pas exclu qu'un biais de reconstruction scintillateurs soit la cause de ces deux phénomènes.

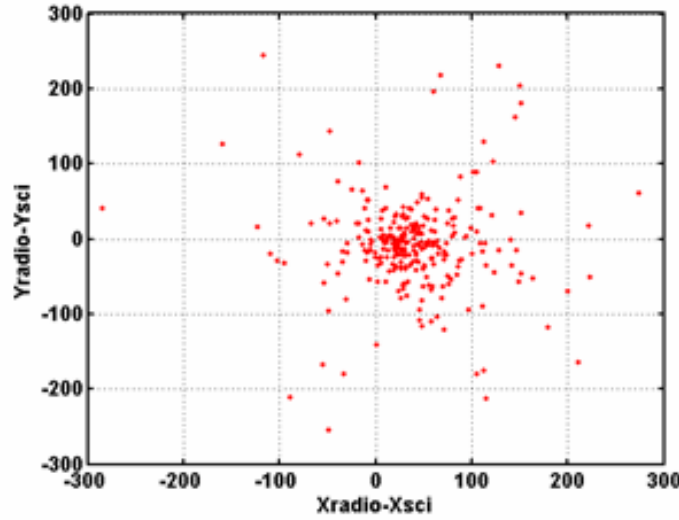


FIGURE 3.40 – Décalages observés entre le pied de gerbe radio et le pied de gerbe particules.

3.3 La corrélation en énergie

La première corrélation en énergie pour CODALEMA-II a été mise en évidence dans la thèse de Thomas Saugrin [91]. Depuis cette date, une statistique plus importante a été accumulée et permet des études plus poussées que nous allons présenter maintenant.

La corrélation sera réalisée entre E_p énergie reconstruite par les scintillateurs et l'estimateur radio ε_r défini par :

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon_0}{corr} \quad (3.7)$$

Le terme *corr* est une correction du paramètre ε_0 . Quatre principales corrections seront comparées :

- $corr = 1$: aucune correction n'est appliquée $\varepsilon_r = \varepsilon_0$.
- $corr = (\vec{v} \wedge \vec{B})_{EW}$: la correction du modèle géomagnétique présenté en début de chapitre.
- $corr = (\vec{v} \wedge \vec{B})_{EW} \cdot \cos(\theta)$: correction analogue à celle proposée par H. R. Allan dans [48].

- $corr = (\vec{v} \wedge \vec{B})_{EW} + c$: intermédiaire des deux premières corrections, une partie du champ est corrigée du facteur de Lorentz. c est une valeur indépendante de l'angle d'arrivée. Elle peut être traduite physiquement par la contribution d'une source d'émission indépendante du champ magnétique.

La statistique utilisée est la suivante :

- Les événements en phase production enregistrés entre 27/11/06 et 03/01/2010, avec une multiplicité initiale de 3 antennes, en coïncidence et internes : 604 événements correspondent à ces coupures (voir tableau 3.1).
- Une énergie supérieure à $10^{16.7}$ eV, seuil de détection en radio, soit 505 événements.
- Une multiplicité supérieure ou égale à 5. Cette coupure plus sévère par rapport à la multiplicité minimale de 3, permet l'utilisation de 4 paramètres libres ϵ_0 , d_0 , x_0 et y_0 lors de l'ajustement du profil en radio. 377 événements passent cette sélection.
- Une distance entre les cœurs reconstruits inférieure à 300 m, soit 319 événements.
- Une correction géomagnétique supérieure à 0.1 : seuls 5 événements sont éliminés par cette dernière coupure. Elle est pourtant indispensable. En effet pour ces événements, la correction associée au champ magnétique va complètement biaiser la minimisation. De plus, la résolution angulaire du réseau laisse une incertitude importante sur la correction à prendre en compte. Au final, l'étude en corrélation est réalisée avec 314 événements.

Les signaux radio, corrigés de l'ensemble de la chaîne expérimentale et filtrés entre 23 et 82 MHz, sont exprimés en $\mu\text{V/m}$. L'énergie déduite des données scintillateurs est exprimée en eV. Nous chercherons, en toute généralité, une loi de puissance entre ϵ_r et E_p d'une façon semblable aux expériences pionnières de Moscou et du Mont Chacaltaya. Pour ce faire, nous réaliserons un ajustement linéaire entre $\log(E_{cic})$, avec E_{cic} l'énergie déduite des données scintillateurs, et $\log(\epsilon_r)$. Cette méthode a deux avantages par rapport à un ajustement d'une loi de puissance dans l'espace linéaire.

- La méthode pour la minimisation des erreurs en x et en y , basée sur le travail de la référence [92], ne peut être utilisée que dans le cadre d'un ajustement linéaire.
- Le biais induit par des points particulièrement éloignés de l'ajustement est plus faible dans l'espace logarithmique. Plutôt que de minimiser les résidus en énergie absolue, on minimise leur logarithme. De ce point de vue, l'ajustement est moins influencé par la statistique utilisée et les points particulièrement éloignés du reste du nuage.

La relation recherchée est donc du type :

$$\log_{10}(\epsilon_r) = a \times \log_{10}(E_{cic}) + b \quad (3.8)$$

$$\text{équivalent dans l'espace linéaire à } \epsilon_r = 10^b \times E_{cic}^a \quad (3.9)$$

Un tirage Monte-Carlo représenté dans la figure 3.41 montre qu'une erreur relative de 30% sur l'énergie vraie du primaire correspond à une erreur absolue de 0.15 dans l'espace logarithmique (Fig. 3.41). Cette erreur ne dépend pas de l'énergie. Le polynôme permettant le meilleur ajustement de ce Monte-Carlo permettra de traduire les erreurs d'un espace à l'autre. Ces erreurs sont de deux types :

- L'erreur systématique correspond aux fluctuations gerbe à gerbe. Deux rayons cosmiques identiques (nature, énergie, et angle d'arrivée) auront des premiers points d'interaction différents, et donc un développement de gerbe différent. Ainsi, au sol, la densité de particules ne sera pas la même, et l'énergie retrouvée lors de l'analyse des événements scintillateurs sera différente. Des simulations nous indiquent que cette erreur est de l'ordre de 30 %. Quelles que soient la qualité et la taille du détecteur, cette erreur est incompressible. Elle est pour le moment inconnue en ce qui concerne l'estimateur radio de l'énergie.
- L'erreur statistique est propre au détecteur. Un détecteur parfait aurait une erreur statistique nulle. Dans le cadre de Auger, l'erreur statistique du réseau de cuves est de 5%. Pour les scintillateurs de CODALEMA-II, on l'évaluera à quelques % [76]. En radio, l'erreur statistique donnée par l'ajustement exponentiel est d'environ 10% ([91],[93]), mais peut varier dans de grandes proportions d'un événement à l'autre, traduction des profils mal reconstruits. Nous verrons dans la dernière partie que des sources éloignées et rayonnant a priori de manière uniforme sur l'ensemble du réseau, induisent des champs mesurés variant dans d'assez grandes proportions ($\pm 25\%$). Les corrections appliquées à ε_0 augmentent par ailleurs cette erreur.

Ainsi, pour les scintillateurs, l'erreur relative totale est de l'ordre de 30% soit 0.15 absolu en échelle logarithmique. Pour la radio, la limite basse est donnée par l'erreur statistique, 10% dans le meilleur des cas, mais pouvant croître dans de grandes proportions. On peut légitimement imaginer que les fluctuations gerbe à gerbe ont moins de conséquence sur la radio que sur la densité de particules au sol. Nous utiliserons tout d'abord l'hypothèse d'une erreur relative totale en radio de 30% identique à celle des scintillateurs. Cependant une étude dans l'espace des erreurs permettra de balayer d'autres possibilités d'erreurs. L'estimation finale de cette erreur systématique ne pourra être réalisée qu'avec des simulations basées sur les récents travaux théoriques.

La prise en compte des deux erreurs est capitale. Si on ajuste la droite sans prendre en compte ces incertitudes, le paramètre de pente de la corrélation diffère très largement. En réalisant un tirage Monte-Carlo, à partir d'une loi vraie en $\varepsilon_r) \propto E_{cic}^{1.3}$ puis en brouillant les grandeurs avec une erreur de 30% sur ε et E_{cic} , il est possible de rechercher, d'une manière analogue à ce qu'on a fait pour les données expérimentales, l'ajustement optimal. Selon que l'on prenne ou non en compte les erreurs sur x et y , le paramètre de pente change de quelque 15%. Elle n'est retrouvée correctement que dans le cas de la prise en compte des deux erreurs (Fig. 3.42).

Selon que l'on applique ou non la correction du modèle géomagnétique, la corrélation change. La loi de puissance retrouvée varie entre 1 et 1.3 dans les cas respectifs $corr=1$ ou $corr=(\vec{v} \wedge \vec{B})_{EW}$ (Fig. 3.43, et tableau 3.5). Rappelons que les premières expériences, réalisées dans les années 60, trouvaient des puissances 1/2 ou 1, qui correspondent à des rayonnements incohérents et cohérents. Cependant, dans une première tentative, l'expérience de Moscou avait trouvé une relation quadratique entre énergie et champ radio. Les paramètres de l'ajustement trouvé dépendent peu de la statistique utilisée. Une étude

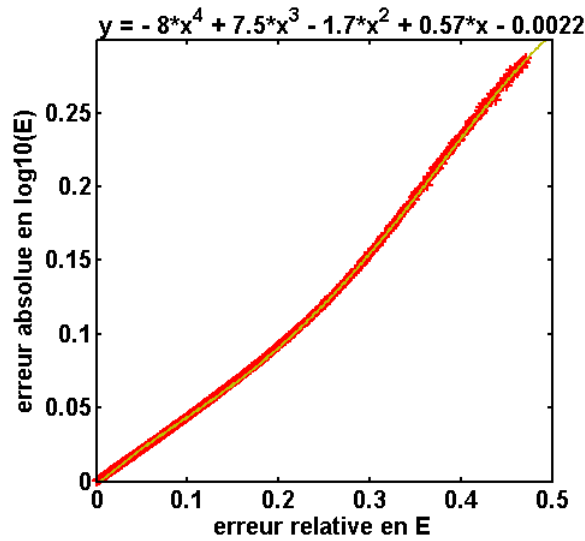


FIGURE 3.41 – Tirage Monte-Carlo de l'erreur absolue en valeur logarithmique en fonction de l'erreur relative pour une distribution gaussienne. L'ajustement réalisé est de degré 4. Il va permettre de 'traduire' l'erreur d'un espace à l'autre.

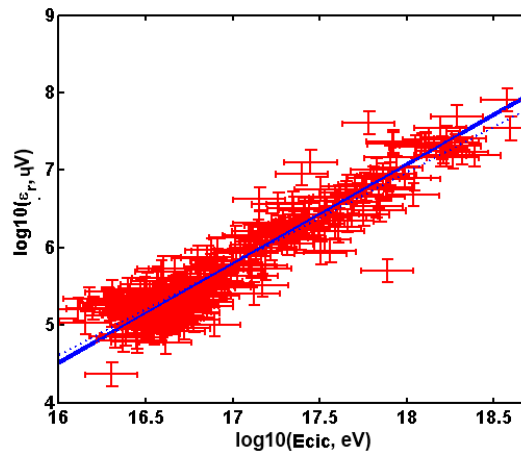


FIGURE 3.42 – Tirage Monte-Carlo de la corrélation : impact des erreurs. Sans prendre en compte les erreurs la corrélation est correctement ajustée par la courbe en pointillées. Avec prise en compte, la pente est accentuée (ligne pleine).

complémentaire a été menée pour laquelle 10000 tirages ont été réalisés sur des moitiés de sélection, montrant une variation gaussienne de la pente et de l'ordonnée à l'origine de l'ordre de 10%.

Au vu de la paramétrisation proposée par H. R. Allan, il pourrait être naturel d'attendre une corrélation linéaire entre champ radio et énergie de la gerbe. Une manière de changer l'ajustement est de modifier les erreurs relatives sur les particules et la radio. Avec les données obtenues par CODALEMA-II, la seule manière de trouver une pente compatible avec 1, dans le cadre de l'effet géomagnétique est

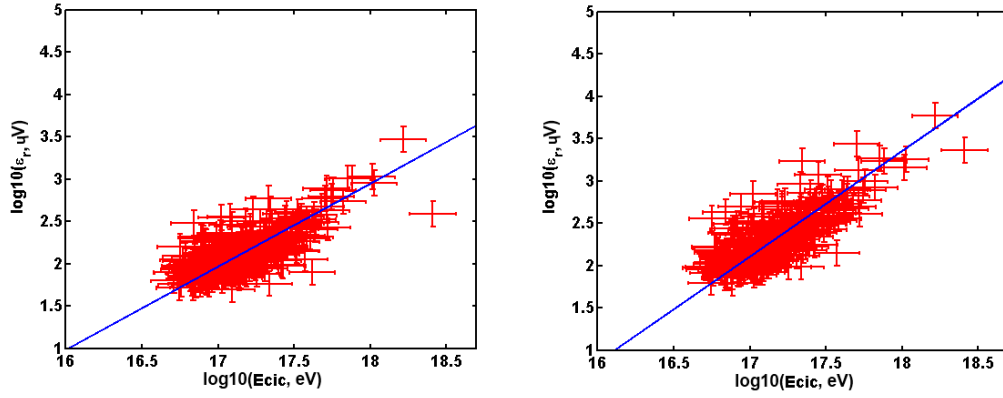


FIGURE 3.43 – Ajustement de la corrélation en énergie : sans correction géomagnétique (à gauche), et avec correction (à droite).

Correction	Origine a	Pente b	Sigma des résidus	Expression de la corrélation
1	-14.7 ± 0.8	0.98 ± 0.05	0.21	$\varepsilon_0 = 10^{-14.7} \cdot E_{cic}^{0.98}$
$\vec{v} \wedge \vec{B}_{EW}$	-19.0 ± 0.9	1.24 ± 0.05	0.22	$\frac{\varepsilon_0}{\vec{v} \wedge \vec{B}_{EW}} = 10^{-19} \cdot E_{cic}^{1.24}$
$\vec{v} \wedge \vec{B}_{EW} \times \cos(\theta)$	-19.0 ± 0.9	1.25 ± 0.05	0.16	$\frac{\varepsilon_0}{\vec{v} \wedge \vec{B}_{EW} \times \cos(\theta)} = 10^{-19} \cdot E_{cic}^{1.25}$

TABLE 3.5 – Caractéristiques des corrélations en énergie pour différents estimateurs radio.

d'augmenter l'erreur sur l'estimateur radio dans de grandes proportions (Fig. 3.44). La relation linéaire est trouvée naturellement dans le cas d'un modèle sans effet géomagnétique. Avec les hypothèses initiales sur les erreurs radio et particules, la relation trouvée s'approche plus de celle proposée par l'expérience de Moscou [50] proposant initialement une relation en $\varepsilon \propto E^2$.

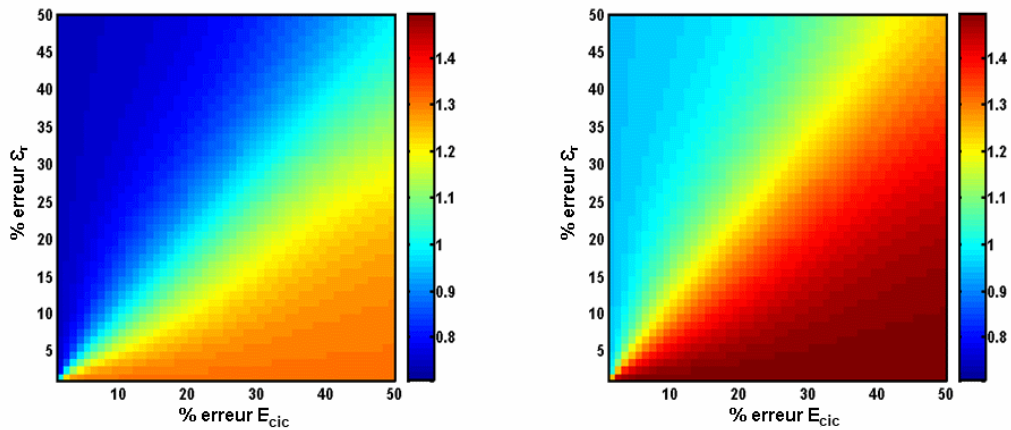


FIGURE 3.44 – Pente retrouvée, en échelle de couleur, de la relation linéaire entre $\log_{10}(E_{cic})$ et $\log_{10}(\varepsilon_r)$. Sans correction géomagnétique (à gauche), et avec correction (à droite).

Il est également possible de rechercher quel modèle (aucune correction, ou correction géomagné-

tique) ajuste au mieux les données. Un modèle intermédiaire peut également être recherché. Au final, c'est la correction suivante qui est réalisée, avec c variant de 0 à 2 :

$$corr = (\vec{v} \wedge \vec{B})_{EW} + c \quad (3.10)$$

- Lorsque c est nul, nous retrouvons exactement le modèle géomagnétique. La présence dans les cartes de direction d'arrivée, de 4 événements provenant d'une région du ciel pour laquelle $\vec{v} \wedge \vec{B}$ est quasiment nul a tendance à pénaliser le modèle géomagnétique pur. Ces 4 événements ont des valeurs de $\vec{v} \wedge \vec{B}$ inférieures à 0.01 soit des corrections d'un facteur 100. Compte tenu du seuil de détection radio à 10^{17} eV pour les régions à faible correction, cela signifierait que ces événements ont une énergie de près de 10^{19} eV, ce que ne montrent pas les scintillateurs.
- Lorsque c est grand, la correction géomagnétique est négligeable, et on tend vers le modèle sans correction. A l'inverse, le déficit au Sud observé dans les cartes de ciel est un argument qui pénalise le modèle sans correction.
- Entre ces deux régimes, il existe donc deux contributions au champ radio modélisé : une correction géomagnétique et une correction indépendante de ce dernier. Dans le cas idéal, il serait possible de trouver la valeur du terme constant via la recherche du minimum du sigma des résidus. Cependant, le lot de données actuel ne permet pas de trouver cette valeur car la statistique l'influence trop (Fig. 3.45).

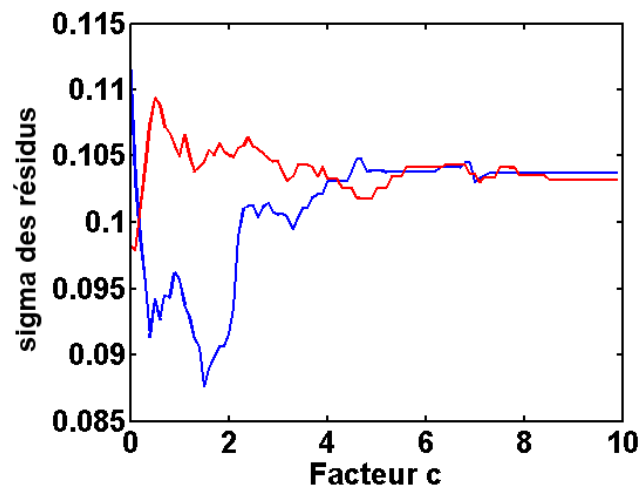


FIGURE 3.45 – Evaluation du sigma en valeur absolue de la corrélation en fonction du terme constant dans la correction du champ radio pour la statistique complète (courbe bleue) et une demi-statistique (courbe rouge).

Conclusion sur la corrélation en énergie

Si la corrélation en énergie semble établie, son expression et la relation exacte entre ε_r et E_{cic} , demandent des données complémentaires pour être fermement affirmées.

- Expression de ε_r : Un certain nombre d'observations (carte des directions d'arrivée, efficacité radio en fonction de $\vec{v} \wedge \vec{B}$, mais des événements détectés en provenance du champ magnétique) ont tendance à favoriser un processus mixte d'émission radio de la gerbe : une partie liée à un effet géomagnétique, et une partie indépendante de celui-ci (excès de charge ou émission coulombienne). Les résidus observés ne permettent pas encore de trancher entre les différents modèles testés.
- La valeur du paramètre de pente de la corrélation dans l'espace logarithmique, et donc la puissance reliant ε_r et E_{cic} peuvent varier dans de grandes proportions en fonction des erreurs. Si l'erreur est relativement bien définie pour les scintillateurs, elle ne l'est pour le moment pas en ce qui concerne la radio. En allant plus loin dans le raisonnement, il est possible de voir dans cette variation les limites de l'ajustement exponentiel, limites confortées et mises en évidence par les simulations actuelles.

L'étude fine de la corrélation passe par plusieurs points : d'abord par l'estimation précise des erreurs en radio sur les champs bruts mesurés par les antennes, sur le lobe et sur la correction *corr* appliquée à ε_0 mais également l'amélioration des profils (ajustement exponentiel à modifier, prise en compte de l'asymétrie des motifs au sol, ...). La mise en commun de deux corrélations en énergie sur des lieux avec des champs magnétiques différents pourrait permettre de fixer la contribution du mécanisme géomagnétique dans l'émission radio de la gerbe.

Chapitre 4

La préparation et mise en œuvre d'un système de radiodétection autonome

Un certain niveau d'autonomie est un objectif majeur à atteindre pour la technique de radiodétection des gerbes atmosphériques. Cette autonomie revêt quatre aspects importants :

- L'autonomie de trigger : cela nécessite de mettre en place un système d'auto-déclenchement. Le déclenchement ne se fait plus grâce à un second détecteur, comme c'est le cas de CODALEMA-II, mais directement sur le signal radio. Un déclenchement par seuil dans une bande filtrée est une possibilité. D'une manière analogue à ce qui est réalisé pour CODALEMA-II, en aval de l'analyse, le filtrage (analogique cette fois-ci) permet d'éliminer les contributions de bandes de fréquence particulièrement bruitées, rendant ainsi plus sensible la radiodétection des gerbes atmosphériques.
- L'autonomie de numérisation : la carte d'acquisition doit être intégrée au détecteur, pour permettre la numérisation du signal.
- L'autonomie d'analyse et de communication. Les données d'un réseau doivent être rapatriées pour pouvoir être analysées. Cette communication peut se faire par liaison sans fil (WiFi, GSM, 3G) ou filaire (fibre optique, ethernet, ...). Il est envisagé de mettre en place des niveaux de trigger plus élevés, entre plusieurs détecteurs. C'est par exemple une des stratégies de détection de l'Observatoire Auger. Ce système de trigger intelligent multi-échelle peut rapidement devenir indispensable pour une expérience de radiodétection. Cette problématique se pose d'autant plus que le taux de déclenchement est important. Pour les deux derniers points, la réduction des câbles signaux et alimentation est également un avantage non négligeable.
- L'autonomie en énergie : sur de vastes étendues, adaptées à la radiodétection, peu habitées et donc aux infrastructures réduites, l'autonomie en alimentation électrique est indispensable. Elle peut se faire par exemple par des panneaux solaires alimentant des batteries, qui, correctement dimensionnés, permettent d'atteindre un cycle utile de détection proche des 100%.

