

CODALEMA



La radio détection des rayons cosmiques
à la station de radio astronomie de Nançay

SUBATECH – LESIA – USN

Lilian Martin 2-3 Avril 2014 IAP

CODALEMA : c'est quoi ?

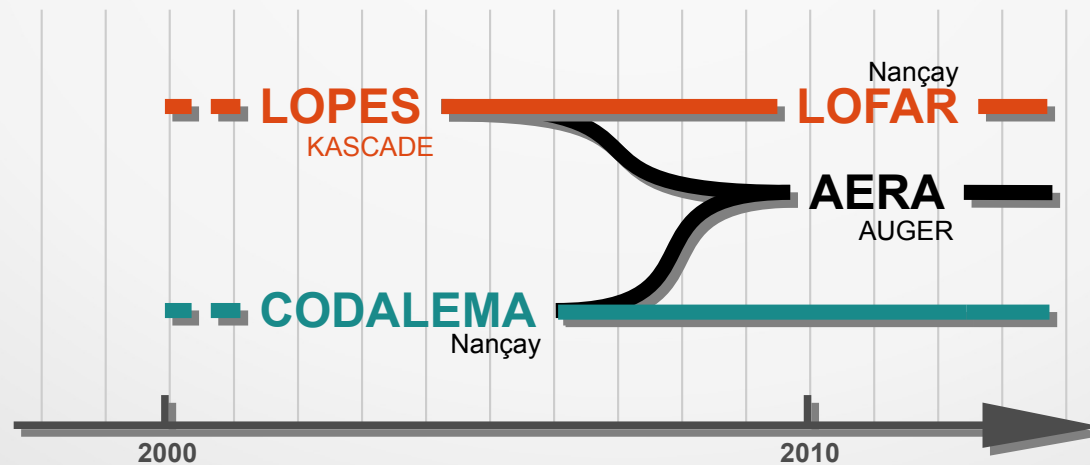
- CODALEMA n'est pas :
 - Un observatoire des rayons cosmiques de haute énergie
- CODALEMA est :
 - Un instrument d'étude du développement des grandes gerbes atmosphériques
 - Un site proche et pratique de développements et d'expérimentations instrumentaux autour de la radio détection des gerbes et de la détection des transitoires
 - Un terrain propice d'échange entre instituts/disciplines autour de la problématique des rayons cosmiques.

CODALEMA : pourquoi ?

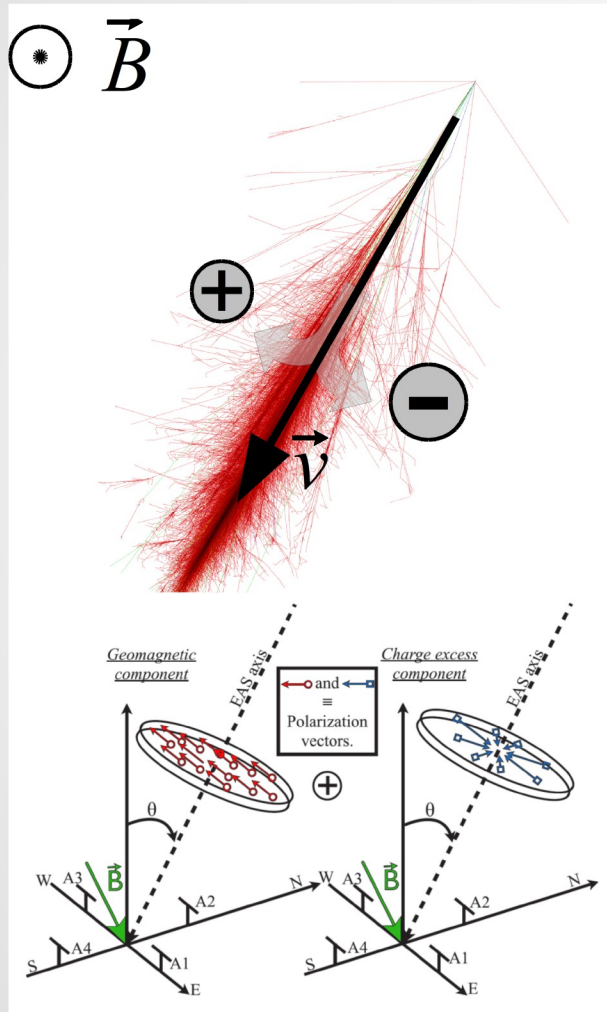
- Le contexte des rayons cosmiques : les résultats de l'observatoire Pierre Auger et Telescope Array :
 - des succès : une coupure à haute énergie, un ciel anisotrope...
 - des interrogations : des sources ? quelles sources ? Quelle masse pour les rayons cosmiques ?
- Il faut compter plus et mieux !
 - Un détecteur avec un cycle utile élevé et couvrant une surface très large
 - Une identification événement par événement
- International Symposium on Future Directions in UHECR Physics (UHECR2012) : bilan et perspectives à l'horizon 2020.
 - Upgrade «léger » des instruments à court terme et vers les basses énergies
 - Recherche de solutions pour un hypothétique grand réseau à moyen terme : technologie connue étendue, instrument composite, fluorescence mono-pixel, réseau d'antennes radio...