La préparation et la mise en place d'un système de détection radio autonome ont été abordées dans cinq optiques distinctes, qui correspondent aux différentes sections de ce chapitre. Dans les faits, elles ont été menées de front, mais, par souci de clarté, elles seront présentées dans l'ordre suivant :

- L'étude et la cartographie éventuelle des émissions radio parasites sur le site de Nançay : des premiers tests de déclenchements radio du réseau avaient été réalisés au début de l'expérience CODALEMA-I. Ils avaient permis une première cartographie de l'environnement radio de l'Observatoire de Nançay, mettant notamment en évidence des trajectoires d'avion et le mouvement des miroirs du radiotélescope. L'idée est ici la même : basculer le réseau câblé de CODALEMA-II en déclenchement radio, évaluer la qualité radio du site, inventorier les différents types de pollution et localiser les différentes sources de rayonnement parasite. On verra que l'une d'entre elles a permis d'estimer la résolution angulaire de l'expérience.
- Le développement d'un prototype : la première véritable tentative de radiodétection autonome avait été conduite avec l'installation de stations complètes sur le site de l'Observatoire Pierre Auger en Argentine, en 2006. Les caractéristiques et les premiers résultats de ces prototypes seront présentés [89].
- A partir de 2006, une nouvelle génération de station autonome a été développée. L'évaluation de la qualité de cette station passe notamment par la mise en place de tests de compatibilité électromagnétique (CEM), et la mesure de la sensibilité au bruit galactique.
- La mise en évidence des premières coïncidences : le déclenchement autonome et individuel des stations demande à dater avec précision les temps de déclenchement. La mise en évidence de coïncidences à 3 stations ou plus, associées ou non à des cosmiques pour cette première phase, est une étape importante. Pour le cas de l'expérience en Argentine, ces premières triangulations ont été réalisées avec des orages.
- La mise en évidence de coïncidences hors-ligne avec les réseaux de détecteurs au sol pour démontrer la faisabilité de la radiodétection des gerbes avec cette nouvelle génération de détecteurs.

4.1 L'étude et cartographie des RFI sur le site de Nançay

La radiodétection autonome sera probablement pénalisée par un environnement radio parasite important. Ainsi, le seuil de déclenchement devra être plus élevé pour un environnement bruité, afin de limiter le taux de comptage des stations. Il est donc important d'évaluer et de cartographier l'environnement radio du nouveau réseau autonome. L'utilisation du réseau câblé avec un grand bras de levier (600×400 m) donne une bonne précision à cette reconstruction. Pour permettre de travailler en déclenchement radio, plusieurs modifications ont été faites sur le réseau :

- L'acquisition des antennes n'était plus déclenchée par le réseau de scintillateurs.
- Une antenne, débranchée de sa carte d'acquisition, était directement reliée, via un filtre analogique 23-82 MHz à un oscilloscope.
- Le seuil de cet oscilloscope était réglé afin d'obtenir un taux de trigger de l'ordre du hertz, taux raisonnable en termes de volume de stockage nécessaire.
- La mise en place d'un générateur d'un signal porte pour ajuster le temps de transmission du signal logique.

- Le trigger externe de l'oscilloscope était relié à l'entrée trigger des cartes d'acquisition des antennes. C'est donc l'antenne reliée à l'oscilloscope qui déclenchait de manière autonome l'ensemble du réseau des dipôles.

Sur un peu plus de trois semaines de prises de données (ajoutées à un premier test de déclenchement radio sur quelques heures) environ 230000 évènements autonomes de multiplicité 4 ou plus ont été enregistrés. Trois types de sources ont été mises en évidence.

- Des sources très proches, internes à la station.
- Une source éloignée émettant un transitoire toutes les 1.32 s.
- Des sources mobiles traversant le ciel en quelques dizaines de secondes à quelques minutes, associées à des avions.

4.1.1 Les sources proches

Le premier test de détection autonome, sur une période réduite d'une nuit et d'une matinée, avait permis au mois de février 2010 de mettre en place une première cartographie du réseau. L'antenne utilisée pour le déclenchement était l'antenne D32, située à quelques mètres du bâtiment du DAM. Différentes sources d'émission de parasites ont alors été mises en évidence. Elles sont présentées dans la figure 4.1 : une antenne du radiohéliographe émettant des transitoires radio à partir de 9h27, soit l'heure de démarrage de l'observation routinière du soleil, et de différents bâtiments (électronique, administratif, cantine et DAM) produisant ponctuellement des signaux radio. Notons que les heures d'apparition de ces dernières sources, en début de matinée, sont en accord avec une activité humaine.

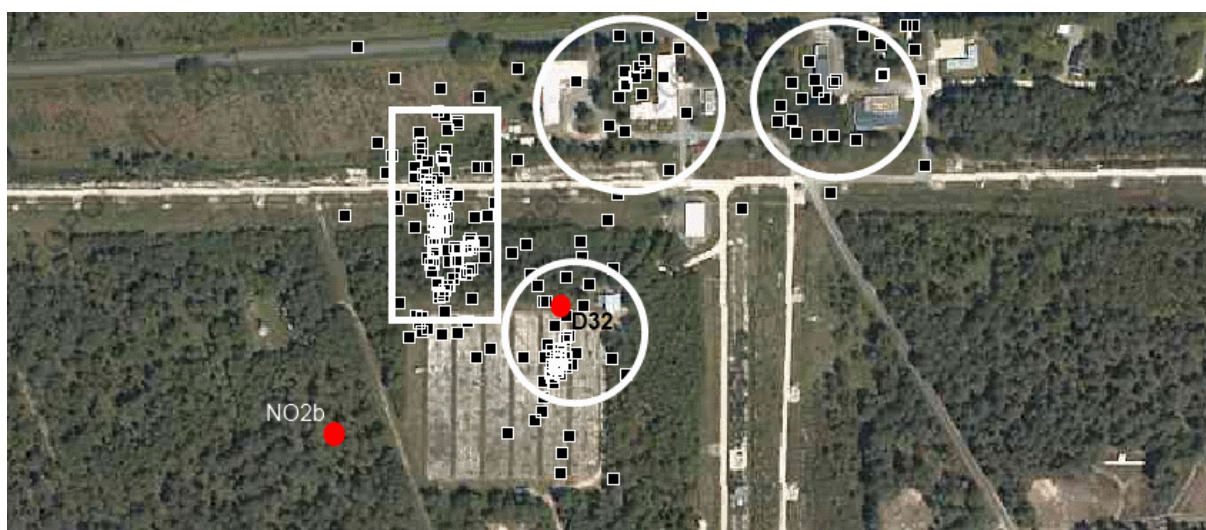


FIGURE 4.1 – Cartographie des triangulations des signaux enregistrés lors de la phase de test de détection autonome du mois de février 2010. Les trois cercles entourent le bâtiment du DAM, le bâtiment d'électronique et les bâtiments administratifs. Le rectangle est centré sur une antenne du radiohéliographe.

La campagne de déclenchement radio sur trois semaines a confirmé la localisation de ces premières sources. C'est l'antenne NO2b, un peu plus éloignée des bâtiments de l'observatoire, qui déclenchait l'enregistrement des événements. Plusieurs antennes du radiohéliographe du bras Est-Ouest émettent des parasites localisés par le réseau câblé de CODELAMA-II. Les heures d'émission sont en accord avec les recalages ponctuels du RH. Les antennes du radiohéliographe se remettent notamment en position initiale puis d'observation entre 00h00 et 00h15. D'autres recalages ponctuels, plus rares, surviennent pendant la journée. Ces mouvements ont été clairement vus (Fig 4.2), chaque jour, sur les événements sélectionnés (correspondant au rectangle de la figure 4.1).

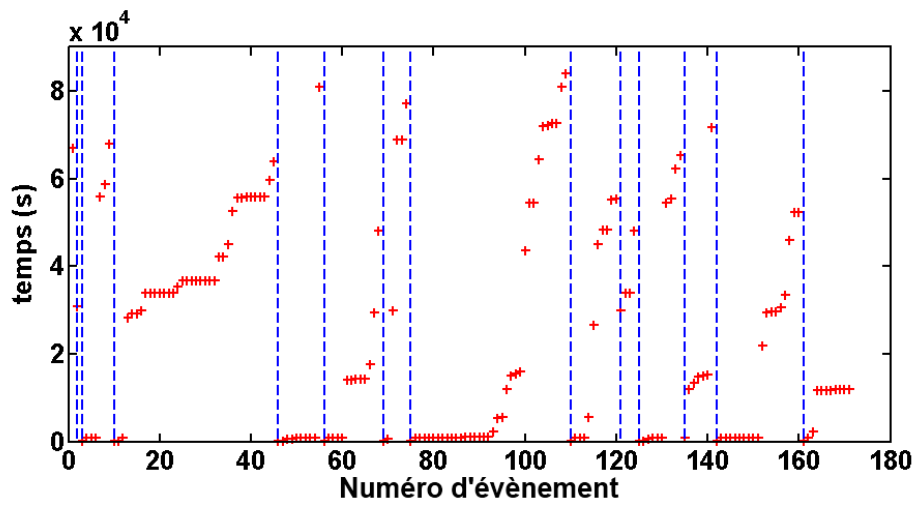


FIGURE 4.2 – Temps associés aux évènements triangulés en provenance de la ligne Est-Ouest du radiohéliographe, exprimés en secondes dans la journée entre 00h et 24h.

Le bâtiment du DAM semble également émettre ponctuellement des signaux radio particulièrement puissants. L'antenne la plus proche, D32, voit son spectre en fréquence complètement dominé par ce parasite (Fig. 4.3). Une émission analogue avait été observée au début de CODALEMA-I. Il s'agissait alors du système de climatisation du DAM [74]. Ce dernier a depuis été blindé.

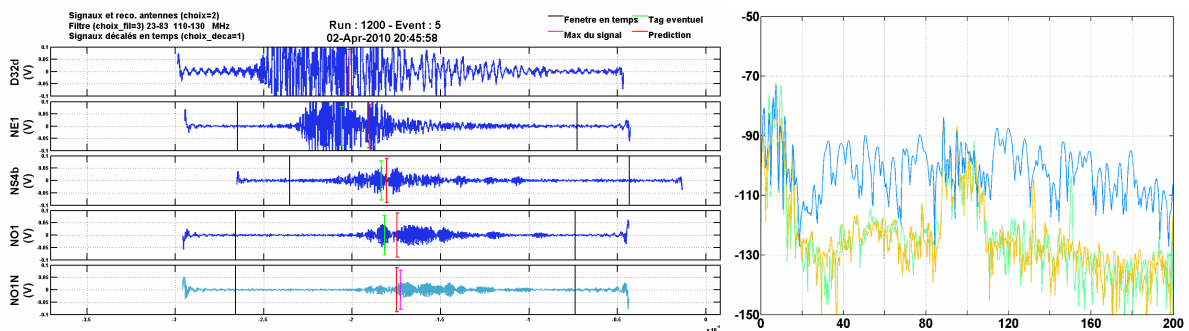


FIGURE 4.3 – Evènement associé au DAM, la puissance du signal visible dans le spectre en fréquence de D32 traduit l'amplitude des signaux observés.

Ces sources se distinguent par leur sporadicité, et leur faible multiplicité. Les antennes les plus proches de ces sources observent généralement des signaux particulièrement puissants, qui sont rapidement atténués pour les antennes plus éloignées. Les impulsions associées sont peu compactes.

4.1.2 Les sources éloignées

La source la plus souvent détectée par le réseau câblé émettait un transitoire de manière répétitive et régulière, toutes les 1.32 s. Une triangulation sphérique a été réalisée avec l'hypothèse d'altitude nulle (la reconstruction en onde plane indiquait un signal à l'horizon). Les coordonnées d'émission X_0 et Y_0 reconstruites montrent une distribution relativement large (la multiplicité faible associée à ces événements pénalise la précision de la triangulation), mais cependant avec des maximums marqués, permettant de localiser une source à 2 km au sud-est de la station, sans doute associée à une clôture métallique électrifiée présente à cet endroit. Cette source présente plusieurs caractéristiques : des multiplicités plutôt faibles, une régularité d'apparition exceptionnelle sur des périodes de plusieurs heures à plusieurs jours, et une reconstruction sur l'horizon de la direction d'arrivée.

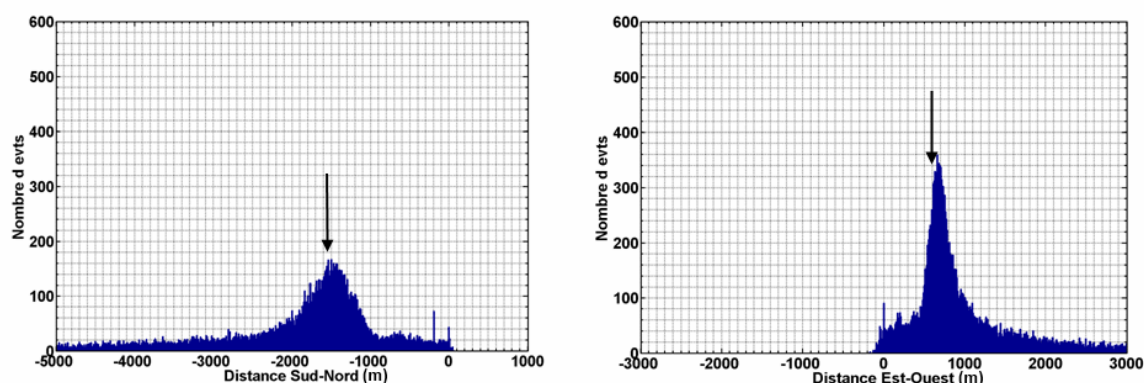


FIGURE 4.4 – Histogramme des positions en x et en y de la source localisée. Les flèches indiquent la position de la clôture métallique électrifiée.

4.1.3 Les sources mobiles

Les successions de directions d'arrivée reconstruites alignées dans le ciel avec de faibles mouvements en θ et ϕ entre deux événements consécutifs, sur des durées de quelques dizaines de secondes à quelques minutes peuvent être associés à des passages d'avions. Ces événements sont généralement associés à des multiplicités élevées, de l'ordre de 10 à 20 antennes ayant détecté une impulsion. Plusieurs hypothèses sont utilisées dans la suite des analyses. Compte tenu de la distance à l'objet reconstruit, on se place dans l'hypothèse d'une onde plane. L'avion vole à une altitude constante $z = h = r(t)\cos\theta$. Les trajectoires sont des droites (l'avion ne vire pas) parcourues à vitesse constante. Enfin, la courbure de la Terre est négligée. Cela signifie que l'altitude z de l'avion, projetée perpendiculairement sur la verticale de l'Observatoire est constante. Dans l'espace x, y, z , les équations du mouvement sont les suivantes :



FIGURE 4.5 – Source triangulée du signal périodique de 1.32 s projetée sur une vue aérienne de Nançay.

$$x(t) = a_0 t + a_1 = r(t) \sin \theta \cos \phi = z \tan \theta \cos \phi \quad (4.1)$$

$$y(t) = a_2 t + a_3 = r(t) \sin \theta \sin \phi = z \tan \theta \sin \phi \quad (4.2)$$

$$z(t) = h \quad (4.3)$$

$$\text{avec } r(t) = \frac{z}{\cos \theta} \quad (4.4)$$

Deux types de reconstructions de la trajectoire sont possibles. Directement dans l'espace θ, ϕ , ou dans l'espace x, y .

Reconstruction de la trajectoire dans l'espace θ, ϕ

Cette reconstruction est la plus intuitive car elle est réalisée directement dans la carte des directions angulaires d'arrivée. Elle demande donc de trouver une relation entre θ et ϕ , avec les hypothèses que nous venons de poser sur la trajectoire. On peut exprimer le temps t en fonction de x à partir de l'équation 4.1 :

$$t = \frac{h \tan \theta \cos \phi - a_1}{a_0}$$

qu'on injecte dans l'équation 4.2 pour obtenir :

$$\tan \theta = \frac{\alpha_1 \alpha_2 - \alpha_0 \alpha_3}{\alpha_2 \cos \phi - \alpha_0 \sin \phi} \quad \text{avec} \quad \alpha_i = \frac{a_i}{h}, i = 0, 1, 2, 3. \quad (4.5)$$

qui est une relation entre l'angle zénithal et l'angle azimutal pour un objet se déplaçant linéairement à vitesse et altitude constantes. Cette relation peut s'écrire de façon plus condensée en réalisant le changement de variable suivant :

$$\alpha = \frac{a_2 h}{a_1 a_2 - a_0 a_3}$$

$$\beta = -\frac{a_0 h}{a_1 a_2 - a_0 a_3}$$

L'équation 4.5 devient alors :

$$\alpha \cos \phi + \beta \sin \phi = \frac{1}{\tan \theta}.$$

Il ne reste plus qu'à minimiser le χ^2 associé en pondérant éventuellement chaque direction reconstruite en fonction de la multiplicité de l'évènement (Fig. 4.6). Notons par exemple que l'évènement associé à l'angle azimutal de 280° , éloigné de l'ajustement possédait une multiplicité faible.

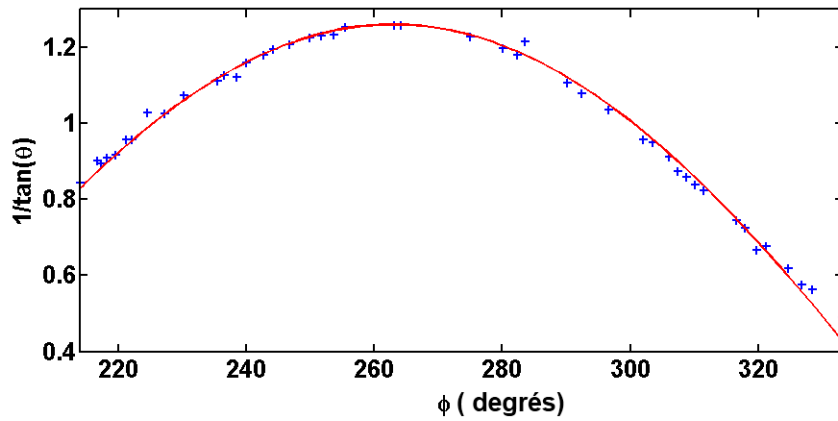


FIGURE 4.6 – Ensemble des points de la trajectoire de l'avion dans le plan θ - ϕ .

On voit que le rapport a_2/a_0 est égal à $-\alpha/\beta$ ce qui correspond au rapport des vitesses projetées selon les axes x et y . De plus, si on exprime y (équation 4.2) en fonction de x (équation 4.1) en faisant disparaître la dépendance en temps, on trouve, avec les définitions de α et β :

$$y = \frac{a_2}{a_0}x - \frac{a_1 a_2 - a_0 a_3}{a_0} = -\frac{\alpha}{\beta}x + \frac{h}{\beta}.$$

On a donc maintenant l'ensemble des points (x, y, z) de l'espace qui vont donner une trajectoire

correspondant à celle de l'avion :

$$\begin{pmatrix} x \\ -\frac{\alpha}{\beta}x + \frac{h}{\beta} \\ h \end{pmatrix}$$

On voit que l'altitude h est un paramètre libre. Cela est logique puisque l'altitude est une grandeur dégénérée dans ce problème, inaccessible dans l'hypothèse d'une onde plane. Modifier l'hypothèse sur l'altitude de l'objet se traduira par un déplacement de l'ordonnée à l'origine h/β de la droite dans le plan (x, y) tout en conservant l'ensemble des valeurs (θ, ϕ) .

Reconstruction de la trajectoire dans l'espace x, y

Au lieu de rester dans l'espace (θ, ϕ) pour trouver la relation entre x et y , on peut également projeter la trajectoire de l'avion dans le plan (x, y) , et tenter une reconstruction dans cet espace. Cette seconde méthode va nous permettre d'utiliser la variable temps t et de pouvoir estimer la résolution angulaire du détecteur. On ajuste les équations horaires de x et de y indépendamment avec les équations 4.1 et 4.2, comme présenté dans les figures 4.7 et 4.8.

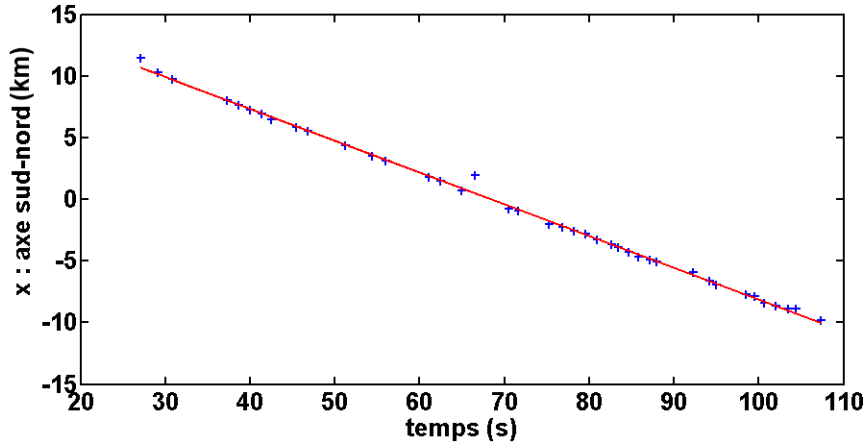


FIGURE 4.7 – Ensemble des points et ajustement en fonction du temps de la trajectoire de l'avion selon l'axe Nord-Sud.

L'ajustement donne les valeurs prédites (x_{att}, y_{att}) au cours du temps, et par conséquent les $(\theta_{att}, \phi_{att})$, toujours avec les relations 4.1 et 4.2. Les points particulièrement éloignés de l'ajustement, corrélés à des multiplicités faibles, peuvent être ignorés et l'ajustement amélioré par une itération. Celle-ci n'a pas été nécessaire pour la trajectoire présentée ici. La comparaison des angles mesurés et attendus permet de déduire le sigma associé selon l'angle zénithal et azimutal (Fig. 4.9 et 4.10). Pour l'exemple présenté, il vaut respectivement 0.30° et 0.76° .

La résolution angulaire du réseau CODALEMA est déduite en mesurant la différence angulaire totale entre directions attendues et directions reconstruites. Pour notre exemple, elle est de 0.60° . Les autres trajectoires reconstruites donnent des valeurs semblables de résolution angulaire.

Pour une altitude $z = h$ supposée, on peut estimer la vitesse linéaire de l'avion. Pour cela, il suffit de calculer la distance horizontale totale parcourue en prenant les valeurs issues des fits temporels linéaires

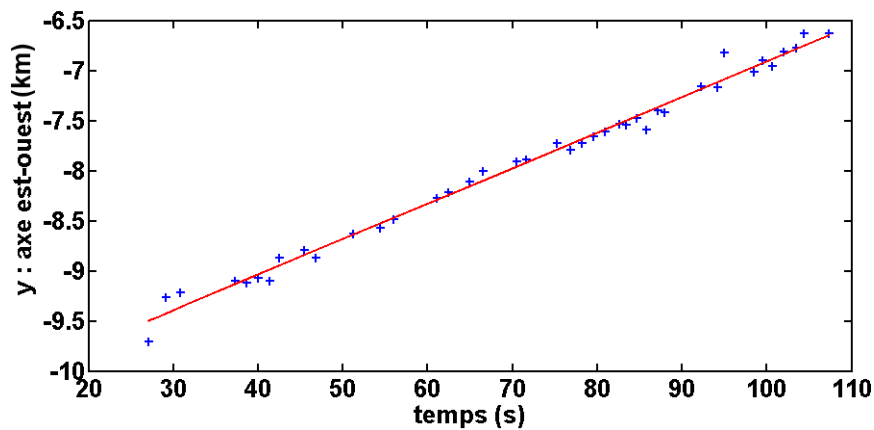


FIGURE 4.8 – Ensemble des points et ajustement en fonction du temps de la trajectoire de l'avion selon l'axe Est-Ouest.

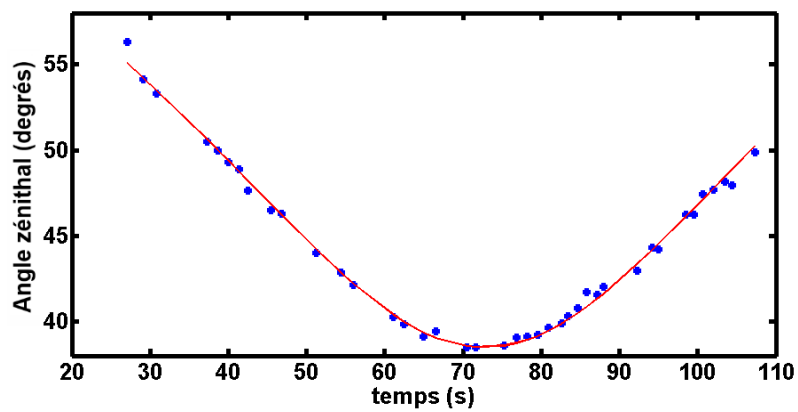


FIGURE 4.9 – Trajectoire réelle et prédite de l'avion pour l'angle zénithal.

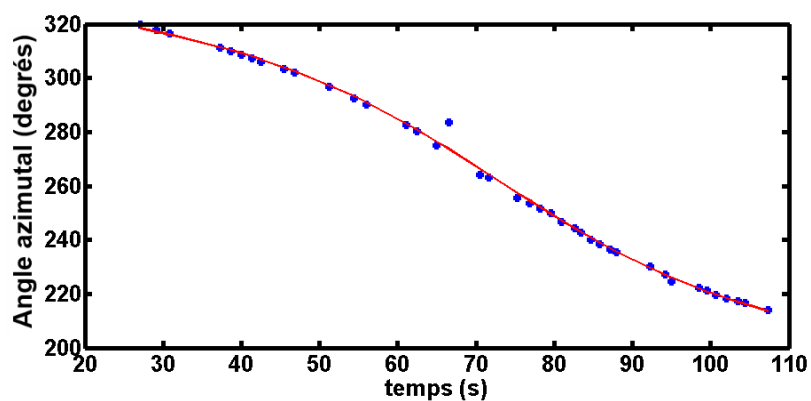


FIGURE 4.10 – Trajectoire réelle et prédite de l'avion pour l'angle azimutal.

de x et de y . Dans notre exemple, pour une altitude de $h = 10$ km, on trouve une distance au sol parcourue entre le premier point et le dernier point de 20 km. L'intervalle de temps correspondant à ces mesures

étant de 80 s, on en déduit une vitesse de 900 km.h^{-1} . x et y étant proportionnels à h , la distance horizontale et la vitesse lui seront également proportionnelles. Par exemple, si on prend une altitude de $z = 8 \text{ km}$, on trouve une distance horizontale parcourue de 16 km impliquant une vitesse de 700 km.h^{-1} . On obtient au final des couples de valeurs très raisonnables d'altitudes et de vitesses par rapport au sol pour un avion de ligne se déplaçant dans l'espace aérien supérieur (5.8 à 20 km). Pour l'espace inférieur (3.4 à 5.8 km), les vitesses déduites sont de l'ordre de 300 à 400 km/h. La trajectoire reconstruite des avions détectés par le réseau câblé est en accord avec l'orientation et le sens de parcours des couloirs aériens présentés dans la figure 4.11. Les avions vont du Nord au Sud et passent à l'Est et à l'Ouest de l'Observatoire. Les trajectoires triangulées rectilignes favorisent plutôt des avions triangulés dans l'espace supérieur.

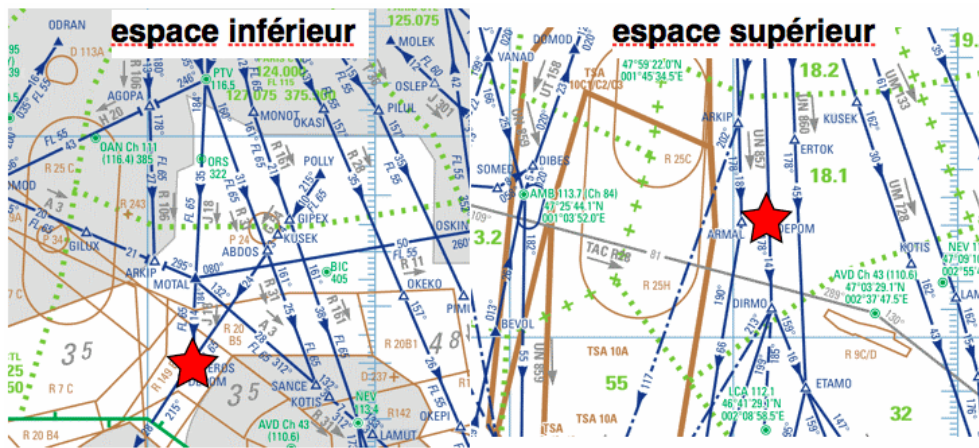


FIGURE 4.11 – Les voies aériennes au-dessus de la ville de Nançay (étoile rouge), pour l'espace inférieur (à gauche) et supérieur (à droite) suivent des trajectoires allant du Nord au Sud.

La source la plus probable de cette émission est le transpondeur de l'avion, produisant un signal environ toutes les secondes, correspond au dt typiquement observé entre deux événements consécutifs. La fréquence d'émission attendue de ce signal se trouve au delà du GHz, mais il est cependant possible qu'une antenne dipolaire de CODALEMA soit sensible à la porteuse de ce signal avec une contribution principalement centrée autour de 50 MHz (Fig. 4.12).

4.1.4 Conclusions sur les RFI

Cette dernière source de rayonnement parasite est sans doute la plus intéressante et la plus utile. Elle pourra dans l'avenir être utilisée comme un calibrateur. Présentons deux possibilités offertes par ces traces et en cours d'investigation (Fig. 4.14) :

- Calibration relative en temps : avec une hauteur d'avion connue (indiquée par exemple par la DGAC), il sera possible de comparer efficacement les temps relatifs attendus et mesurés des impulsions. Cette étude permettra d'évaluer la faisabilité de la reconstruction sphérique des gerbes atmosphériques en radio. Si l'on est capable de reconstruire une courbure correcte du front d'onde pour un avion se trouvant à quelques kilomètres du réseau, il sera a priori possible de mesurer également la distance à l'émission radio de la gerbe. Une légère courbure au second ordre semble apparaître pour les premières données, mais demande une étude précise.

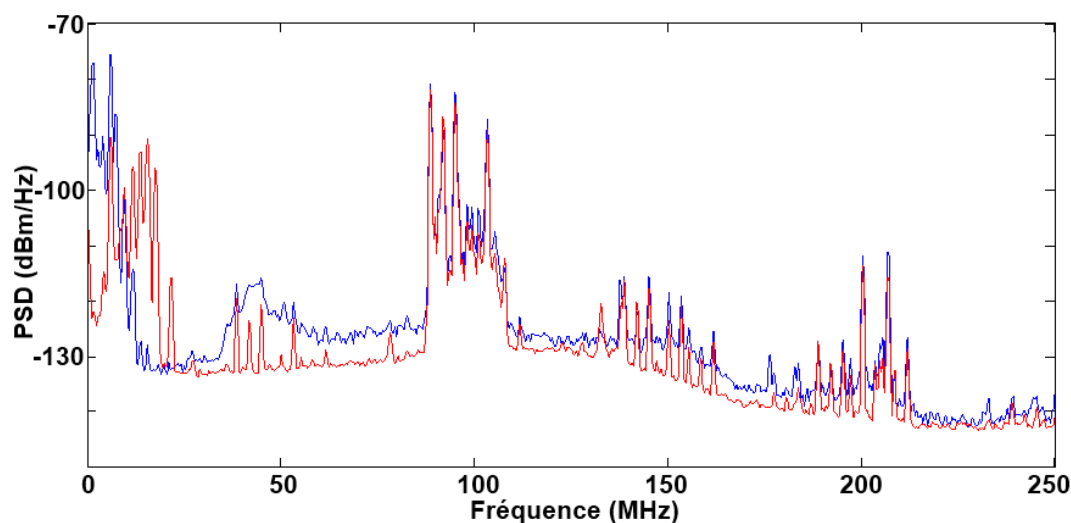


FIGURE 4.12 – Spectre associé au passage d'un avion mesuré lors de la campagne de déclenchement autonome du réseau CODALEMA-II (en bleu). En rouge, spectre de la même antenne, déclenché de manière logicielle, quelques jours plus tard.

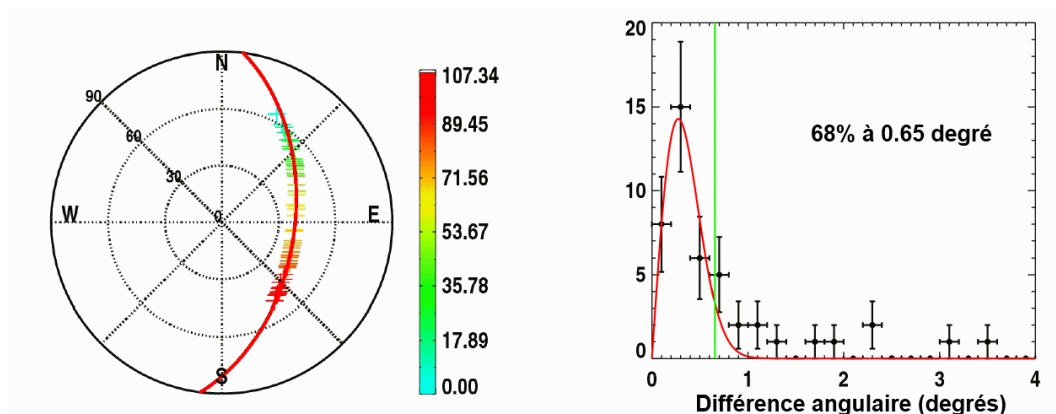


FIGURE 4.13 – A gauche, trajectoire triangulée dans le ciel d'un avion. Le temps est représenté en échelle de couleurs. A droite, histogramme des différences angulaires entre trajectoire reconstruite et trajectoire ajustée. La résolution angulaire estimée sur cette trace est de 0.6° .

- Calibration relative en amplitude. La source étant suffisamment éloignée dans le ciel, il est raisonnable de poser l'hypothèse que les antennes voient le même rayonnement de l'avion. Ainsi une antenne mesurant systématiquement un champ plus faible pourrait indiquer un facteur d'atténuation mal pris en compte, et la correction pourrait améliorer les profils. Des effets plus fins, tels que l'humidité du sol pourraient également être recherchés. Les amplitudes observées montrent une certaine irrégularité qu'il faut mettre en regard de certains profils ou variations galactiques mesurés.

Malgré ces possibilités de calibration, la technique de radiodétection autonome doit s'affranchir au maximum de ces sources. Le blindage des bâtiments est une possibilité pour le cas spécifique de Nançay.

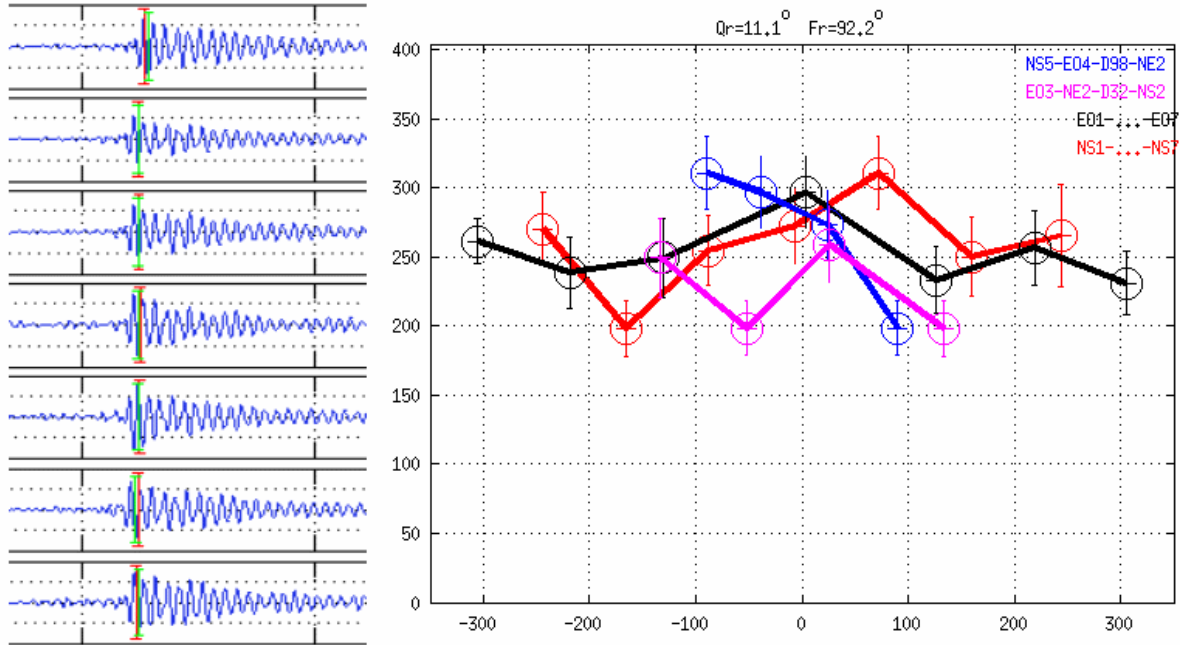


FIGURE 4.14 – A gauche, traces temporelles de 7 antennes, filtrées entre 63 et 82 MHz, d'un évènement associé à un avion passant quasiment au zénith du réseau. La prédiction d'un ajustement avec une onde plane (rouge) et les impulsions réelles (vert). A droite, impulsions des mêmes signaux mesurés par 16 antennes selon différents axes du réseau.

Plus globalement, il est possible de mettre en place des niveaux de trigger T2 (interne à la station) et T3 (entre stations) et de s'appuyer sur les caractéristiques des signaux associées aux sources. Une étude en ce sens a été abordée [94].

- Trigger T2 : les impulsions associées à des traces d'avions ou aux sources proches sont particulièrement peu compactes et s'éloignent largement du signal attendu pour une gerbe atmosphérique. Une coupure sur la durée du signal au-delà d'un certain seuil permettrait de mettre en évidence une grande partie des signaux parasites détectés.
- Trigger T3 : une multiplicité trop faible, une variation spatiale trop rapide du champ mesuré selon les antennes (comparaison de l'amplitude des impulsions) ou une source reconstruite sur l'horizon (comparaison des temps GPS) sont des possibilités de trigger T3 permettant de se soustraire par exemple du signal périodique de 1.32s observé à Nançay.

4.2 RAuger : premier prototype de détection autonome

La première tentative de radiodétection autonome a été menée par des membres de la collaboration CODALEMA et il est important de rappeler ici le contexte, la configuration des prototypes et les difficultés rencontrées.

4.2.1 Présentation

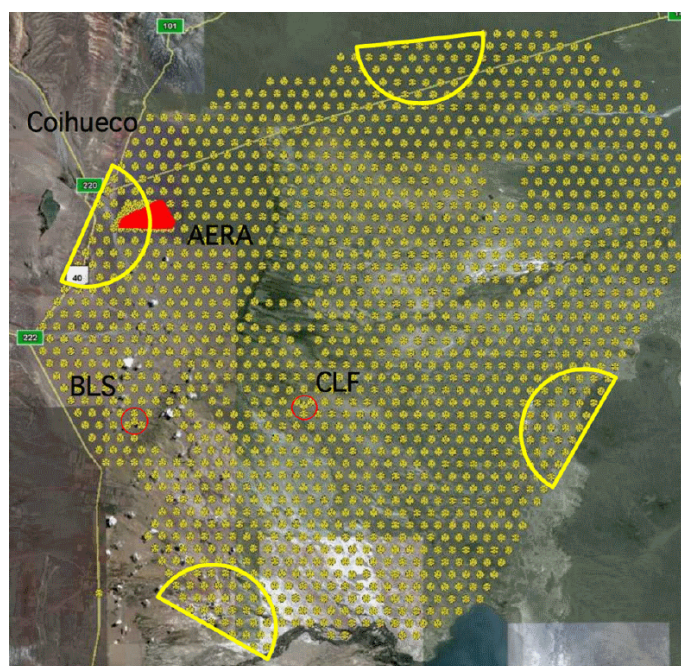


FIGURE 4.15 – Vue aérienne du setup de l'Observatoire Pierre Auger. Les positions des cuves sont représentées par des étoiles jaunes. Les demi-cercles indiquent la position des 4 télescopes. Le BLS, le CLF et AERA sont les trois où est développée la radiodétection sur le réseau Pierre Auger.

L'expérience RAuger (Radio@Auger) était constituée de trois stations prototypes fonctionnant de manière complètement autonome sur le site de l'Observatoire Pierre Auger (Fig. 4.15) : chaque station était donc indépendante en termes d'alimentation, de trigger d'acquisition et de communication. Trois stations avaient été installées au centre du réseau SD (surface detector), près du CLF, et formaient un triangle équilatéral de 8400m^2 , ce qui représente environ 1% d'une maille élémentaire du SD (formé d'un hexagone de cuves). Une cuve additionnelle (nommée Apolinario) installée au centre du triangle formé par les trois antennes permet d'abaisser localement le taux de trigger T3, et le seuil en énergie. La configuration du réseau est présentée dans les figures 4.16 et 4.17.

Les composants de la station étaient formés à partir d'éléments déjà existants. L'antenne et le LNA utilisés sont identiques à ceux de CODALEMA-II. Deux antennes étaient installées dans chaque station, l'une orientée dans la direction Nord-Sud, l'autre dans la direction Est-Ouest. La carte trigger possédait un filtre en fréquence modulable afin de s'affranchir des fréquences associées à des activités anthropiques. Un oscilloscope Tektronik THS370A permettait l'acquisition des 2 voies sur un ADC 8 bits,

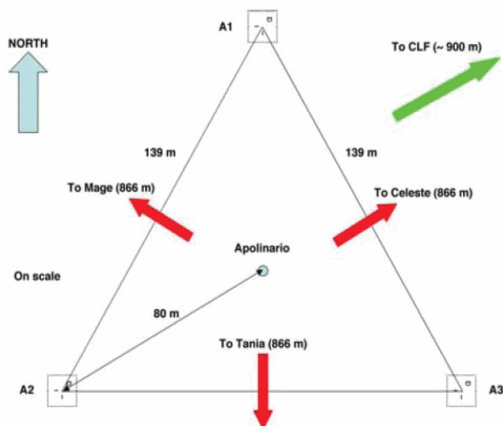


FIGURE 4.16 – Setup du réseau de 3 antennes autonomes autour du CLF. Une cuve additionnelle abaissant le seuil en énergie est au centre du triangle formé par les trois stations.

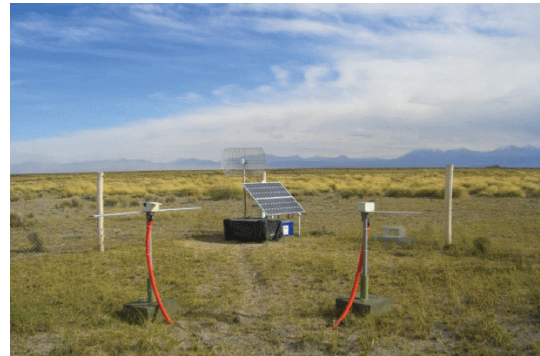


FIGURE 4.17 – Chacune des stations est constituée de deux antennes polarisées Est-Ouest et Nord-Sud et d'un système de déclenchement, alimentation et communication. L'ensemble est fermé par une clôture carrée de 10 mètres de côté.

travaillant à 500 MS/s pour $5 \mu\text{s}$ de signal enregistré sur 2500 points. La carte GPS intégrée aux stations permettait la datation de l'évènement à quelques ns près. Le système d'acquisition local était constitué par une carte UB semblable à celle utilisée sur les détecteurs au sol de Pierre Auger. Elle gérait le flux des données en local et la communication distante par WiFi avec un PC centralisateur installé au CLF à 900 m des stations. Des panneaux solaires d'une puissance de 100 W étaient reliés à des batteries 12 V et 100 A.h et permettaient l'alimentation de l'ensemble de la station. Le principe de fonctionnement de la station était le suivant : la décision de déclenchement était élaborée à partir du signal filtré 50-70MHz de la voie Est-Ouest. Ce signal était ensuite envoyé vers un comparateur de tension pour la construction du trigger qui déclenchait l'acquisition du signal. Les signaux radios pleine bande¹ étaient alors enregistrés sur les deux voies de l'oscilloscope. La configuration, le système d'acquisition et les détails des différents composants de ces premières stations sont largement expliqués dans la thèse d'Arnaud Bellétoile [74]. Le schéma récapitulatif de fonctionnement est indiqué dans la figure 4.18.

4.2.2 Les principaux résultats

Les premières coïncidences autonomes

Les premières coïncidences observées entre les trois stations ont été rapidement associées à des orages (Fig. 4.19 et Fig. 4.20). Cette première étude a permis de valider la datation GPS des évènements par les stations. La forme des enregistrements est sensiblement identique sur les trois antennes lors de ces coïncidences. Cela indique que le signal déclenchant est le même, et qu'il est assez distant pour ne pas être atténué durant les quelques dizaines de mètres séparant les antennes. L'évolution de l'azimut des évènements triangulés grâce aux temps GPS associés aux triggers permet d'observer le déplacement des orages au cours du temps.

¹un filtre passe-bas à 100 Mhz était utilisé afin de s'affranchir du puissant émetteur TV à 200 MHz

Les premières gerbes atmosphériques détectées

La recherche de coïncidences associées à des rayons cosmiques se fait par la synthèse hors-ligne des données RAuger (3 stations) et Auger (détecteurs au sol).

Les premiers signaux radio de rayons cosmiques en déclenchement autonome ont été observés mi-2007 [95]. En trois ans, 65 évènements ont ainsi été détectés. La distribution des directions d'arrivée des évènements détectés depuis cette date est en accord avec le modèle géomagnétique (Fig. 4.21) présenté dans le chapitre 3. L'excès est cette fois ci au Sud, car le champ magnétique à Malargüe est orienté vers le Nord ($\theta=55^\circ$).