CODALEMA : pourquoi ?

- Upgrades à AUGER pour 2015
 - Efforts principaux sur l'identification du primaire en améliorant l'existant. Pas de course à la statistique en bout de spectre.
- Efforts de R&D depuis plusieurs années sur la radio détection avec des objectifs ambitieux :
 - Une technique complète : informations précises sur les propriétés du primaire
 - Une technique concurrentielle : un cycle utile élevé, une robustesse à un environnement bruité, un déploiement et usage aisé, un coût compétitif.



L'émission radio des gerbes atmosphériques



Les mécanismes induisent des polarisations particulières du signal radio

Gerbe atmosphérique = charges +/- en mouvement dans l'air et dans un champ magnétique

Différentes approches pour modéliser le champ électrique produit :

- Radiation Cerenkov de l'excès de charge (~ 20-30% d'électrons en plus) : Effet Askary'an (1962)
- Approche macroscopique : radiation d'un courant ; codes MGMR, EVA
- Approche microscopique : radiation des e+/e- dans le champ géomagnétique B ; codes REAS3, SELFAS, ZHAires

Convergence des prédictions

$$E(x, t) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left\{ \left[\frac{nq(t_{ret})}{R^2(1-\beta \cdot n)} \right]_{ret} + \frac{1}{c} \frac{\partial}{\partial t} \left[\frac{nq(t_{ret})}{R(1-\beta \cdot n)} \right]_{ret} + \frac{1}{c^2} \frac{\partial}{\partial t} \left[\frac{vq(t_{ret})}{R(1-\beta \cdot n)} \right]_{ret} \right\}$$

Champ statique
Somme de toutes les contributions statiques

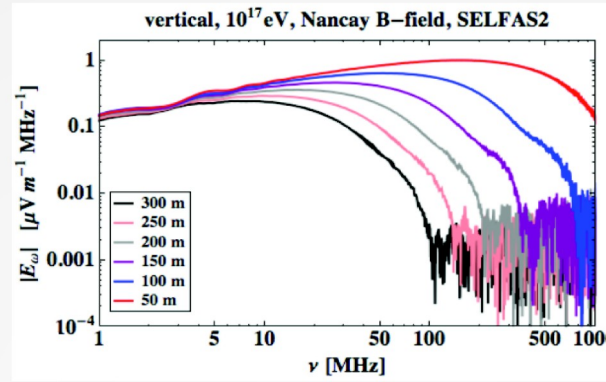
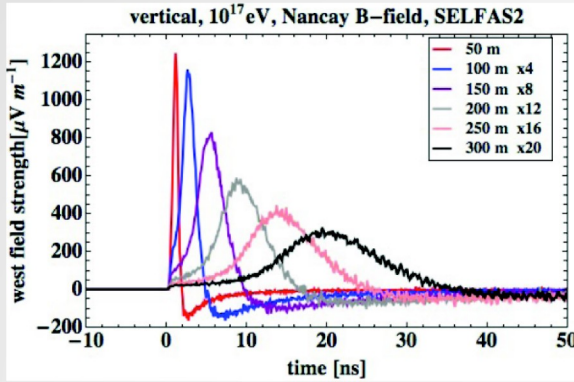
Variation de charge (terme d'excès de charge)
Somme de toutes les charges. L'excès net d'électrons impliquent une charge nette