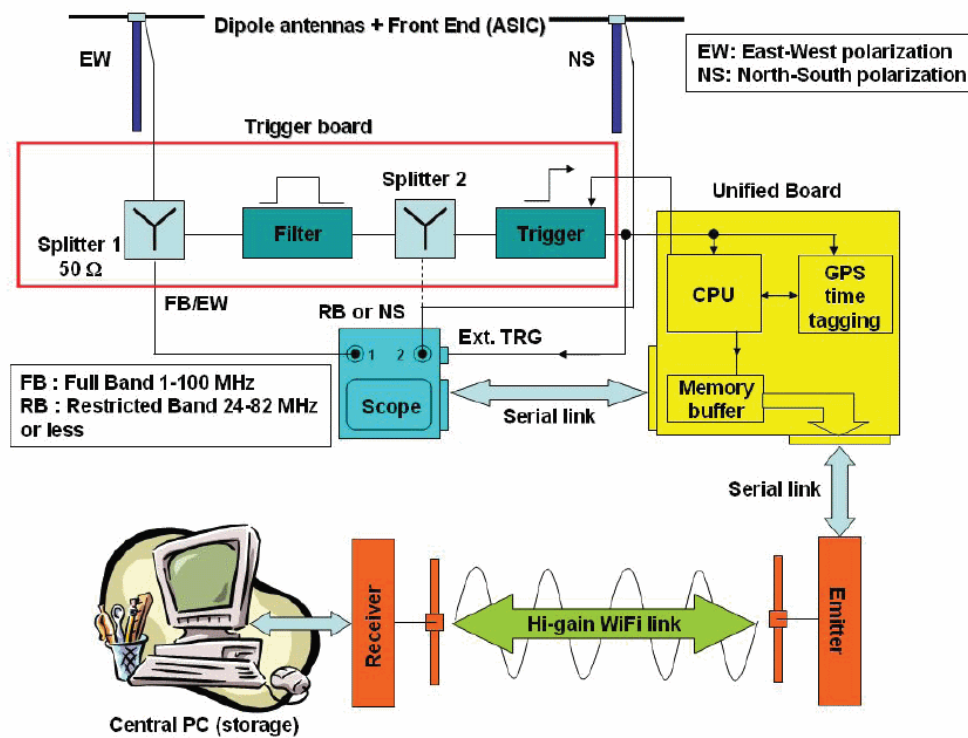


FIGURE 4.18 – Description du fonctionnement de RAuger. Figure tirée de [74]

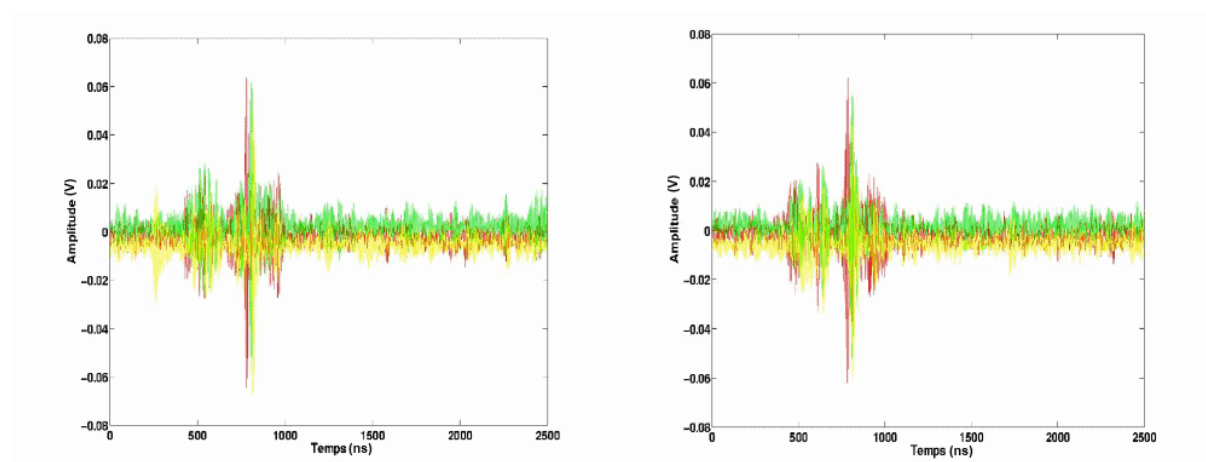


FIGURE 4.19 – Deux évènements associés à des orages : traces filtrées enregistrées par les trois stations (vert-jaune-rouge).

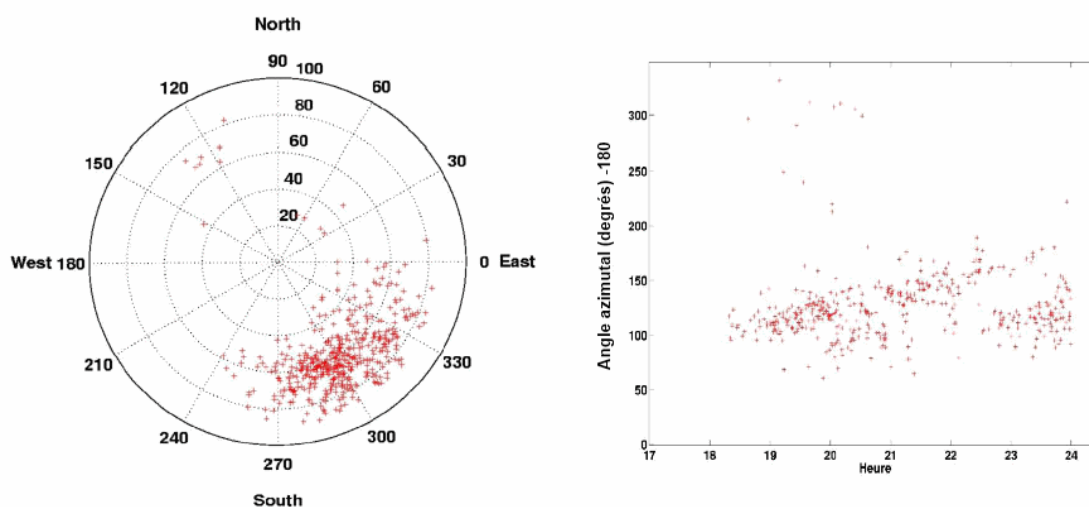


FIGURE 4.20 – A gauche, la carte du ciel des coïncidences enregistrées pendant un orage. L'orage est visible au sud-est des stations. A droite, l'évolution de l'azimut reconstruit au cours du temps permet de mettre en évidence le déplacement de l'orage.

En 2009, et pour la première fois, les 3 stations ont détecté un signal associé à un rayon cosmique en coïncidence avec le réseau Auger (Fig. 4.22). Cet évènement a fait l'objet d'une analyse particulière qui a produit les résultats suivants [96] :

- La reconstruction hybride donne un décalage en temps entre la mesure des deux réseaux de 34 ns. Ce décalage inférieur au critère de coïncidence de CODALEMA-II (100 ns) est satisfaisant et valide le calage en temps des GPS. La différence angulaire de reconstruction entre les deux réseaux est de 0.36° , soit de l'ordre de la résolution angulaire de l'Observatoire Pierre Auger.

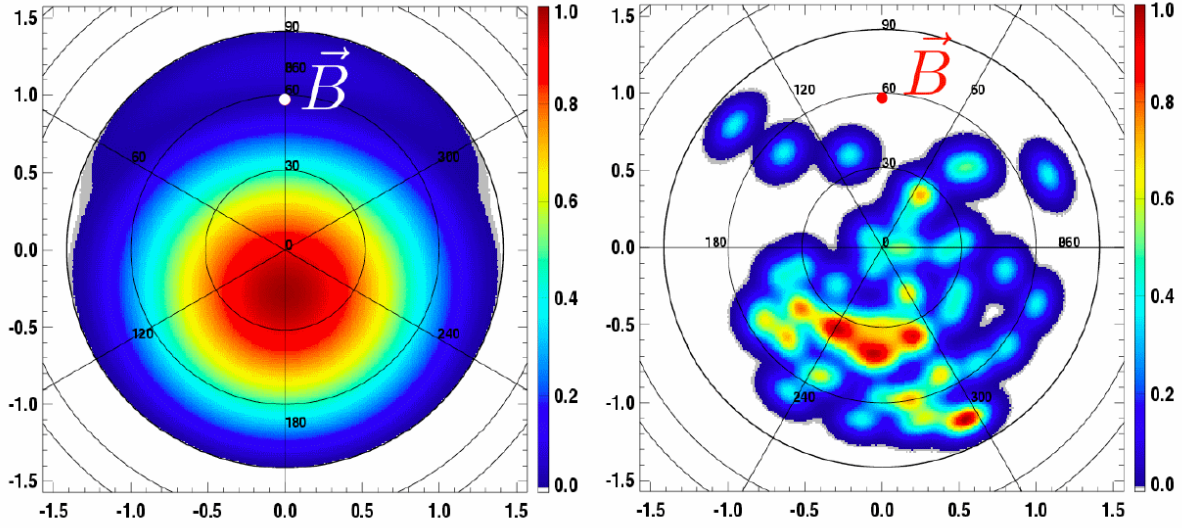


FIGURE 4.21 – A gauche, carte du ciel attendue dans le cadre du modèle géomagnétique simple pour Auger. A droite, carte du ciel des directions d’arrivée des évènements détectés en coïncidence entre RAuger et Auger. L’orientation du champ magnétique est indiquée par le cercle rouge (en haut).

- Les valeurs maximales de champs mesurées par les trois antennes, permettent de reconstruire un profil latéral exponentiel, et d’en extraire ε_0 . Avec une correction $corr = (\vec{v} \wedge \vec{B})_{EW}$, et en tenant compte d’un champ magnétique deux fois plus faible à Auger qu’à Nançay, la corrélation en énergie présentée dans le chapitre 3 donne une valeur 1.3×10^{18} eV, à comparer aux 1.4×10^{18} eV déduits des données Auger.

Grâce à des prototypes développés en un temps très court et principalement à partir de composants existants, le dispositif de RAuger a donc permis de franchir rapidement une étape importante vers la détection radio autonome de rayons cosmiques. La première détection à 3 antennes d’un signal associé à une gerbe atmosphérique est un résultat important. Cependant, cette première génération de détecteurs n’était pas sans défauts :

- Le réglage de seuil pouvait se faire seulement sur le terrain. Ce qui est relativement peu gênant pour une expérience sur site proche devient particulièrement problématique pour un détecteur se trouvant de l’autre côté du globe d’autant plus que la variabilité du taux de déclenchement en fonction du seuil est importante.
- Corollaire du point précédent, le seuil de déclenchement a dû être fixé suffisamment haut afin de ne pas saturer l’acquisition des stations. Ainsi, seules les gerbes d’énergies supérieures à $10^{17.5}$ eV étaient potentiellement détectables (contre $10^{16.5}$ eV pour CODALEMA-II).
- Les prototypes étant peu robustes, de nombreuses pannes, notamment sur A2 et A3 ont considérablement pénalisé l’expérience.

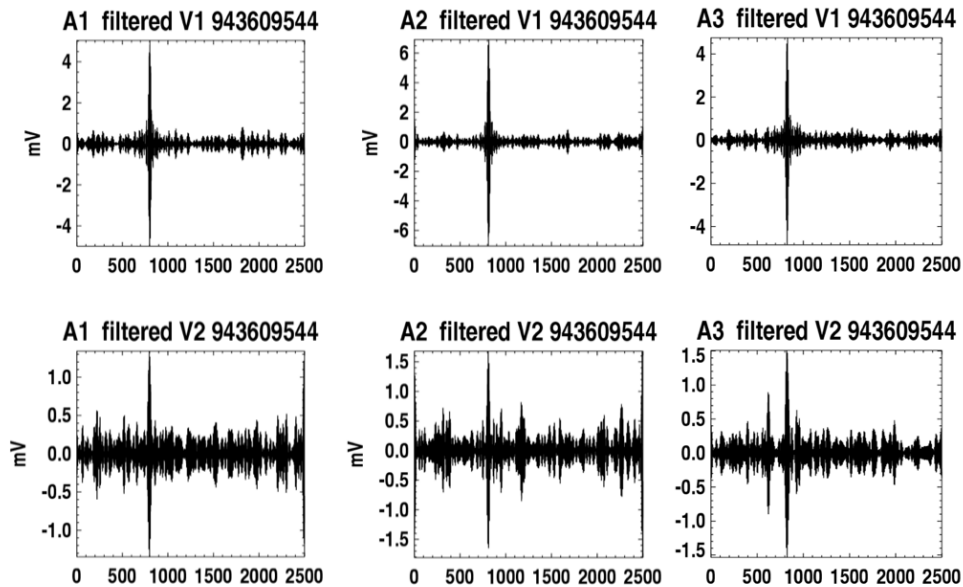


FIGURE 4.22 – Signaux filtrés des 6 voies (2 polarisations par station, Est-Ouest en haut, Nord-Sud en bas) pour la coïncidence à 3 stations enregistrée en 2009.

- Le temps mort par évènement de l'expérience était de 2.7 s, principalement dominé par la lecture et l'écriture de l'évènement de l'oscilloscope vers la carte UB à travers le lien série.

Ces défauts expliquent en partie qu'une unique coïncidence à trois antennes ait été mise en évidence. Cependant, RAuger restera la première expérience à avoir détecté des signaux radio de gerbes atmosphériques de manière complètement autonome. Au mois de mai 2010, deux des trois prototypes ont été démontés pour être remplacés par les nouvelles stations autonomes. Seul le prototype A1 a été conservé, pour servir de référence, et fonctionne toujours dans le réseau actuel de RAuger.

4.3 Les nouvelles stations autonomes

Une seconde génération de stations autonomes a en parallèle été élaborée dans le cadre de l'ANR CODALEMA. Les objectifs principaux étaient d'obtenir un système plus compact, plus polyvalent et plus robuste que les premiers prototypes. La nouvelle station est associée à une nouvelle antenne et une nouvelle électronique frontale, optimisées pour les mesures à basse fréquence.

4.3.1 Les caractéristiques de la station

La station autonome (Fig. 4.23) peut être séparée en trois parties distinctes et indépendantes : l'antenne elle-même, l'électronique d'acquisition, et enfin l'alimentation et la communication avec l'extérieur.



FIGURE 4.23 – Vue de la nouvelle génération de la station autonome développée par CODALEMA. L'ensemble de l'électronique est contenu dans le caisson métallique.

L'antenne papillon

Dans le cadre de l'élaboration d'une nouvelle station, une réflexion sur l'amélioration de la sensibilité et les performances de l'antenne a été menée. Trois principaux points faibles ont été identifiés sur les dipôles courts :

- Des difficultés techniques empêchent la mesure d'une double polarisation avec une même antenne formée de deux radiateurs. Cette modification permet un gain en compacité du système par rapport à deux antennes séparées de quelques mètres, telles qu'utilisées pour les premiers prototypes de RAuger.
- Les différents modèles théoriques, comme ceux présentés dans le chapitre 1, prévoient un maximum de puissance pour les fréquences les plus basses, inférieures à 100 MHz. Sachant qu'une limite basse expérimentale est imposée par la bande AM, il est justifié de prévoir qu'une antenne adaptée à la radiodétection devrait se montrer la plus efficace aux alentours des 30-40 MHz. Cela se fait au détriment d'une réponse uniforme de l'antenne dans la bande de fréquence de détection. Cependant, cette réponse partiellement modulée par la réponse du LNA est modélisable et peut donc être corrigée dans la chaîne d'analyse.
- Les bandes FM et AM sont les plus grandes sources de perturbation pour les antennes. Si les filtrages hors-ligne en fréquence peuvent résoudre ce problème, des intermodulations peuvent apparaître. De plus, la dynamique utilisable est fortement impactée par ces deux bandes de fréquence.

Afin de réduire au maximum les difficultés associées à ces longueurs d'onde, l'antenne idéale de radiodétection devrait se montrer le moins sensible possible autour de ces fréquences.

Afin de répondre au mieux à ces différentes contraintes, une nouvelle antenne active a donc été conçue. Il s'agit d'une antenne dite papillon (en référence à sa forme) présentée dans la figure 4.24. Comme pour l'antenne dipolaire, sa réponse en fréquence est à la fois la conséquence de sa géométrie (longueur de 2 m, extension verticale de 1 m, et hauteur au sol de 1.5m), mais aussi de son électronique frontale dont les caractéristiques sont indiquées dans le tableau 4.1. Elle se distingue de l'antenne dipolaire par sa plus grande sensibilité aux basses fréquences surpassant largement le bruit du LNA, et des interférences destructives induites par le sol concordant avec les bandes AM et FM (Fig. 4.25). Deux radiateurs montés en croix permettent la mesure des deux composantes de la polarisation horizontale, sur deux voies différentes. Les caractéristiques précises de cette antenne sont présentées par D. Charrier [97].

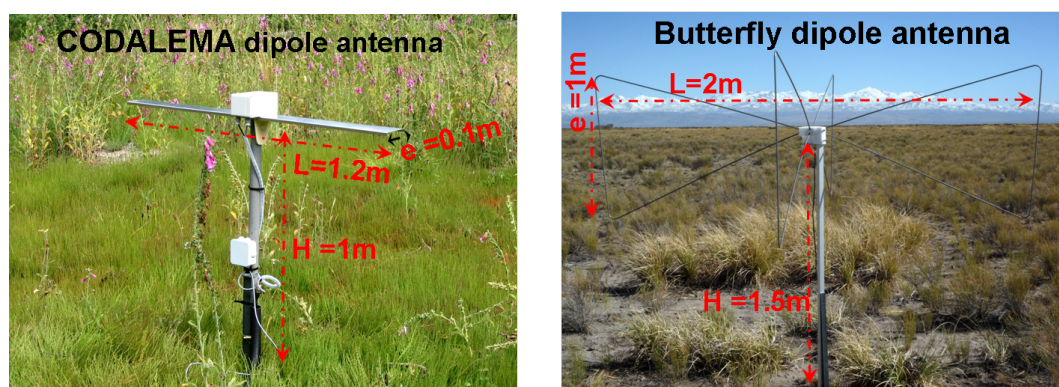


FIGURE 4.24 – Photographie de l'antenne dipolaire (à gauche), et de l'antenne papillon (à droite). Les dimensions sont indiquées sur la photo.

Caractéristique	Ancienne électronique frontale	Nouvelle électronique frontale
Consommation	$2 \times (54 \text{ mA}, 12 \text{ V})$ soit 1.3W	$2 \times (52 \text{ mA}, 7 \text{ V})$ soit 0.8 W
Dynamique d'entrée	24 mV	
Gain	36 dB	26 dB
Dynamique de sortie	1.5V	0.5V
Densité spectrale de bruit	1.4 nV (1-200 MHz)	
Bande passante à -3 dB	80 kHz-230 MHz	
Impédance d'entrée	10 pF//5.2 M Ω	6pF//1uH//300 Ω

TABLE 4.1 – Comparaison des caractéristiques de l'ancienne et de la nouvelle électroniques frontales.

La mesure de la sensibilité au bruit galactique est un bon test pour évaluer la qualité de l'antenne et de son LNA. Indépendamment des caractéristiques de la MATACQ, il est possible de réaliser cette mesure en utilisant un analyseur de spectre. Nous avons présenté dans les chapitres précédents tous les outils pour comparer les réponses absolues mesurées et attendues de l'antenne papillon, comme présenté dans la figure 4.26 :

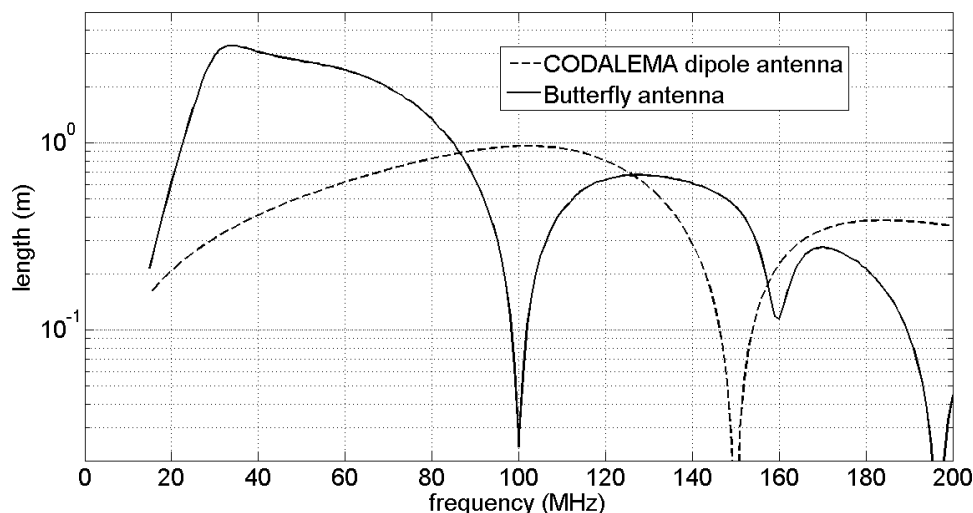


FIGURE 4.25 – Réponses en fréquence des antennes papillon et dipolaire, pour la direction du zénith, exprimées en $\log(L_{eff})$. Figure tirée de [97].

- Le calcul de la température modélisée du ciel ([98]) créant un champ électrique mesuré par l’antenne.
- Le calcul de l’impédance de l’antenne avec le logiciel dédié 4nec2 et la géométrie de l’antenne papillon.
- Le calcul (ou la mesure) de l’impédance du LNA.
- Le calcul de la fonction de transfert entre l’impédance d’antenne et l’impédance du LNA.

La simulation et la mesure du bruit galactique sont en très bon accord, indiquant une bonne modélisation de l’antenne. De plus, au contraire de l’antenne dipolaire pour laquelle ils étaient du même ordre de grandeur, le bruit du LNA mesuré est 15 dB au-dessous de celui de la galaxie à 60 MHz. De nombreuses mesures de sensibilité au bruit galactique ont été faites sur l’antenne papillon, sur un banc de test, à l’Observatoire de Nançay. Ce banc de test, constitué de 4 antennes reliées à un analyseur de spectre, a notamment permis une comparaison de leurs performances de radiodétection. Un exemple de données brutes obtenues, pour l’antenne papillon, est donné dans la figure 4.27. Les variations galactiques sur 24h sont visibles entre 20 et 90 MHz et montrent un bon accord avec les simulations. Par ailleurs, aucune intermodulation ne semble apparaître, validant la linéarité du LNA. Les variations observées dans la bande AM sont dues aux effets ionosphériques expliqués dans le chapitre 2.

L’électronique

L’ensemble de l’électronique de la station (excepté le LNA) est contenu dans un double caisson métallique servant de support métallique au radiateur. Elle comprend 6 cartes électroniques insérées dans un châssis (Fig.4.28 et 4.29).

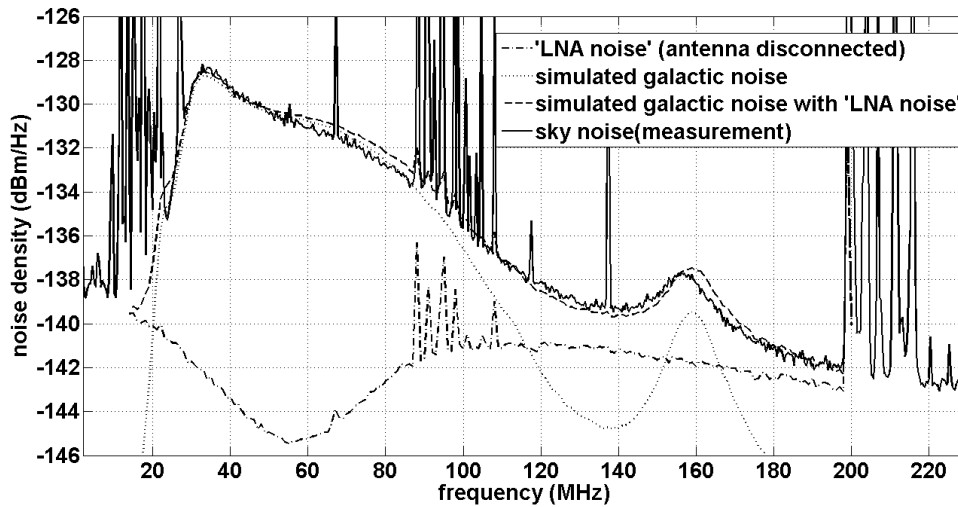


FIGURE 4.26 – Réponses mesurée et simulée de l'antenne papillon et de son LNA. Les deux courbes en pointillé représentent la contrepartie simulée de la température du ciel et de la mesure du LNA. Figure tirée de [97].

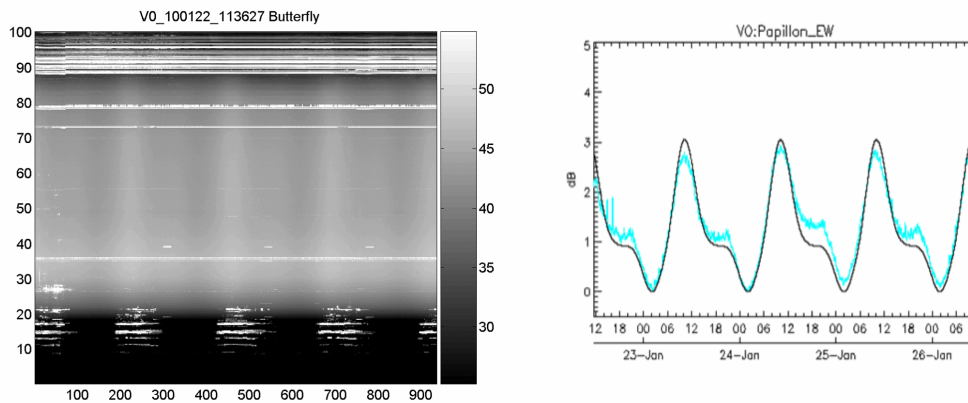


FIGURE 4.27 – Réponse au bruit galactique mesurée par l'antenne papillon. A gauche spectre en 2D, temps fréquence. A droite, pour une fréquence de 60 MHz, évolution du bruit enregistré (en bleu), et simulation du bruit galactique (en noir). Résultats et figures produits par L. Denis (Observatoire de Nançay).

- La carte trigger, développée à SUBATECH, permet de déclencher l'enregistrement des signaux sur l'une des deux voies de l'antenne. Pour les phases de test, il est également possible de réaliser ce déclenchement de manière externe voire logicielle. Les filtres insérés sur mezzanine sont interchangeables et permettent de moduler la bande de fréquence utilisée pour le déclenchement. Pour les stations installées jusqu'à présent, elle se trouve le plus souvent entre 55 et 65 MHz.
- La carte MATAcq, développée au LAL, permet la numérisation de deux signaux correspondant aux voies Nord-Sud et Est-Ouest. D'une manière similaire aux cartes de CODALEMA-II, mais

avec une dynamique de 14 bits (contre 12), cette numérisation se fait sur 2560 points avec une fréquence d'échantillonnage de 1 GS/s.

- La carte GPS, développée à Besançon, permet la datation en temps des événements à quelques ns près. La mise en coïncidence en temps et la triangulation reposent sur la précision de ces datations internes. La carte GPS permet également le positionnement des stations avec quelques dizaines de centimètres de précision améliorant encore la reconstruction des directions d'arrivée.
- La carte alimentation, développée au LAL, fabrique à partir du 12 V général, un ensemble de tensions secondaires délivrées aux autres cartes du châssis par le fond de panier.
- La carte Rabbit, développée à Nançay est un élément central de la station. Elle récupère les informations des cartes MATAcq, Trigger et GPS et constitue un fichier brut de l'évènement qu'elle envoie aussitôt à la carte PC via une liaison ethernet.
- La carte PC (ALIX 3D2 développée par l'entreprise PC Engines) décode et traite l'évènement avant de le stocker sur mémoire flash. C'est également par son intermédiaire que la station peut communiquer avec le monde extérieur.



FIGURE 4.28 – Photo de l'électronique de la station autonome, caisson ouvert.

Le fonctionnement logiciel de la station est assuré par un certain nombre de paquetages. La communication entre le PC local et le Rabbit pour la DAQ se base sur le paquetage Rc, surcouche de la communication TCP/IP. Les caractéristiques de communication Rc sont notamment la tentative de reconnexion automatique, la limitation à un client par serveur, et la possibilité de démarrer les processus dans un ordre quelconque.

Le paquetage Ra est un logiciel qui s'exécute sur le Rabbit. Il contrôle l'acquisition des cartes triggers Matacq et GPS, par le fond de panier, à un taux maximum de 20 événements par seconde (initialement 25 sur les premières versions). Le paquetage At s'exécute sur le PC local. Il gère notamment l'allumage du châssis, et permet la connexion au Rabbit lors de la mise en route de la prise des données. Les fichiers créés sont de cinq types : Science (événements), Log (comprenant les temps GPS de triggers,

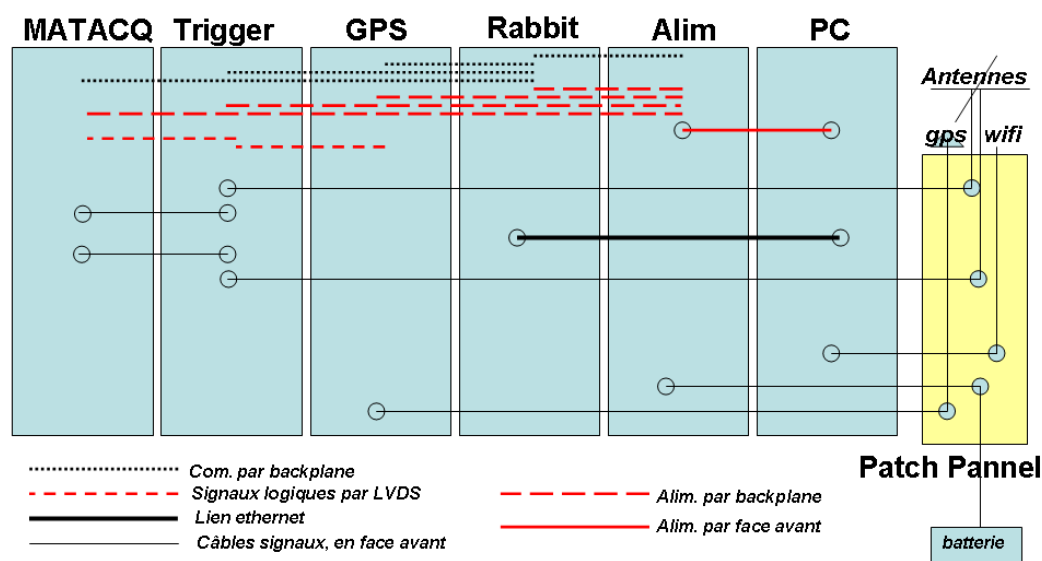


FIGURE 4.29 – Schéma de l'électronique d'acquisition de la nouvelle station autonome.

permettant la mise place d'un trigger de niveau 2), Acknowledge (pour la communication avec le Rabbit), Monitoring et Configuration. Les fichiers associés aux événements sont stockés au format binaire. Il sont constitués d'un en-tête, (voie de trigger, niveaux des seuils, temps GPS) et des traces des deux voies. La taille de ce fichier est de 10ko (à comparer aux 2 Mo des fichiers textes de CODALEMA-II, certes constitué de 24 antennes).

Les deux générations de stations autonomes sont donc considérablement différentes. Entre autres, l'oscilloscope a finalement été remplacé par une carte d'acquisition MATAcq. La carte UB est devenue une carte PC. La station a évolué dans sa compacité et la mise à niveau de ses différents éléments. La table 4.2 détaille les changements de consommations observées pour chaque élément de ces deux versions.

Eléments	Ancienne station	Nouvelle station	Eléments
LNA	1.3 W	0.8 W	LNA
Trigger	0.5 W	3.3 W	Trigger
UB+GPS	4.8 W	4 + 1.5 + 1 W	PC + Rabbit + GPS
Transmission Ethernet + Wifi	5 W	2.5 W	Carte PCI + Wifi
Oscilloscope	6.2 W	10 W	MATAcq
Alimentation	-	2.3 W	Carte alimentation
Total	16 W	24 W	Total

TABLE 4.2 – Comparaison des consommations de l'ancienne et de la nouvelle stations autonomes.

La communication et l'alimentation

La communication et l'alimentation sont les deux points de différence entre les stations installées à Nançay et à Auger. Elles sont la conséquence des contraintes et possibilités offertes par les deux réseaux :

- Pour l'expérience CODALEMA-III, les infrastructures du site permettent d'utiliser une alimentation directement depuis le réseau électrique. Aucune source autonome d'énergie n'est donc nécessaire. De ce point de vue, l'alimentation est similaire à celle du réseau de CODALEMA-II. Les contraintes sur l'émission radio interdisant l'utilisation du WiFi dans l'enceinte de l'observatoire, la communication se fait par fibre optique, directement vers le PC centralisateur.
- Pour l'expérience RAuger, une alimentation autonome est indispensable. Celle-ci se fait, comme pour la première génération, par des panneaux solaires alimentant des batteries. La taille des panneaux solaires et des batteries a été calculée afin de permettre un cycle utile de fonctionnement le plus élevé possible. La communication sans fil est la méthode la plus pratique pour l'échange des données entre les stations et le PC centralisateur situé à plusieurs centaines de mètres. Cette communication peut-être provisoirement rompue sans pour autant stopper l'acquisition des événements par les antennes, qui continuent d'enregistrer les traces en local.

4.3.2 Les tests de compatibilité électromagnétique

Pour le réseau câblé, l'ensemble de son électronique (cartes MATAcq) et des appareillages d'acquisition des données est centralisé dans un conteneur. Le blindage de celui-ci est censé protéger les autres expériences du site des émissions radios produites à l'intérieur. Pour les futures stations autonomes réparties sur l'ensemble de l'Observatoire de Nançay et dont l'ensemble de l'électronique est situé à quelques dizaines de centimètres des antennes, la problématique du blindage électromagnétique ne se pose pas dans les mêmes termes :

- Pour les instruments de l'Observatoire, il est important de limiter au maximum les émissions parasites. Des stations seront disposées sur l'ensemble de l'Observatoire et certaines seront proches de ses instruments. Par rapport au réseau câblé actuel, c'est surtout la multiplication des détecteurs et le rapprochement géographique des autres appareils de détection qui rendent ce blindage particulièrement important. Les fréquences balayées par les expériences du site vont de la dizaine de MHz (LOFAR) à plusieurs GHz (Radiotélescope), et le blindage doit donc se montrer efficace sur toute cette plage de fréquence.
- Pour les stations elles-mêmes, il est absolument nécessaire d'éviter l'auto-déclenchement, dont la sensibilité doit atteindre un niveau comparable au bruit galactique, pour l'observation des signaux de faible amplitude, avec une électronique complète d'acquisition située à moins d'un mètre du radiateur.

Le blindage s'appuie principalement sur l'architecture même de la station. Le premier caisson en contient un second, isolé avec un joint CEM, qui abrite le châssis de l'électronique. Afin de valider la qualité du blindage de la station, plusieurs tests CEM ont été réalisés au cours de l'année 2010 : un test en chambre anéchoïde, et des tests avec le radiohéliographe et le radiotélescope (Fig. 4.30). Ils ont été dans l'ensemble satisfaisants.

Le test CEM en chambre anéchoïde. Ce test a été réalisé le 10 février 2010 dans la chambre anéchoïde des locaux d'Atcom. Les mesures étaient effectuées alors que la station déclenchait rapidement

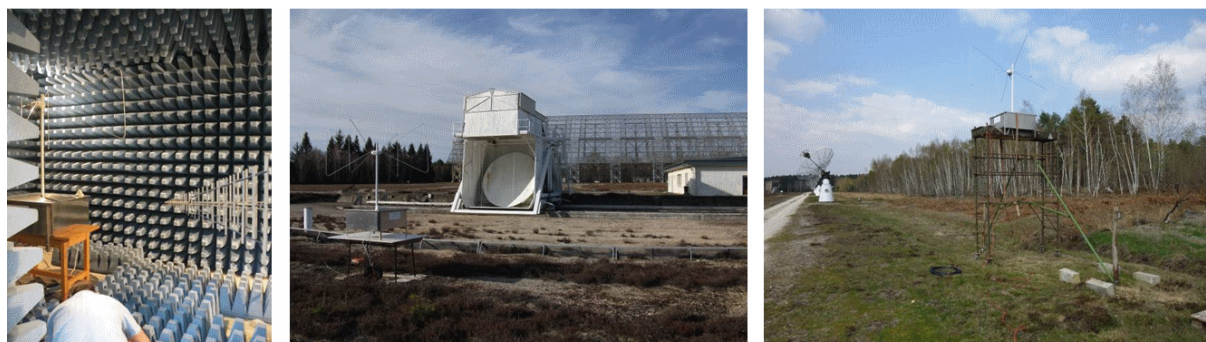


FIGURE 4.30 – Les trois tests réalisés au début de l'année 2010. Dans la chambre anéchoïde (à gauche), sur la ligne des radiohéliographes (au centre), et proche du foyer du radiotélescope (à droite).

(20 coups/s), afin de mesurer les effets de la station dans le cadre d'un fonctionnement à la limites de ses capacités logicielles. Les mesures de référence étaient, quant à elles, saisies station éteinte. Au niveau de sensibilité offert par le banc de mesure, aucune raie suspecte n'a été observée, entre 50 MHz et 5 GHz (Fig. 4.31). Des raies sont observées mais elles sont également présentes lorsque la station est éteinte, et ne sont donc pas produites par la station. Cependant, la sensibilité du banc de test est trop faible pour pouvoir conclure sur l'absence de parasites gênants pour le radiotélescope ou le radiohéliographe pour des stations installées à proximité de ces expériences. Les résultats précis de cette mesure sont disponibles dans [99].

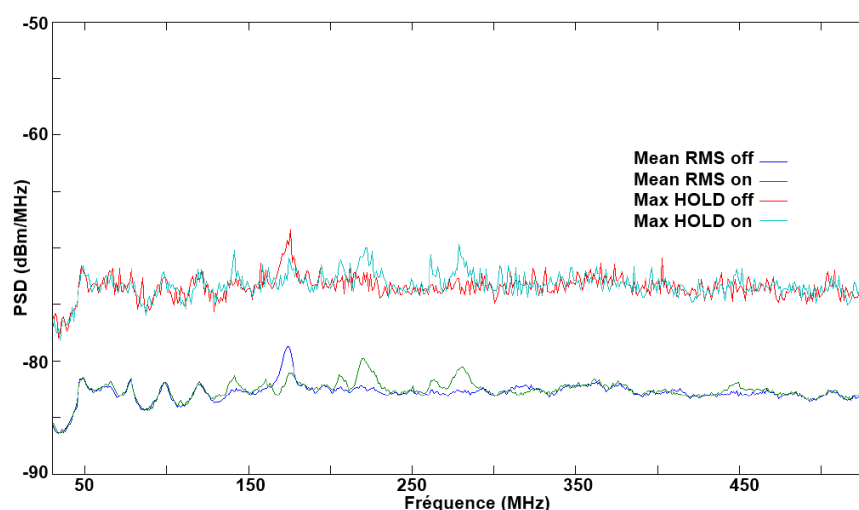


FIGURE 4.31 – Mesure faite dans la chambre anéchoïde. Les mesure ON, station allumée et déclenchant quasiment à saturation d'acquisition, et OFF, station éteinte, sont identiques. L'impact de la station est donc nul dans le cadre de cette mesure.

Test d’innocuité vis-à-vis du radiotélescope. La station a été placée au cours du mois de mars 2010 à une position proche du foyer du radiotélescope. Des observations routinières n’ont décelé aucun parasite gênant dans la bande de fréquence utilisée par le radiotélescope, exceptée une raie suspecte à 1450 MHz, dont l’impact devrait toutefois se montrer très limité pour une station placée en dehors du foyer du Radiotélescope [100].

Test d’innocuité vis-à-vis du radiohéliographe. Au cours du mois d’avril 2010, la station a été placée dans l’alignement du lobe principal d’une des antennes du bras Nord-Sud du réseau d’héliographes. C’est ce troisième test qui s’est initialement montré le moins satisfaisant [101]. Deux fréquences principales (à 173 et 340 MHz) ont été associées à la station autonome (Fig. 4.32). L’hypothèse que l’antenne réémettait un signal après le déclenchement a été confirmée grâce à de nouveaux tests réalisés en septembre, après le rajout d’un filtre entre le radiateur et l’électronique de la station. Durant cette période, de nouvelles versions des éléments électroniques ont été utilisées et ont permis une atténuation notable des pics observés. Les conditions de ces mesures étaient particulièrement défavorables pour la station. Elle était placée en hauteur, et non au sol, et pointée directement par les antennes du radiohéliographe.

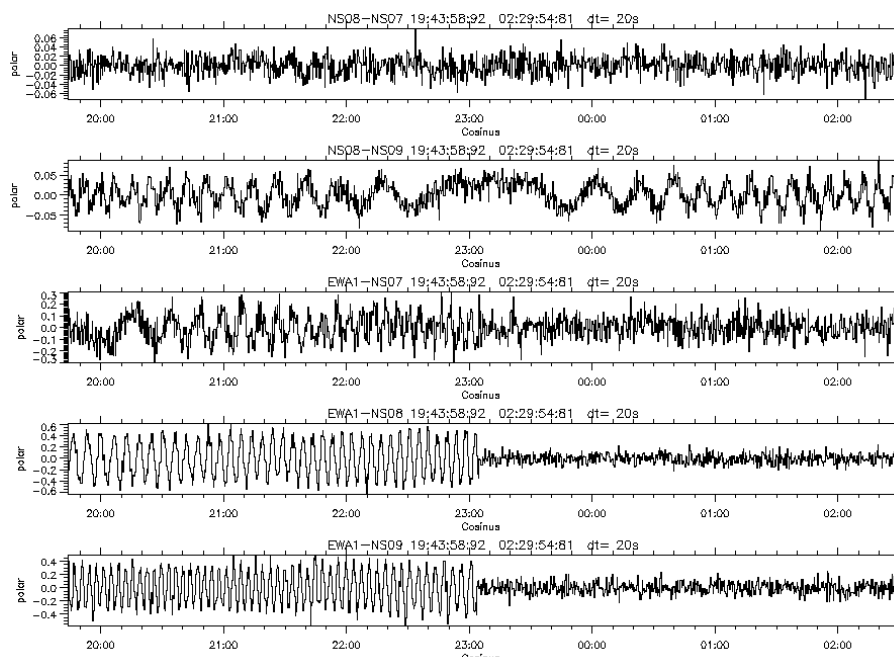


FIGURE 4.32 – Mesure faite lors du premier test sur le RH, avec différents doublets d’antennes travaillant en interférométrie. Les antennes proches de la station test détectent une amplitude supérieure à 1 FSU (unité de flux solaire). La mise OFF de la station est largement visible pour cette bande de fréquence particulière à 23h00.

4.3.3 La sensibilité au bruit galactique

Sur le site d’Auger, le niveau de la FM est bien plus bas qu’en France. Cela permet d’obtenir une mesure de spectre très satisfaisante à travers la carte d’acquisition. Les défauts de la MATAcq observés

dans le chapitre 3 disparaissent, et le spectre devient très similaire à celui observé avec un analyseur relié au LNA. La qualité des spectres obtenus a par exemple permis de mettre en évidence la variation du bruit galactique. Le protocole expérimental fut le suivant : la station déclenchait de manière logicielle, et non sur des transitoires, à un taux de quelques événements par seconde. Toutes les heures, 100 triggers sont envoyés en quelques secondes à la station produisant l'enregistrement de 100 événements dont les spectres en fréquence sont moyennés. Sur une journée LST, 24 mesures sont donc faites, chaque run correspondant à une heure LST. La variation galactique mesurée, de l'ordre de 6 dB à 30 MHz, est compatible avec celle attendue dans l'hémisphère sud. Cette variation est visible jusqu'à 150 MHz. Aucune intermodulation n'apparaît. (Fig. 4.33).

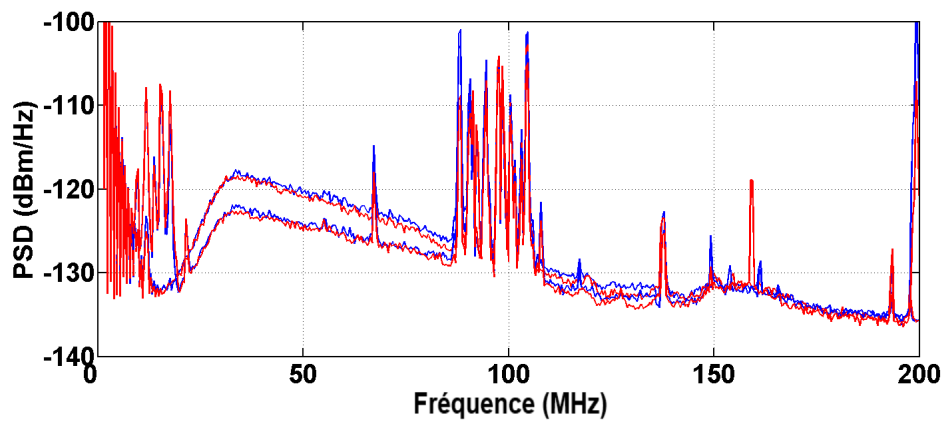


FIGURE 4.33 – Minimum (courbes du bas) et maximum (courbes du haut) galactiques mesurés selon les voies Est-Ouest (en bleu) et Nord-Sud (en rouge) lors de la campagne de mesure du bruit galactique de la station autonome.

4.3.4 La recherche et la mise en évidence de coïncidences

L'étape suivante du développement de l'expérience de radiodétection autonome était la recherche de coïncidences entre les stations d'une part, et, hors-ligne, avec le réseau câblé (pour Nançay) ou le détecteur au sol (pour Auger).

Configuration des deux réseaux

Deux réseaux de stations autonomes ont été installés sur l'observatoire de Nançay, au plus près du cœur du réseau de CODALEMA-II, et sur l'expérience Pierre Auger, en lieu et place de l'expérience RAuger (Fig. 4.34). Actuellement, ces réseaux sont formés respectivement de 3 et 4 stations².

Les mesures à Nançay

²dont un ancien prototype

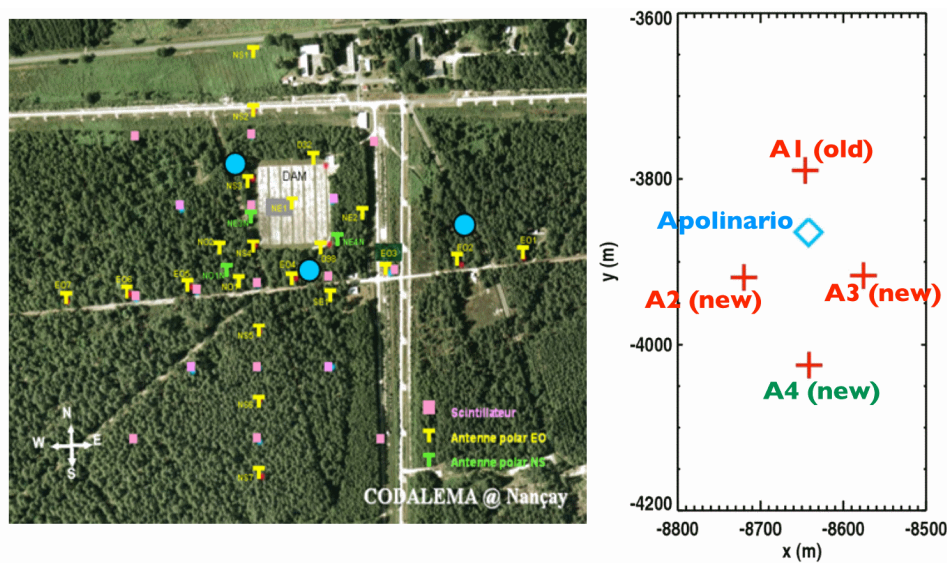


FIGURE 4.34 – A gauche, configuration du réseau CODALEMA-II. Les 3 stations autonomes sont représentées par des pastilles bleues. A droite, plan du réseau de RAuger. Les 4 antennes disposées en losange entourent la cuve additionnelle.