Variation de courant (terme géomagnétique)
Somme des courants produits par les e+/e- déviés par le champ B

SELFAS V.Marin, B.Revenu

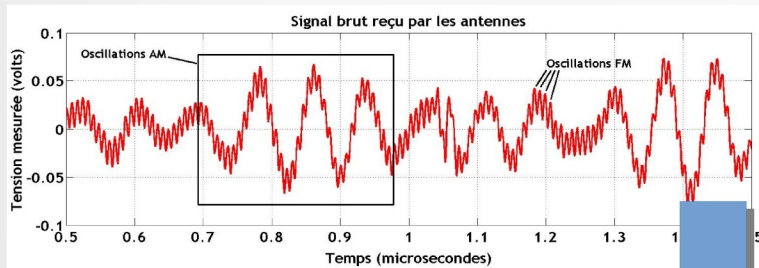
Le signal radio produit est corrélé à l'ensemble du développement de la gerbe

La mesure du signal radio-électrique

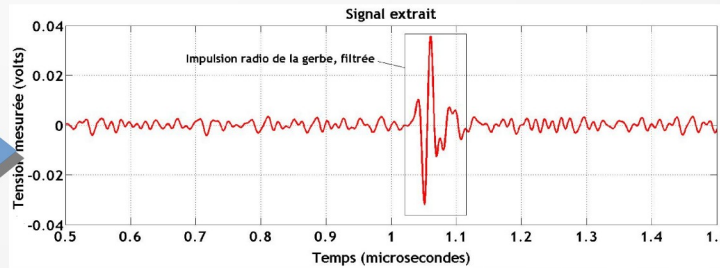


Signal transitoire bipolaire et court

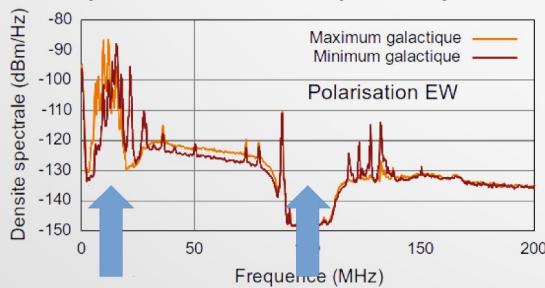
Énergie étalée principalement dans les fréquences de quelques MHz à quelques 100 de MHz



Antenne « décamétrique » sensible et large bande
Échantillonnage rapide sur une courte durée