Premières caractéristiques obtenues avec les stations autonomes Une première station autonome (Fig. 4.35) installée en juillet 2009, puis deux autres au mois de décembre 2009, ont notamment permis de mettre en évidence les caractéristiques principales de l'environnement radio (confirmées par la campagne de données collectées avec un déclenchement radio du réseau câblé), puis de fixer en conséquence le seuil de déclenchement.

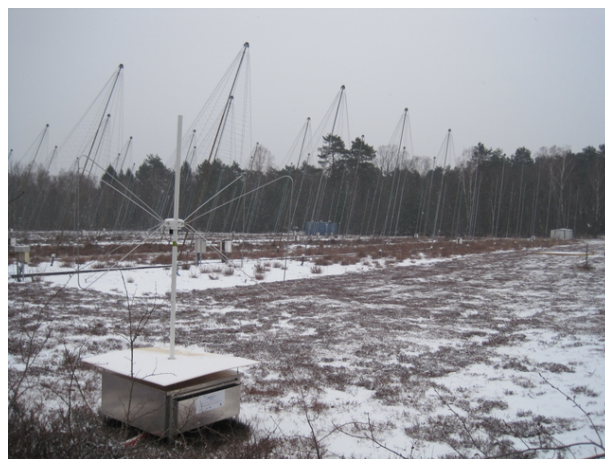


FIGURE 4.35 – Photo d'une station autonome installée à Nançay.

Avec un seuil relativement bas, le taux de déclenchement des stations autonomes montre deux caractéristiques principales (Fig. 4.36). Tout d'abord, certaines périodes de quasi-saturation de l'acquisition

sont observées. Compte tenu des capacités de la station, le taux de comptage peut alors atteindre environ 25 Hz, soit un peu plus de 1600 évènements par minute. Le Δt entre deux évènements est donc de quelques centièmes à quelques dixièmes de secondes. Ces périodes de saturation ont plutôt tendance à survenir la journée, ce qui semblerait indiquer une origine anthropique à ces premiers parasites. Ils sont à associer aux sources proches observées par le réseau câblé. La deuxième source de déclenchement apparaît sur des périodes bien plus longues (typiquement une journée ou plus). Le taux de déclenchement est plus bas, et un évènement est détecté toutes les 1.32 s (éventuellement 2.64 s ou 3.96 s si la station rate un évènement associé à cette source) soit 45 evts/s. Des tests préliminaires avaient confirmé que ce signal n'était pas lié à la station elle-même (inversion des voies, rotation des radiateurs, changement de voie de déclenchement), avant que la triangulation réalisée avec le réseau câblé ne permette de localiser cette source. Nous avons discuté le fait que les signaux associés à ces émissions étaient différenciables du signal radio associée à une gerbe. Cependant, certains causent une quasi-saturation de l'acquisition et abaissent sérieusement le cycle utile de la radiodétection des gerbes durant leurs périodes d'apparition. Ces premiers taux de déclenchements ont été obtenus avec des seuils de triggers non optimisés. Une option actuellement en test pour s'affranchir de ces sources est l'utilisation d'un seuil de déclenchement différent pour le jour et la nuit.

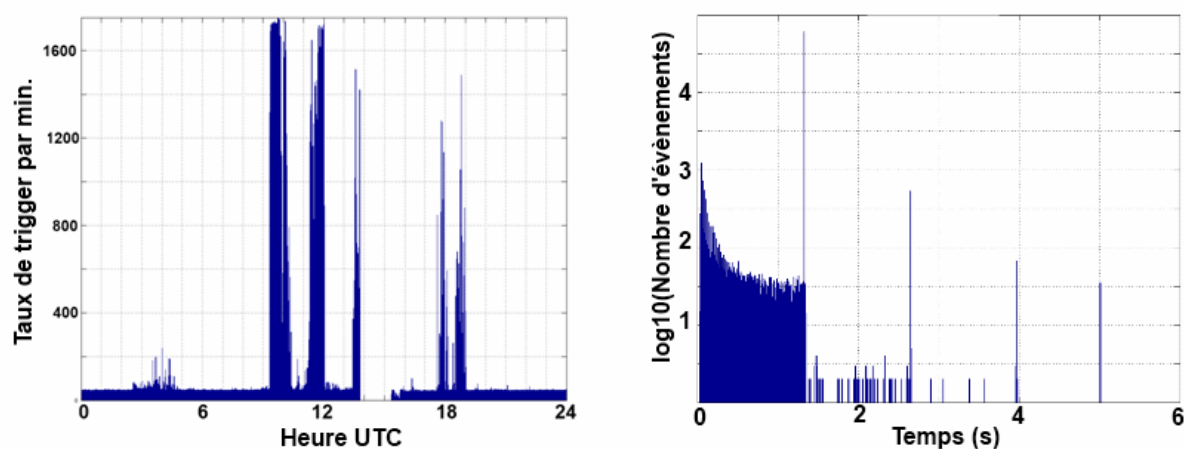


FIGURE 4.36 – A gauche, nombre de déclenchements de la première station autonome, par minute sur une journée typique. A droite, histogramme des différences de temps entre deux déclenchements consécutifs, sur la même journée.

Gerbes atmosphériques détectées

- Au mois de juillet 2009, la première station autonome, SA2, a été installée sur le site. Une carte GPS dérivée d’une future station est directement reliée au réseau câblé permettant une datation commune avec la station. Les datations GPS des deux stations sont décalées, lors du passage d’une gerbe, d’un temps correspondant à la propagation des signaux dans la chaîne expérimentale et à la position des stations et des scintillateurs. La boîte de multiplicité produit son signal de déclenchement quand les 5 scintillateurs centraux sont touchés en coïncidence, au moment où le signal du cinquième et dernier scintillateur arrive au niveau de la carte de multiplicité. Les décalages sont les suivants :
 - Le temps de vol de la gerbe entre la station et le dernier scintillateur dépend naturellement de la position des deux détecteurs et de l’angle d’arrivée de la gerbe.
 - Les temps de propagation des signaux dans les PM et dans les câbles sont respectivement de 40 et de 1650 ns.
 - La boîte de multiplicité des scintillateurs possède un retard intrinsèque de 70 ns.
 - Le temps de propagation entre la carte de multiplicité et la carte GPS est d’environ 10 ns.

Au final, on obtient un retard de l’ordre de 1790 ns auquel il faut ajouter l’effet géométrique de temps de vol propre à chaque gerbe entre la station et le cinquième scintillateur. Durant les quelques semaines de cette configuration, 3 coïncidences ont été établies entre les deux stations, associées à des événements de haute multiplicité sur le réseau câblé et résumées dans le tableau 4.3. Après correction des biais de la chaîne expérimentale, les trois événements ont un décalage en temps inférieur à 100 ns (correspondant au critère de coïncidence de CODALEMA-II, entre scintillateurs et antennes, détaillé dans le chapitre 3). Pour les deux dernières coïncidences, l’accord est même de quelques ns. Cette première phase a également permis de mesurer l’offset entre la datation de l’acquisition standard du réseau câblé et le temps GPS mesuré par la station, de l’ordre de quelques centièmes de seconde. La première coïncidence détectée à Nançay est présentée dans la figure 4.37. Associée à un événement montrant une distribution latérale bien exponentielle pour le réseau câblé, les impulsions sont très semblables dans les deux polarisations, mais avec une amplitude différente.

Date	Run-Evt	Mult.	Phi	Theta	Retard mes.	Retard att.	Diff
03/08/2009	998-635	21°	73°	10	1788 ns	1855 ns	67 ns
29/08/2009	999-933	19°	320°	37	2026 ns	2028 ns	2 ns
01/09/2009	999-1181	22°	261°	33	1907 ns	1907 ns	0 ns

TABLE 4.3 – Caractéristiques des 3 coïncidences observées à Nançay avec la première station autonome. Run-Evt : Numéro de run et d’évènement pour le réseau câblé, Retard mes. : retard mesuré entre les temps GPS (câblé -station), Retard att. : retard attendu, Diff : Différence des deux retards.

- En décembre 2009, SA3 et SA4 sont installées. Il y a donc, à partir de cette date, 3 stations autonomes en fonctionnement sur le site de Nançay. 5 coïncidences, résumées dans le tableau 4.4, dont une double ont été enregistrées pendant les mois de décembre et de janvier, avant que les différents

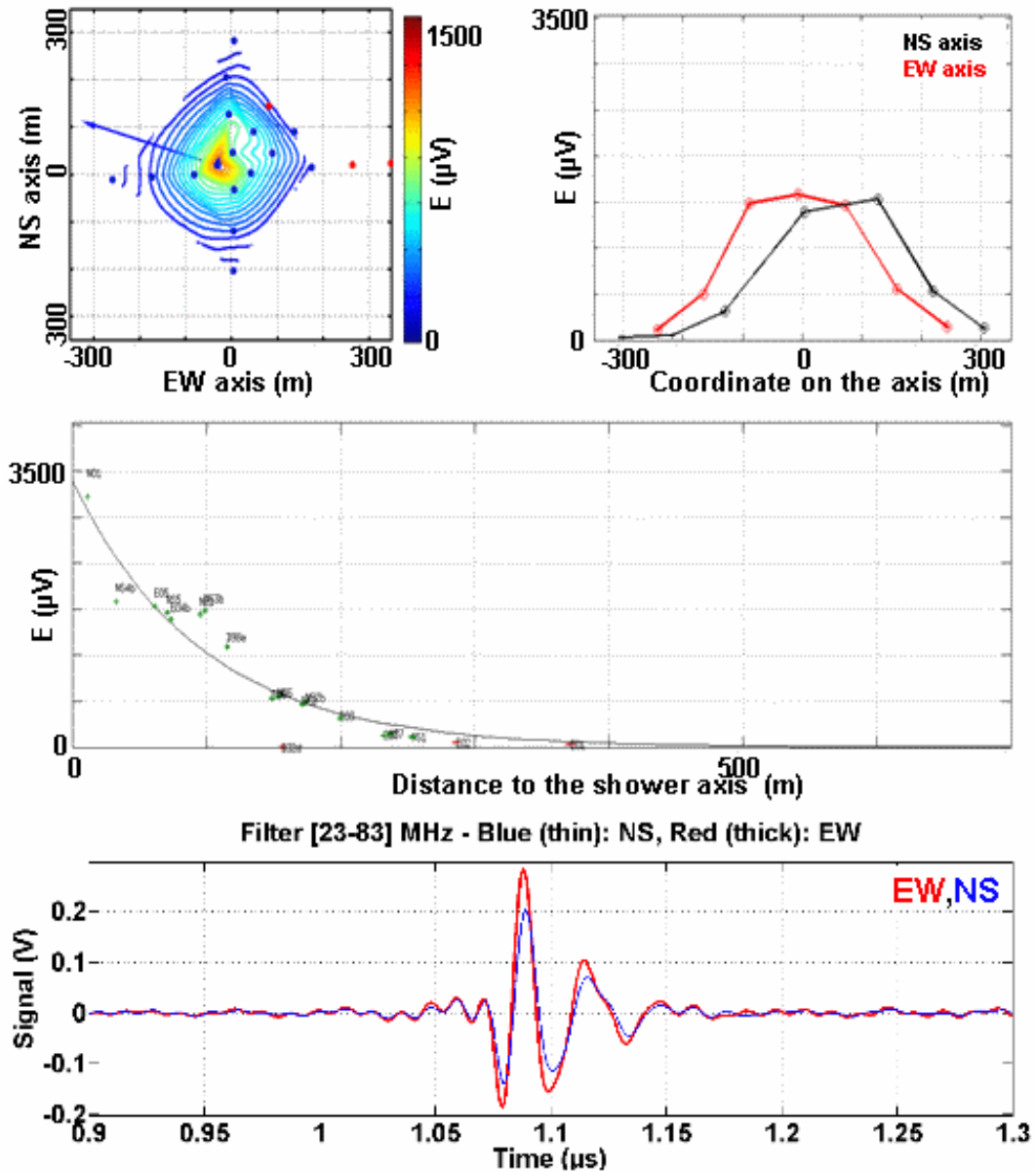


FIGURE 4.37 – Première coïncidence autonome détectée sur le site de Nançay. En haut, la reconstruction du réseau câblé. En bas, les signaux filtrés des deux voies de la station autonome.

tests CEM ne soient réalisés. La recherche des coïncidences se fait en parcourant les événements enregistrés par le réseau câblé, et en cherchant pour chacun d'eux une éventuelle coïncidence au centième de seconde, entre le temps DAQ et temps GPS de la station, avec l'offset déterminé lors de la première configuration autonome. Les périodes correspondant à des saturations ou les événements potentiellement associés au signal périodique émis toutes les 1.32 s sont ignorés.

La coïncidence double permet de trouver un azimuth 'autonome' en imposant pour la reconstruction

autonome l'angle zénithal trouvé par la reconstruction scintillateurs. Le décalage de 245ns observé entre les temps GPS de trigger des stations 2 et 4, nous permet de trouver un azimuth correspondant de 340° , à comparer aux 333° déduits des données scintillateurs.

Date	Run-Evt	Mult.	Phi	Theta	SA2	SA3	SA4
21/12/2009	1021-23	18	333°	44°	1	0	1
31/12/2009	1023-148	14	29°	27°	0	1	0
07/01/2010	1024-382	16	322°	24°	0	0	1
13/01/2010	1026-30	18	283°	23°	1	0	0
16/01/2010	1026-299	7	79°	7°	0	1	0

TABLE 4.4 – Caractéristiques des 5 coïncidences observées à Nançay avec trois stations autonomes entre les mois de décembre 2009 et janvier 2010. Run-Evt : Numéro de run et d'évènement pour le réseau câblé, SA2, SA3, SA4 : nom de la station, 1 si signal en coïncidence, 0 sinon.

En quelques semaines de fonctionnement cumulé (hors tests CEM), 7 coïncidences ont donc été observées sur le site de Nançay. La majorité de ces coïncidences est associée à des multiplicités élevées du réseau câblé indiquant une énergie-seuil de détection des stations autonomes supérieure à celle du réseau câblé. Le seuil de trigger pas encore optimisé en est sans doute la cause. Cela explique aussi l'absence de coïncidences triples, au vu de la distance entre les stations.

Les mesures à Malargüe

3 stations autonomes, A2, A3 et A4, ont été installées sur le site de RAuger au début du mois de mai 2010 (Fig. 4.38). A1, station prototype a été conservée dans ce nouveau réseau. Le 13 mai, une gerbe atmosphérique d'énergie 1.21×10^{18} eV, détectée par le réseau Auger, a été vue en coïncidence par les deux seules stations (A2 et A3) alors en fonctionnement. Le décalage en temps mesuré entre les stations est en accord avec celui attendu, déduit de la direction d'arrivée de l'évènement donné par la reconstruction Auger (254 ns contre 298 ns). Par contre, le décalage absolu entre le temps d'arrivée de la gerbe et le temps réellement mesuré par les deux stations est de l'ordre de 2300 ns. Les GPS des stations n'étaient donc pas synchronisés avec celui des cuves, contrairement à ceux de A1 pour les 59 coïncidences qu'elle avait détectées entre 2007 et 2010.

Quelques jours plus tard, dans la nuit du 22 au 23 mai, un orage détecté par les 4 stations a permis une amélioration de la reconstruction des directions d'arrivée et une étude des décalages GPS observés. Le taux commun de déclenchements élevé est survenu entre 19h20 UTC et 5h UTC. Durant cette période, les stations A2, A3 et A4 ont déclenché respectivement 22209, 27699 et 19460 fois (Fig. 4.39). Cela correspond à un taux de trigger d'environ 1 evt/s. Compte tenu de la saturation en acquisition à 25 evts/s, le cycle utile pour la détection des gerbes était abaissé à 95%. Au maximum de l'intensité orageuse, 200 évènements par minute (3 par seconde) étaient enregistrés, soit un cycle utile abaissé à 85-90%. Bien que s'éloignant des 100% théoriques, ce ratio reste satisfaisant, pour des orages ponctuels en temps, quand on le compare, par exemple, aux 10% de cycle utile de la fluorescence.

Etude des coïncidences triples La recherche de coïncidences sur cette période aboutit à 2543 coïncidences à la ms et 784 à la μ s, temps compatible avec des coïncidences physiques devant la dimension du



FIGURE 4.38 – Photo d'une station autonome installée à RAuger. Le grillage en plastique permet de maintenir éloignés les animaux un peu trop curieux de ce mystérieux objet de la pampa.

mini-réseau (une centaine de mètres soit 300 ns de temps de vol environ). La triangulation des signaux est ensuite réalisée avec l'hypothèse d'une onde plane (orage suffisamment éloigné pour que le rayon de courbure soit élevé devant les dimensions du réseau), et se propageant à la vitesse de la lumière c . Dans un premier temps, les triangulations sont réalisées avec les temps GPS donnés par chacune des trois stations, correspondant au temps du trigger. 303 événements sont alors reconstruits sur les 784 coïncidences à la ms. Ce sont les premières coïncidences à trois antennes enregistrées en Argentine avec les nouvelles stations autonomes. Cette carte du ciel montre des anisotropies bien marquées des directions d'arrivée correspondant aux orages (Fig. 4.40).

Indépendamment des temps GPS, les signaux enregistrés des coïncidences triples montrent un écart systématique de la position du maximum de A4 avec les deux autres antennes, A2 et A3. Ce décalage est de l'ordre de 25 ns (Fig. 4.41). La position du trigger est cependant fixe dans l'enregistrement MATAcq pour les trois stations et est définie au 1183ème canal des 2560 canaux. Le décalage entre les traces signifie donc que le seuil de déclenchement n'est pas défini au même niveau pour les trois stations. Ainsi le trigger est produit plus tôt, pour celles aux seuils les plus bas. Le temps GPS associé au déclenchement est donc un peu avancé. C'est la conséquence du discriminateur à seuil mis en place sur les stations. En corrigeant les temps GPS de la position des maximums dans les traces, la carte du ciel des directions d'arrivée reconstruites par triangulation est améliorée. 367 événements sont correctement reconstruits (Fig. 4.40) contre 303 avec la première méthode. De même, la précision angulaire de la reconstruction semble être meilleure, puisque l'anisotropie est accrue : utiliser le simple temps GPS donné par le trigger est une première approximation. Dans le cas où l'amplitude de l'impulsion change dans de grandes proportions (et ce sera sans doute le cas sur un événement associé à une gerbe atmosphérique d'un futur réseau géant, entre une antenne à 50 et 500 mètres de l'axe), la différence entre temps GPS et temps réel du passage de la gerbe peut changer dans des proportions importantes d'une antenne à l'autre. Une courbure surestimée pourrait même apparaître (le seuil de trigger serait atteint plus tôt pour les antennes recevant le plus grand signal, plus proches de l'axe). La correction de la position du maximum corrige de ce biais.

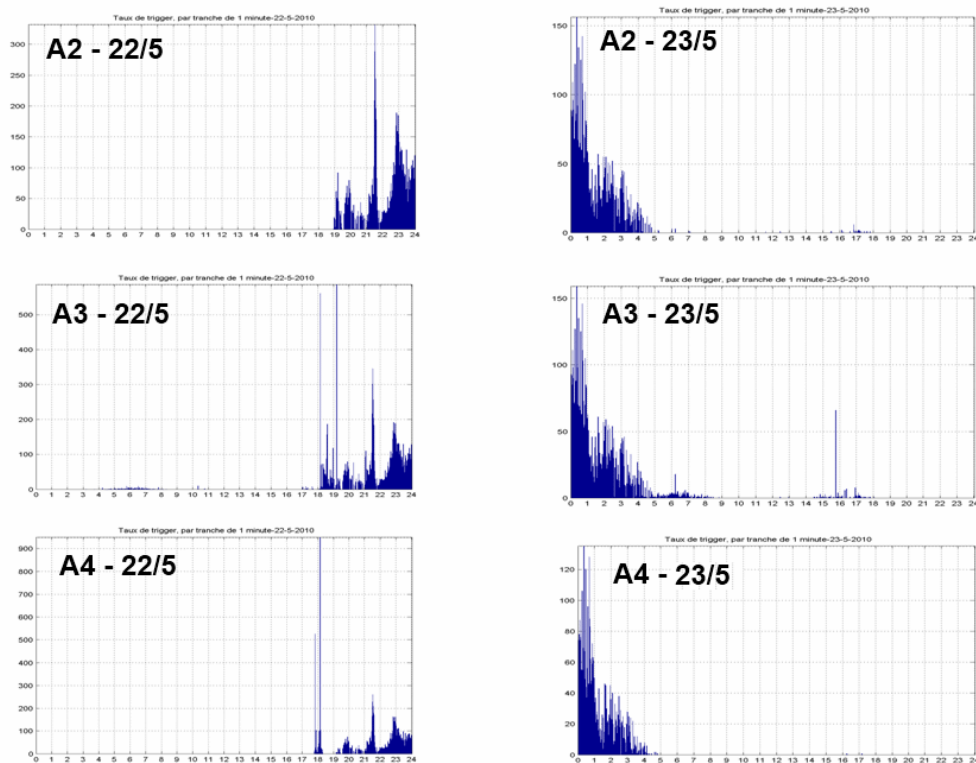


FIGURE 4.39 – Taux de déclenchements par minute pour les trois stations A2 A3 A4 pour les journées du 22 (à gauche) et du 23 (à droite) mai 2010. L'orage apparaît clairement entre 19h et 5h du matin.

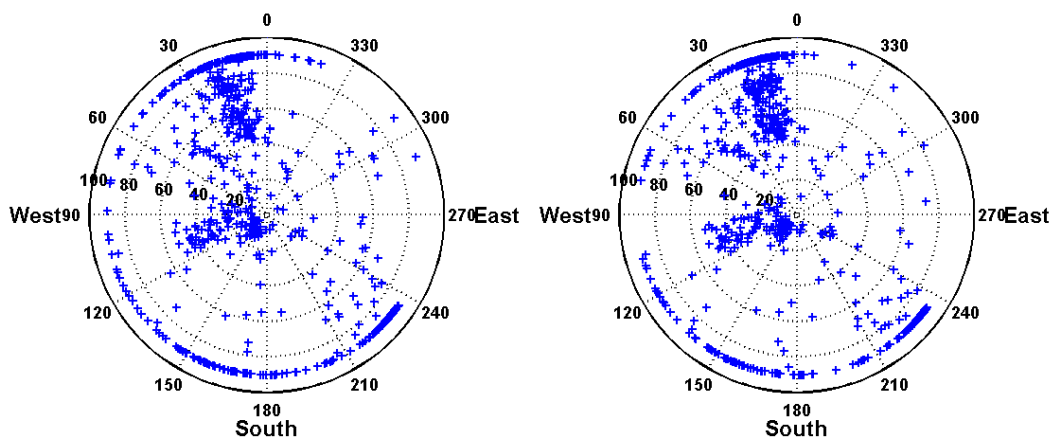


FIGURE 4.40 – Cartes du ciel des directions d'arrivée pour les événements associés à l'orage : à gauche avec les temps GPS, à droite en corrigeant ces temps de la position du maximum.

Etude des coïncidences quadruples La station A1 également en fonctionnement cette nuit-là a permis de réaliser des coïncidences hybrides entre nouvelles et ancienne stations. Son nombre de déclenchements a été largement inférieur à celui des 3 autres stations : 1405 événements ont été détectés (20000

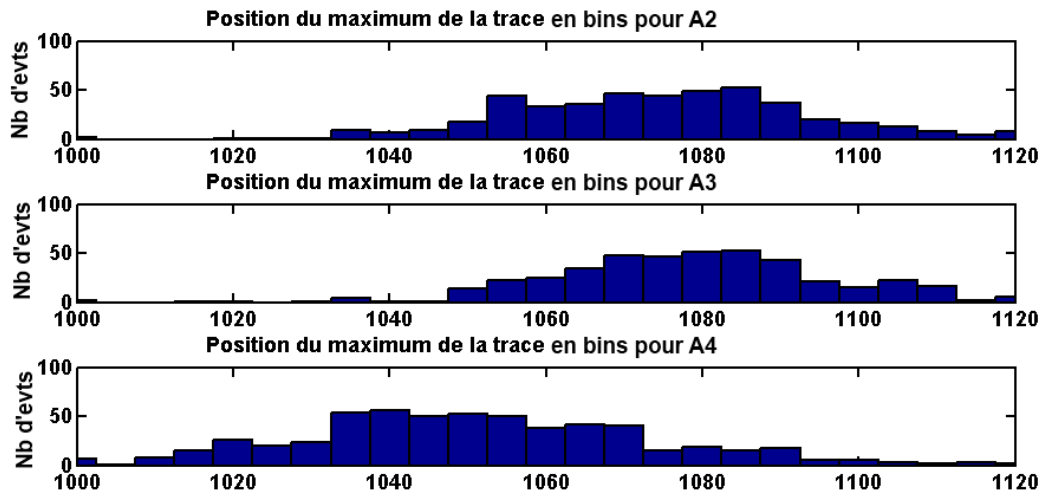


FIGURE 4.41 – Histogramme de la position du maximum, dans l'enregistrement MATACQ, pour les trois stations. A2 en haut, A3 au milieu, et A4 en bas.

environ pour les trois autres stations). Avec 2.7 s de temps mort, le cycle utile sur l'ensemble de l'orage est légèrement inférieur à 90% contre 95% pour les nouvelles stations. 573 coïncidences ont été enregistrées avec les trois autres stations à la ms (2543 à trois stations) et 21 (784) à la μ s. Un décalage systématique des temps GPS entre A1 et les autres antennes fut rapidement mis en évidence, même après correction du temps de vol de la gerbe entre les détecteurs. L'offset de l'ordre de 2450 ns était identique à celui observé lors de la coïncidence double entre les cuves et les nouvelles stations (Fig. 4.42). L'origine de ce biais était un décalage systématique des GPS entre A2-A3-A4 et A1. Une altitude de 150 mètres (au lieu de 1450), corrigée depuis, fut fixée pour les nouveaux GPS, impactant les temps déduits. En prenant en compte cet offset, 37 coïncidences quadruples sont finalement reconstruites dans le ciel (Fig. 4.43). La capacité de deux générations de détecteurs sensiblement différents à reconstruire des coïncidences est un point positif. Cependant, la différence des directions d'arrivée des coïncidences quadruples reconstruites avec 3 stations et 4 stations est assez importante et n'a pour le moment pas été comprise.

Conclusion

A la suite de ces premiers résultats, les seuils furent fixés sans doute un peu trop hauts. Quelques semaines après l'installation des stations, des conditions climatiques exceptionnelles (neige sur les panneaux) causèrent des pannes de batteries. Enfin des travaux sur le site d'Auger pour améliorer les connexions et réseaux de communication stoppèrent momentanément l'accès aux stations. 8 nouvelles coïncidences ont été détectées depuis le mois de mai, avec une distribution dans le ciel en accord avec un effet géomagnétique. Ainsi, en cumulant les stations autonomes de Nançay et de RAuger, 17 coïncidences ont été enregistrées en une dizaine de mois de fonctionnement cumulé.

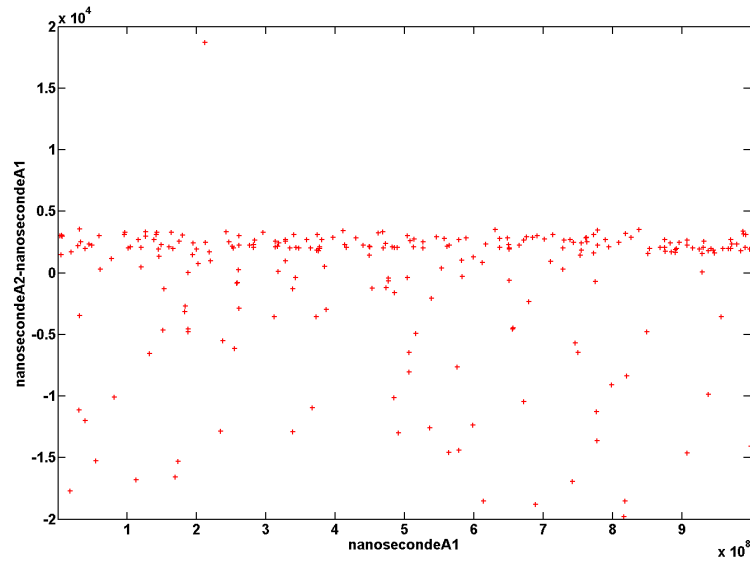


FIGURE 4.42 – Décalages en temps observés entre A2 et A1, corrigés de la différence de marche de la gerbe, en fonction de la nanoseconde de A1.

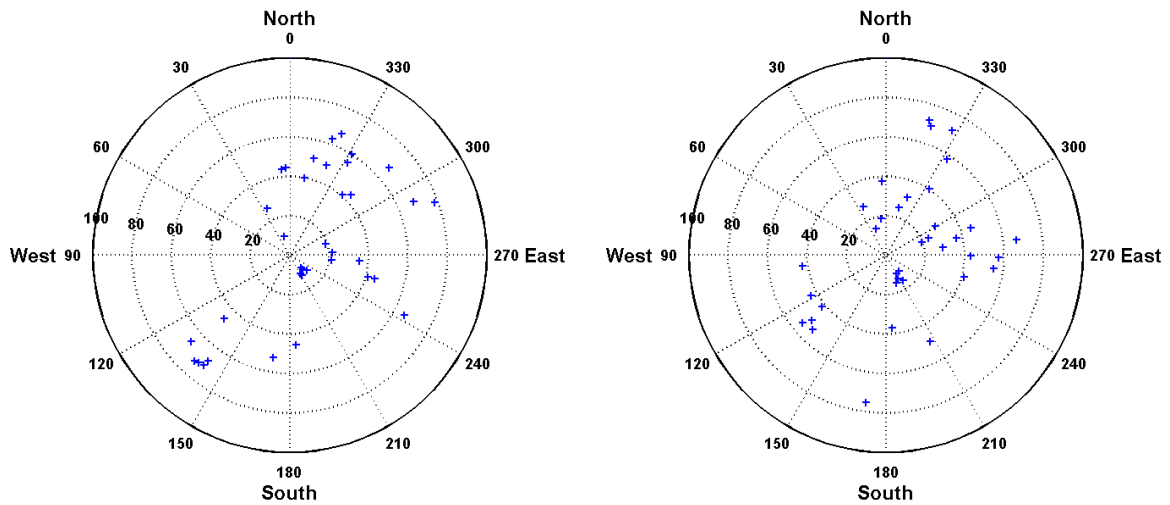


FIGURE 4.43 – Carte du ciel des directions d'arrivée des coïncidences quadruples. A gauche, en utilisant les informations des trois nouvelles stations uniquement. A droite, avec les 4 stations.

4.4 Vers l'étude de l'impulsion radio

L'antenne papillon montre une sensibilité supérieure à celle de l'antenne dipolaire. Elle est donc particulièrement adaptée à une étude du spectre en fréquence de l'émission radio de la gerbe atmosphérique. Le spectre brut mesuré par une antenne, largement dominé par la réponse de l'antenne elle-même, ne représente que très approximativement la distribution spectrale du signal radio associé à la gerbe. Afin

de remonter à cette dernière, il faut corriger le signal mesuré de l'ensemble des influences de la chaîne expérimentale. Comme nous avons pu l'exposer dans ce manuscrit, les outils et simulations existent. Nous allons présenter quelques résultats préliminaires de déconvolutions des signaux :

- La coïncidence double observée à Malargüe avec les antennes papillons montre un spectre en fréquence particulier avec une perte de puissance vers 140 MHz. La longueur effective simulée pour l'antenne dans la direction d'arrivée du rayon cosmique montre un comportement similaire. Il s'agit d'une interférence destructive de l'onde sur le sol (Fig. 4.44). De 100 MHz, pour une direction d'arrivée au zénith, cette fréquence d'interférence augmente d'une quarantaine de MHz pour une gerbe inclinée de 40° . Ce résultat se rapproche de celui observé pour NE4N, présenté dans le chapitre 3.

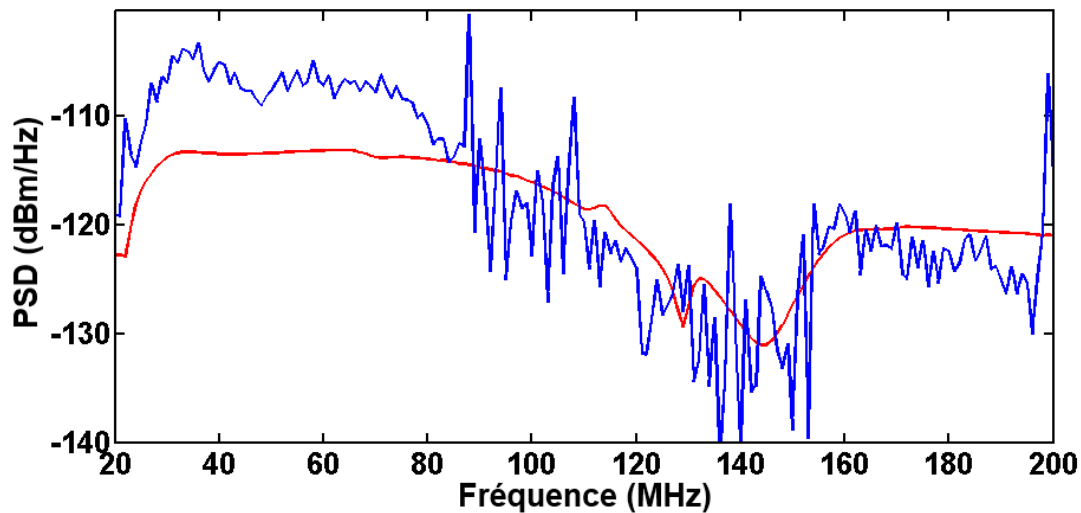


FIGURE 4.44 – Spectre mesuré sur la coïncidence enregistrée à RAuger (en bleu). La ligne rouge représente la longueur effective de l'antenne comprenant l'ensemble de la chaîne électronique et calculée pour la direction d'arrivée de l'évènement observé.

- On peut également étudier les événements particulièrement puissants observés à Nançay, pour lesquels la contribution spectrale du signal radio est largement visible, et corriger les signaux de la réponse d'antenne. Le premier événement étudié correspond à la coïncidence double enregistrée par les stations autonomes en janvier 2010. L'évènement, externe, a une énergie proche de 10^{18} eV déduite du profil latéral mesuré par les antennes et de la corrélation en énergie présentée dans le chapitre 3. La distance à l'axe reconstruite de l'antenne étudiée est d'environ 250 mètres. La direction d'arrivée a un azimut de 310° (Nord-Est) et une inclinaison de 43° . Une première démarche qualitative consiste à convoluer un spectre théorique par la réponse de l'antenne. Deux paramètres permettent de représenter très grossièrement les spectres attendus par une relation affine entre densité de puissance et fréquence : la pente (indice spectral) et la valeur à l'origine du spectre (Fig. 4.45). En jouant sur ces deux paramètres, il est possible d'ajuster le spectre expérimental mesuré avec le spectre théorique convolué de la réponse d'antenne. Le spectre théorique obtenu

est en accord qualitatif avec les résultats des simulations (spectre décroissant en fréquence) entre 20 et 150 MHz. Cette étude permet d'ores et déjà de discriminer un certain nombre de spectres possibles.

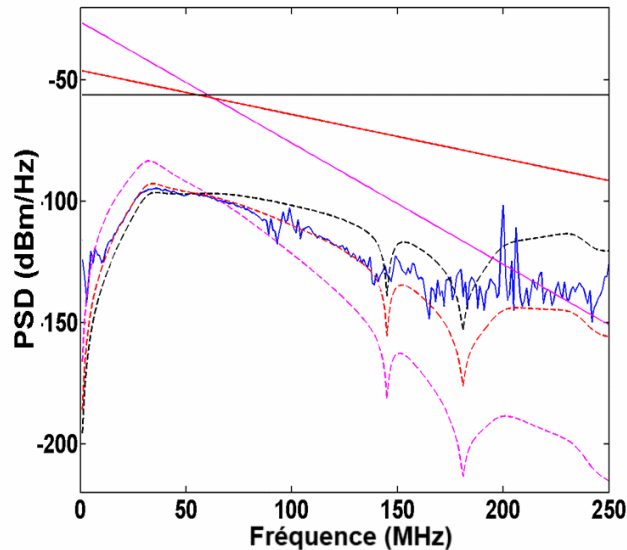


FIGURE 4.45 – Trois modèles simplifiés de spectre (lignes pleines, en haut) corrigés de la réponse d'antenne donnent les spectres tracés en pointillé. Le spectre réel mesuré est indiqué en bleu.

- Nous pouvons également suivre la démarche inverse : directement à partir du spectre mesuré par l'antenne, les différentes corrections (câbles, LNA, réponse d'antenne) peuvent être appliquées pour remonter au champ $\mathcal{E}$ vu par l'antenne. Il est alors possible de comparer le spectre en fréquence du signal déconvolué aux différents modèles proposés par les simulations d'émission de champ radio de la gerbe et n'englobant pas les effets expérimentaux. Ainsi, une comparaison à un modèle théorique, le modèle SEIFAS [59] a été réalisée, avec une gerbe simulée aux caractéristiques correspondantes à celles de l'évènement en question. L'accord le plus satisfaisant est trouvé pour une antenne placée à 300 mètres de l'axe, soit un peu plus que la distance réelle de l'antenne à l'axe (Fig. 4.46). Il ne s'agit plus de mesurer une densité spectrale de puissance (ce que mesure un analyseur de spectre) exprimée en $\text{dBm} \cdot \text{Hz}^{-1}$ ou en $\text{V} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ mais une densité spectrale d'énergie homogène à des $\text{V} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1}$. La densité spectrale de puissance de ce bruit est observée pour le cas des régimes permanents. Dans le cas d'un phénomène transitoire, et notamment pour les simulations SEIFAS, c'est l'énergie totale associée à cette impulsion qui est calculée.
- La déconvolution de la réponse d'antenne peut également être appliquée aux antennes dipolaires quand la contrepartie du champ électrique de la gerbe est largement supérieure au bruit du LNA et de la galaxie. Les impulsions et les spectres retrouvés s'approchent à nouveau des simulations obtenues par REAS3, MGMR ou SEIFAS que ce soit en terme d'amplitudes (de l'ordre de la dizaine de mV pour des gerbes de 10^{18} eV à quelques dizaines de mètres de l'axe) ou de forme (une certaine bipolarité du signal semble apparaître). Le signal déconvolué présenté dans la figure 4.47

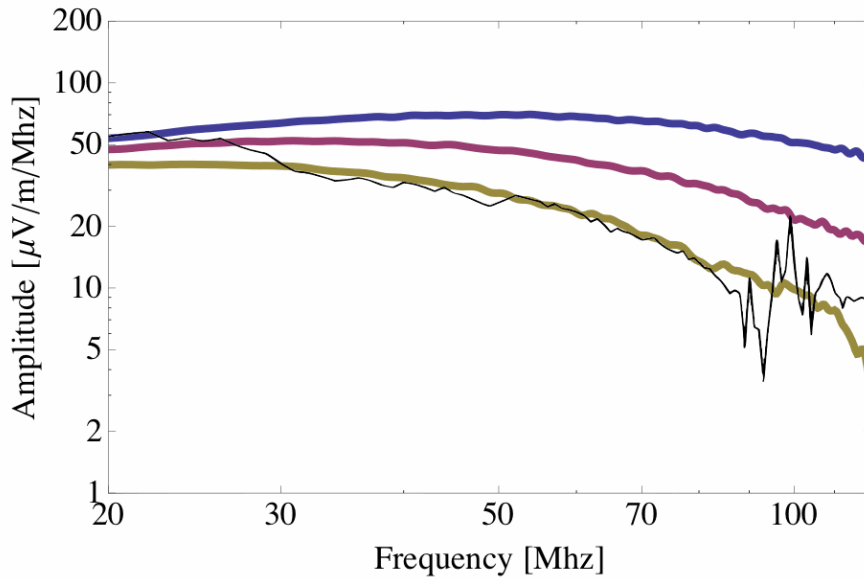


FIGURE 4.46 – Spectre en fréquence corrigé de l'ensemble de la réponse d'antenne (trait fin), pour un évènement à 10^{18} eV. Traits épais : simulation SEIFAS, réalisée pour une gerbe de mêmes caractéristiques que celle mesurée, à 200, 250 et 300 mètres de haut en bas. L'axe des fréquence est en échelle logarithmique.

est filtré en amont entre 20 et 190 MHz. Les contributions des émetteurs FM sont visibles dans le bruit, en dehors de l'impulsion, et également dans le spectre en fréquence reconstruit (Fig. 4.48). Naturellement, les amplitudes des impulsions déconvoluées décroissent avec la distance. De même l'indice spectral croît également avec cette distance.

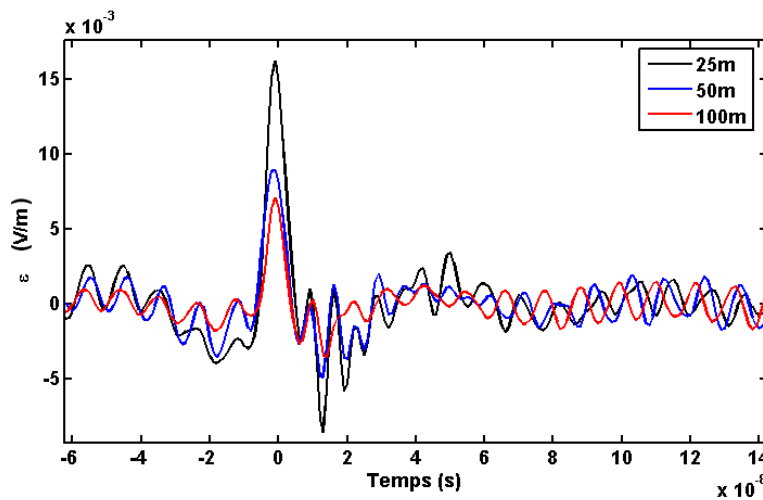


FIGURE 4.47 – Signaux déconvolués de la réponse d'antenne pour un évènement d'énergie 10^{18} eV, de trois antennes, NO1, NS4 et D98, à respectivement 25, 50 et 100 m de l'axe de la gerbe.

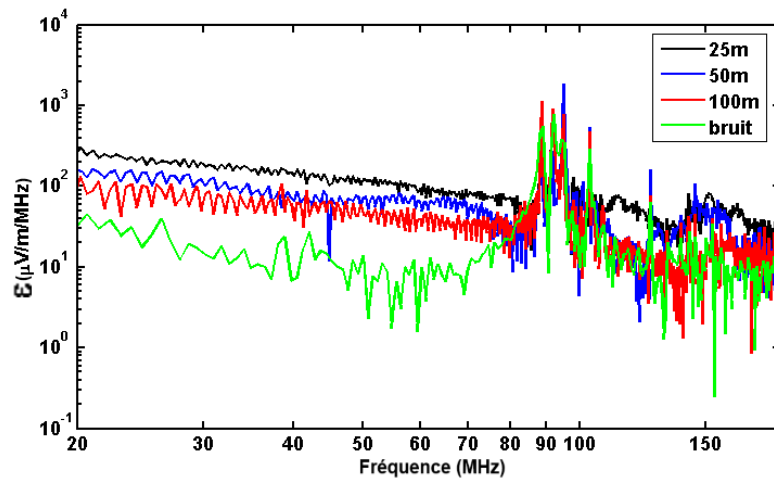


FIGURE 4.48 – Spectre en fréquence des signaux déconvolués de la réponse d'antenne pour un évènement d'énergie 10^{18} eV, de trois antennes, NO1, NS4 et D98, à respectivement 25, 50 et 100 m de l'axe de la gerbe. En vert, spectre en fréquence du signal d'une antenne, hors impulsion.

Ce résultat récent doit être complété par des mesures systématiques de spectre pour les événements les plus puissants, avec une confrontation aux différentes simulations. Une analyse spectrale à basse fréquence (autour de 10 MHz), à des heures de la journée appropriées (voir effets ionosphériques sur les émetteurs AM, expliqués dans le chapitre 2) est également envisageable afin d'observer le comportement du spectre en fréquence associé au signal radio de la gerbe.

Conclusions et perspectives

Le travail réalisé pendant cette thèse et présenté dans ce manuscrit a porté sur trois points principaux :

- Le réseau de CODALEMA-II et la sensibilité des dipôles et de l'électronique associée.
- La préparation et le déploiement d'une expérience de radiodétection autonome à Nançay et à Auger.
- L'évaluation de la robustesse de cette méthode de détection.

Une certaine variation des signaux mesurés à CODALEMA-II éloignant une partie des distributions latérales de leur forme attendue devait être comprise. La mise en place du suivi de qualité a montré certains dysfonctionnements des antennes, expliquant une partie des distributions latérales pathologiques observées. Les défauts des cartes d'acquisition MATACQ ont également été mis en évidence : les intermodulations et les répliques des émetteurs conjuguées au bruit du LNA à basse fréquence pénalisent la sensibilité des antennes. Les effets d'environnement, également étudiés, semblent être très faibles : des effets d'interférences induits par le voisinage immédiat des antennes ne sont que très ponctuellement visibles. Pour les antennes placées dans des environnement particulièrement défavorables, la limite supérieure du ratio des événements non détectés ne dépasse pas 10%. Les variations de champ électrique d'une antenne à l'autre ne peuvent donc être expliquées par les seuls effets d'environnement.

Les résultats obtenus avec une statistique élargie confirment un effet géomagnétique dans le mécanisme de création du champ électrique induit par une gerbe atmosphérique. Un modèle simple permet en effet de reproduire au premier ordre les distributions angulaires des directions d'arrivée. L'étude de la corrélation en énergie a mis en évidence l'importance de la prise en compte des erreurs sur l'énergie reconstruite et le champ mesuré. L'évaluation de la contribution précise du mécanisme géomagnétique dans l'émission du champ radio par la gerbe n'est pour le moment pas possible.

L'étude de la radiodétection autonome a constitué la deuxième partie de ce travail de thèse. Dans un premier temps, une étude de l'environnement radio de l'Observatoire de Nançay a été réalisée par la prise de données du réseau câblé, pendant quelques jours, en déclenchement radio. Grâce aux résultats obtenus, plusieurs sources d'émission radio ont pu être mises en évidence : les instruments et les bâtiments de l'Observatoire, d'autres sources plus éloignées, et des avions. L'étude de cette dernière source a permis de calculer la résolution angulaire du réseau estimée à moins de 1° . La mise en place des premières stations autonomes et l'étude de leurs données ont ensuite été réalisées. La recherche de coïncidences

hors-ligne, entre stations et détecteurs de particules s'est montrée fructueuse. En quelques semaines de prise de données communes, plusieurs événements associés à des rayons cosmiques ont ainsi été détectés. En Argentine, sur le site de l'Observatoire Pierre Auger, des résultats similaires ont été obtenus, puisqu'une première coïncidence a été détectée quelques jours seulement après l'installation des nouvelles stations, suivie d'une dizaine dans les mois suivants. Le développement des expériences de radiodétection autonome va être prolongé sur les deux sites de Nançay et de Auger. En France, CODALEMA-III sera développée dès la fin de l'année 2010. Vingt puis soixante stations vont permettre d'atteindre des énergies plus élevées qu'à CODALEMA-II (Fig. 4.49). En Argentine, le développement de l'expérience se fera via le maintien de l'expérience RAuger, et via la collaboration AERA [102]. Cette dernière fédère les efforts de différents groupes de recherche européens (Allemagne, France, Pays-Bas). Le but de cette collaboration est de déployer à l'Observatoire Pierre Auger un réseau de 150 stations autonomes sur une surface de 20 km². Le déploiement des stations doit être effectué progressivement, en commençant par un cœur dense d'une vingtaine de stations espacées d'environ 100 m, avant de couvrir des surfaces plus importantes avec un pas de réseau plus large (jusqu'à 250 m) sur la partie du site d'Auger dédiée aux R&D, aux côtés des expériences HEAT et AMIGA. Différents prototypes sont actuellement testés, au niveau du site AERA, notamment une station autonome 'à la CODALEMA'. Au niveau de l'acquisition et de l'analyse, l'intégration du futur détecteur radio au programme d'analyse de l'Observatoire Pierre Auger est en cours. La connaissance de l'ensemble de la chaîne expérimentale sur les deux réseaux a permis de remonter à l'impulsion électrique créée par la gerbe. Ces résultats, prometteurs, sont en accord avec les simulations.

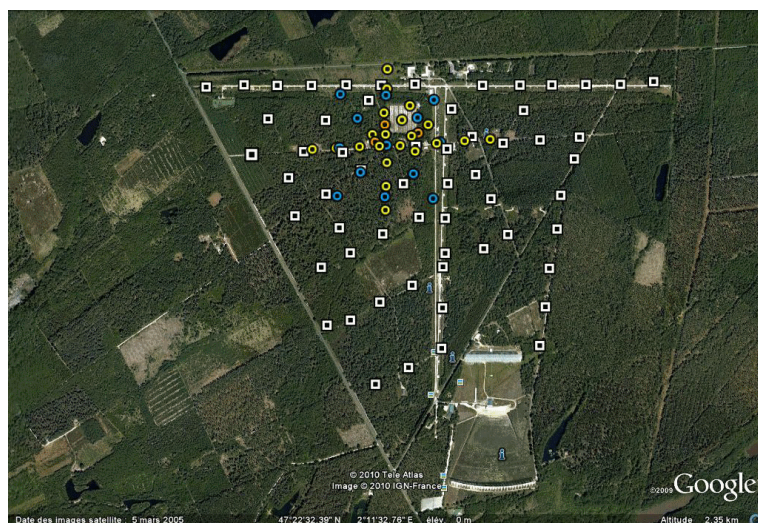


FIGURE 4.49 – Emplacement des 60 futures stations autonomes (carrés blanc) sur l'Observatoire de Nançay. Les scintillateurs sont indiqués par des cercles rouge.

Au vu des résultats de cette thèse, on peut envisager de faire porter dans l'avenir les efforts de travail sur les points suivants :

- Le développement et l'analyse des données d'un réseau à grande échelle à travers la mise en place d'un monitoring et d'un système de déclenchement optimisé.

- L'amélioration de la compréhension de la physique de la gerbe par la mise en commun des données de 3 détecteurs : CODALEMA-II, RAuger, et CODALEMA-III. Les gammes d'énergie, les champs géomagnétiques différents devraient permettre par exemple de contraindre la corrélation de manière plus satisfaisante.
- L'amélioration de la reconstruction des distributions latérales de champ. Un certain nombre d'hypothèses est pour le moment utilisé dans l'analyse des données notamment la symétrie de la distribution autour de l'axe et le profil exponentiel. Les modèles de simulation indiquent cependant que, pour certaines conditions (gerbes inclinées, proximité du cœur), ces hypothèses ne sont plus valides ou pour le moins doivent être affinées.
- Le développement d'un nouveau LNA. Les simulations et les signaux radio déconvolués de la réponse d'antennes indiquent qu'une majeure partie de l'émission radio de la gerbe se trouve à basse fréquence. Le nouveau LNA devra donc se montrer sensible au maximum à ces longueurs d'ondes. Dans ce but, la principale difficulté de conception sera d'éviter les intermodulations des émetteurs AM.
- Toujours sur le plan expérimental, l'acceptance des antennes pourra être étendue vers l'horizon afin de se montrer sensible aux gerbes horizontales.
- Les trois derniers points sont très fortement liés aux travaux de simulation. De ce point de vue, une comparaison systématique entre données et simulations doit être mise en place. Dans le cadre de CODALEMA, elle est facilitée par le développement en interne d'un outil de simulation : SEIFAS.

Dix ans après son démarrage, CODALEMA offre toujours un potentiel séduisant d'observation et d'analyse.

Bibliographie

- [1] Site WEB du CHICOS. <http://www.chicos.caltech.edu/collaboration/education/spectrum.html>.
- [2] T. Wulf. *Phys. Zeit.*, 11, 1910.
- [3] V. F. Hess. Observation of penetrating radiation in seven balloons flights. *Phys. Zeit.*, 13, 1912.
- [4] W. Kolhörster. *Ber. Deutsch. Phys. Ges.*, 19, 1914.
- [5] R. A. Milikan *et al.* *Nat. Acad. Sci. Pro.*, 12, 1926.
- [6] D. V. Skobelzym. A new type of very fast beta rays. *Z. Phys*, 54, 1929.
- [7] J. Clay. *Proceedings Academy of Amsterdam*, 30, 1930.
- [8] P. Auger *et al.* *Comptes Rendus de l'Académie des sciences*, 197, 1933.
- [9] A. H. Compton. A geographic study of cosmic rays. *Phys. Review*.
- [10] R. Maze et P. Auger. *Comptes Rendus de l'Académie des sciences*, 208, 1938.
- [11] B. Rossi. *Z. Phys.*, 82, 1933.
- [12] W. Heitler. *The Quantum theory of radiation*. 1954.
- [13] J. Matthews. A Heitler model of extensive air showers. *Astropart. Phys.*, 22 :387–397, 2005.
- [14] K. Greisen. *Progress in Elementary Particle and Cosmic Ray Physics*, 3, 1956.
- [15] B. Rossi et K. Greisen. *Reviews of Modern Physics*, 4, 1941.
- [16] O. Catalano *et al.* The longitudinal EAS profile at $E > 10^{19}$ eV : A comparison between GIL analytical formula and the predictions of detailed Monte Carlo simulations. 2001.
- [17] Site WEB de AIRES. <http://www.fisica.unlp.edu.ar/auger/aires>.
- [18] Site WEB de CORSIKA. <http://www-ik.fzk.de/corsika/>.
- [19] J. Knapp *et al.* Extensive air shower simulations at the highest energies. *Astropart. Phys.*, 19 :77–99, 2003.
- [20] M. Risse. Properties of Extensive Air Showers. *Invited talk given at the Epiphany Conference on Astroparticle Physics*, 2004.

- [21] J. N. Capdevielle et F. Cohen. The relation between the lateral profile of giant extensive air showers and the age parameter. *J. Phys. G : Nucl. Part. Phys.*, 31 :507–524, 2005.
- [22] K. Kamata et J. Nishimura. *Suppl. Progr. Theor. Phys.*, 6, 1958.
- [23] The Pierre Auger Collaboration. A Study of the Effect of Molecular and Aerosol Conditions in the Atmosphere on Air Fluorescence Measurements at the Pierre Auger Observatory. volume 33, 2010.
- [24] A. Creusot. Recent results of the Pierre Auger Observatory. *Oral communication ARENA 2010*, 2010.
- [25] M. Roth for the Auger Collaboration. Measurement of the UHECR energy spectrum using data from the Surface Detector of the Pierre Auger Observatory. In *Proceeding of the 30th International Cosmic Ray Conference*, 2007.
- [26] J. Linsley. Evidence for a primary cosmic-ray particle with energy 10^{20} eV. *Phys. Rev. Lett.*, 10, 1963.
- [27] G. W. Mason. Observation of extensive air showers by air fluorescence. Description of experimental techniques. In *Proceeding of the 15th International Cosmic Ray Conference*, 1977.
- [28] M. Ave *et al.* The Energy Spectrum of Cosmic Rays in the Range $3 \times 10^{17} - 4 \times 10^{18}$ eV as Measured with the Haverah Park Array. *Astropart. Phys.*, 19, 2003.
- [29] M. Takeda *et al.* Extension of the Cosmic-Ray Energy Spectrum beyond the predicted Greisen-Zatsepin-Kuzmin Cutoff. *Phys. Rev. Lett.*, 81 :1163–1166, 1998.
- [30] C. C. H. Jui *et al.* Result from the HIRES Experiment. *Journal of Physics : Conf. Series*, 47, 2006.
- [31] F. Halzen *et al.* The highest energy cosmic ray. *Astropart. Phys.*, 3, 1995.
- [32] N. Sakurai *et al.* Distribution of arrival directions obtained from the first year data of Telescope Array.
- [33] T. Antoni *et al.* The Cosmic ray experiment KASCADE. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A*, 513, 2003.
- [34] W. D. Apel *et al.* Lateral Distribution of the Radio Signal in Extensive Air Showers Measured with LOPES. *Astropart. Phys.*, 32, 2010.
- [35] K. Greisen. End to the cosmic ray spectrum ? *Phys. Rev. Lett.*, 16, 1966.
- [36] G. Zatsepin et V. A. Kuzmin. Upper limit of the spectrum of cosmic rays. *JETP Letters*, 4, 1966.
- [37] A. Penzias et R. Wilson. *ApJ Lett.*, 142, 1965.
- [38] R. Alpher et R. Hermann. *Nature*, 162, 1948.

- [39] E. Fermi. On the origin of the cosmic radiation. *Phys. Review*, 75, 1949.
- [40] Site WEB de JEM EUSO. <http://jemeuso.riken.jp>.
- [41] The Pierre Auger Collaboration. Measurement of the energy spectrum of cosmic rays above 10^{18} eV using the Pierre Auger Observatory. *Phys. Lett. B*, 685, 2010.
- [42] The Pierre Auger Collaboration. Correlation of the Highest-Energy Cosmic Rays with Nearby Extragalactic Objects. *Science*, 318, 2007.
- [43] The Pierre Auger Collaboration. Update on the correlation of the highest energy cosmic rays with nearby extragalactic matter. *Astropart. Phys.*, accepted for publication 2010.
- [44] The Pierre Auger Collaboration. Measurement of the Depth of Maximum of Extensive Air Showers above 10^{18} eV. *Phys. Rev. Lett*, 104, 2010.
- [45] W. Galbraith et J. Jelley. *Light pulses from the night sky associated with Cosmic Rays*. 1953.
- [46] G. Askaryan. *Soviet Phys. JETP*, 14, 1962.
- [47] J. Jelley *et al.* Radio pulses from extensive cosmic-ray air showers. *Nature*, 205, 1965.
- [48] H. R. Allan *et al.* Progress in Elementary Particle and Cosmic Ray Physics. *Amsterdam*, 1971.
- [49] P. R. Barkr. Radio pulses from air showers at Mt. Chacaltaya. *Can. J. Phys.*, 46, 1968.
- [50] S. R. Vernov *et al.* Detection of radio emission from extensive air showers with a system of single half-wave dipoles. *Can. J. Phys.*, 46, 1968.
- [51] F. D. Kahn et I. Lerche. *Proc. Royal Soc. London A*, 289, 1966.
- [52] J. R. Prescott *et al.* Radio signals from air showers at 22 mhz. *Can. J. Phys.*, 46, 1968.
- [53] A. D. Bray. Emission of radio pulses from cosmic ray extensive air shower. *Nature*, 223, 1969.
- [54] T. Huege et H. Falcke. Radio emission from cosmic ray air showers. Coherent geosynchrotron radiation. *Astronomy and Astrophysics*.
- [55] T. Huege et H. Falcke. Radio emission from cosmic ray air showers : Monte Carlo simulations. *Astronomy and Astrophysics*.
- [56] T. Huege et H. Falcke. Monte Carlo simulations of geosynchrotron radio emission from CORSIKA-simulated air showers. *Astropart. Phys.*
- [57] M. Ludwig et T. Huege. REAS3 : A revised implementation of the geosynchrotron model for radio emission from EAS. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A*, Article in Press 2010.
- [58] M. DuVernois *et al.* Geosynchrotron radio pulse emission from extensive air showers : Simulations with AIRES. In *Proceeding of the 29th International Cosmic Ray Conference*, 2005.

- [59] V. Marin. Coherent radio emission from cosmic ray air showers computed by Monte-Carlo simulation with SEIFAS. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A*, Article in Press 2010.
- [60] S. Lafebre *et al.* Universality of electron-positron distributions in extensive air showers. *Astropart. Phys.*, 31, 2009.
- [61] N. Meyer-Vernet *et al.* Radio pulses from cosmic ray air showers - Boosted Coulomb and Cherenkov fields. *Astronomy and Astrophysics*, 480, 2008.
- [62] J. Chauvin *et al.* Radio emission in a toy model with point-charge-like air showers . *Astropart. Phys.*, 33, 2010.
- [63] D. Lebrun et J. Chauvin. Radio emission from cosmic ray air shower via inverse Compton scattering. In *Proceeding of the 31th International Cosmic Ray Conference*, 2009.
- [64] T. Gousset *et al.* Radioelectric fields from cosmic-ray air showers at large impact parameters. *Astropart. Phys.*, 31, 2009.
- [65] K. Werner et O. Scholten. Macroscopic treatment of radio emission from cosmic ray air showers based on shower simulations. *Astropart. Phys.*
- [66] T. Huege *et al.* The convergence of EAS radio emission models and a detailed comparison of REAS3 and MGMR simulations. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A*.
- [67] D. Ardouin *et al.* Radio-Detection signature of high-energy cosmic rays by the CODALEMA experiment. *Nuclear Instrument and Methods in Physics Research, A*, 555 :148–163, 2005.
- [68] Site WEB de l’Observatoire de Nançay. [http ://www.obs-nancay.fr](http://www.obs-nancay.fr).
- [69] A. Boischot *et al.* A New High-Gain, Broadband, Steerable Array to Study Jovian Decametric Emission. *Icarus*, 43 :399, 1980.
- [70] A. Lecacheux *et al.* Radio signature of extensive air showers observed with the Nançay Decameter Array. In *Proceeding of the 31th International Cosmic Ray Conference*, 2009.
- [71] H. R. Allan *et al.* Frequency Spectrum of Extensive Air Shower Radio Pulses. *Nature*, 225 :253, 1970.
- [72] D. Ardouin *et al.* Radioelectric field features of extensive air showers observed with CODALEMA. *Astropart. Phys.*, 26 :341–350, 2006.
- [73] Site WEB de LabVIEW. [http ://www.ni.com/labview/](http://www.ni.com/labview/).
- [74] A. Bellétoile. *Développement et analyse des données d’une expérience de radiodétection des Rayons Cosmiques d’Ultra Haute Energie*. PhD thesis, Université de Nantes, Ecole doctorale STIM, 2007.

- [75] M. Aglietta *et al.* UHE cosmic ray event reconstruction by the electromagnetic detector of EAS-TOP. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A*, 1 :310–321, 1993.
- [76] C. Rivière. *Des signaux radio aux rayons cosmiques*. PhD thesis, Université de Grenoble, Ecole Doctorale de Physique de Grenoble, 2009.
- [77] D. Allard *et al.* *A guide-line to the Auger SD Analysis*. 2006. Auger GAP Note.
- [78] D. Charrier. Design of a low noise, wide band, active dipole antenne for a cosmic ray radiodetection experiment. In *Antennas and Propagation Society International Symposium, 2007 IEEE*, 2007.
- [79] S. Valcarès. *De la mesure des champs électriques par l'expérience CODALEMA aux caractéristiques des rayons cosmiques*. PhD thesis, Université de Nantes, Ecole Doctorale STIM, 2008.
- [80] J. D. Kraus. *Antennas*. 1950.
- [81] J. C. Maxwell. On the electrical capacity of a long narrow cylinder and of a disk of sensible thickness. *Proc. London Math. Soc.*, 9 :94–101, 1878.
- [82] A. Balanis. *Antenna Theory Analysis and Design, 2nd Edition*. 1997.
- [83] Site WEB de 4nec2. <http://home.ict.nl/~arivoors/>.
- [84] D. Charrier. Rapport de Stage de DESS : Conception d'un préamplificateur d'antenne à large bande et bas bruit, 2003.
- [85] J. Lamblin and the CODALEMA collaboration. Radiodetection of astronomical phenomena in the cosmic ray dedicated CODALEMA experiment. In *Proceeding of the 30th International Cosmic Ray Conference*, 2008.
- [86] D. Ardouin *et al.* Geomagnetic origin of the radio emission from cosmic ray induced air showers observed by CODALEMA. *Astropart. Phys.*, 31 :192–200, 2009.
- [87] D. Lebrun. Communication privée.
- [88] Site WEB de Radio Campus. <http://www.brume.org/radios/>.
- [89] T. Garçon for the CODALEMA collaboration. Surrounding effects and sensitivity of the CODALEMA experiment. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A*, Article in Press 2010.
- [90] T. Huege et H. Falcke. Radio emission from cosmic rays air showers : simulation results and parametrization. *Astropart. Phys.*
- [91] T. Saugrin. *Radiodétection et caractérisation de l'émission radio des gerbes cosmiques d'énergie supérieure à 10^{16} eV avec l'expérience CODALEMA*. PhD thesis, Université de Nantes, Ecole Doctorale STIM, 2008.

- [92] D. York *et al.* Unified equations for the slope, intercept, and standard errors of the best straight line. *Am. J. Phys*, 2004, 72.
- [93] A. Rebai. *thèse en préparation*. PhD thesis, Université de Nantes, Ecole Doctorale 3MPL, 2012.
- [94] D. Turpin. Rapport de Stage de L3 : Caractérisation des signaux issus de l'émission radio induits par des rayons cosmiques, 2010.
- [95] B. Revenu *et al.* Radiodetection of cosmic air showers with autonomous radio detectors installed at the Pierre Auger Observatory. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A*, 604 :37–40, 2009.
- [96] B. Revenu *et al.* *First threefold coincidence*. 2009. Auger GAP Note.
- [97] D. Charrier for the CODALEMA collaboration. Nuclear instruments and methods in physics research, a. *Antenna development for astroparticles and radioastronomy experiments*, Article in Press 2010.
- [98] E. Polisensky. A Low Frequency Sky Map Generating Program. 2007.
- [99] C. Viou et L. Denis. Mesure de rayonnement d'une station autonome CODALEMA en chambre anéchoïde. Technical report, 2010.
- [100] P. Colom et E. Gérard. Tests Station CODALEMA autonome avec le NRT. Technical report, 2010.
- [101] C. Fabrice et A. Kerdraon. Mesure des émission de la station CODALEMA vues par le RH. Technical report, 2010.
- [102] R. Dallier *et al.* Measuring cosmic ray radio signals at the Pierre Auger Observatory. *Nuclear Instrument and Methods in Physics Research, A*, Article in Press 2010.

Résumé

Etudiée pour la première fois dans les années 60, la technique de radiodétection des gerbes atmosphériques montra des résultats prometteurs mais limités par les capacités techniques de l'époque. H.R. Allan synthétisa alors l'ensemble des connaissances dans une revue extensive dont les conclusions et les prédictions font encore référence aujourd'hui. L'expérience CODALEMA a été conçue en 2001 à l'observatoire de Nançay, d'abord comme un démonstrateur de la faisabilité de la technique de radiodétection des rayons cosmiques. Modifiée en profondeur en 2005, elle a permis de mettre en place une première corrélation en énergie et de prouver sans ambiguïté la prépondérance du champ magnétique terrestre dans l'émission radio de la gerbe. Le passage à de grandes surfaces de détection est la prochaine étape du développement de la technique. L'autonomie des détecteurs devient alors un élément crucial. Précédée de prototypes de tests installés en 2006 au sein de l'observatoire Pierre Auger, une nouvelle génération de détecteurs a depuis été développée et ses résultats sont détaillés. Cette thèse traite également des différentes problématiques liées à la technique de radiodétection : réponse d'antenne, sensibilité, impact de l'environnement, surveillance d'une expérience à grande échelle. La détermination, indépendamment d'un autre détecteur, des caractéristiques de la gerbe est discutée notamment la distribution latérale, la corrélation en énergie et la composition en fréquence du signal radio.

Mots clés : Rayon cosmique - Antenne - Gerbe atmosphérique - Station autonome - CODALEMA - AUGER - Radiodétection

Abstract

The radiodetection of extensive air showers, investigated for the first time in the 1960's, obtained promising results but plagued by the technical limitations. At that time, H.R. Allan summed up the state of the art in an extensive review article whose conclusions and predictions are still used today. Set up in 2001 at the Nançay Observatory, the CODALEMA experiment was built first as a demonstrator and successfully showed the feasibility of the radiodetection of extensive air showers. Radically modified in 2005, it allowed to obtain a clear energy correlation, and put in evidence an unambiguous signature of the geomagnetic origin of the electric field emission process associated to the air shower. The switch towards large areas is the next step of the technique's development. Therefore, the autonomy of the detectors becomes essential. After test prototypes installed in 2006 at the Pierre Auger Observatory, a generation of new autonomous detectors was developed. Their first results will be presented. This work is also dedicated to the issues related to the radiodetection technique : the antenna response, the sensitivity, the surrounding effects, the monitoring of a big array. The determination of the shower characteristics independently of other detectors such as the lateral distribution, the energy correlation and the frequency spectrum of the radio transient will be discussed.

Key words : Cosmic ray -Antenna - Air shower - Autonomous station - CODALEMA - AUGER - Radiodetection