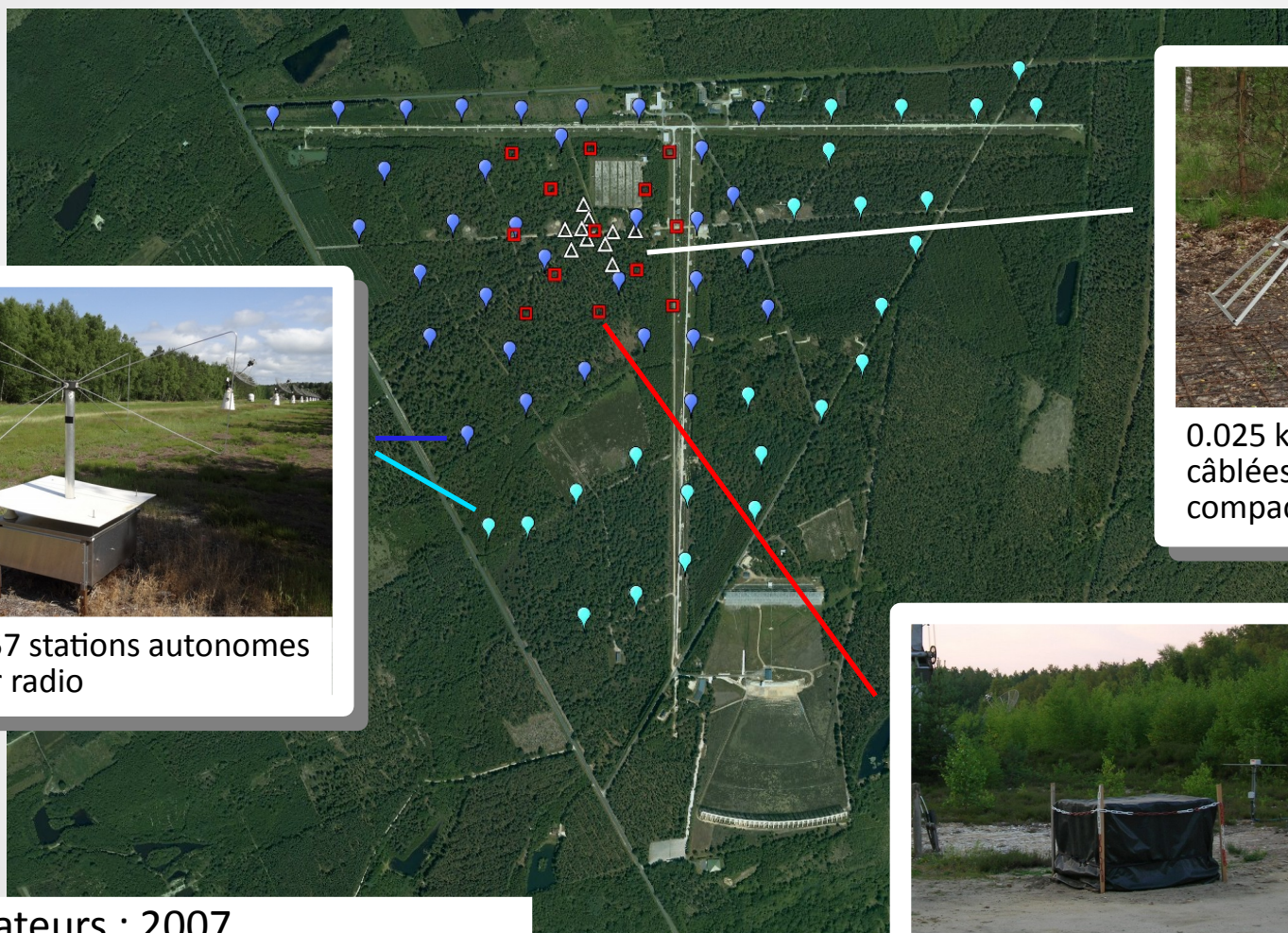
Des fréquences occupées par l'homme



On filtre les AM et la FM

Détection à la « particules » : on échantillonne le champ électrique avec un réseau d'antennes au sol

Un ensemble d'instruments



1 km² - 57 stations autonomes
– Trigger radio



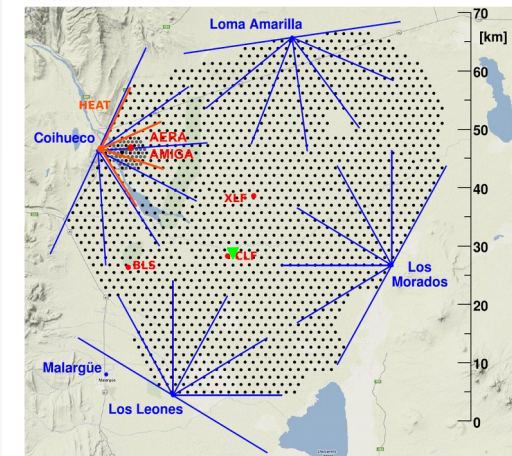
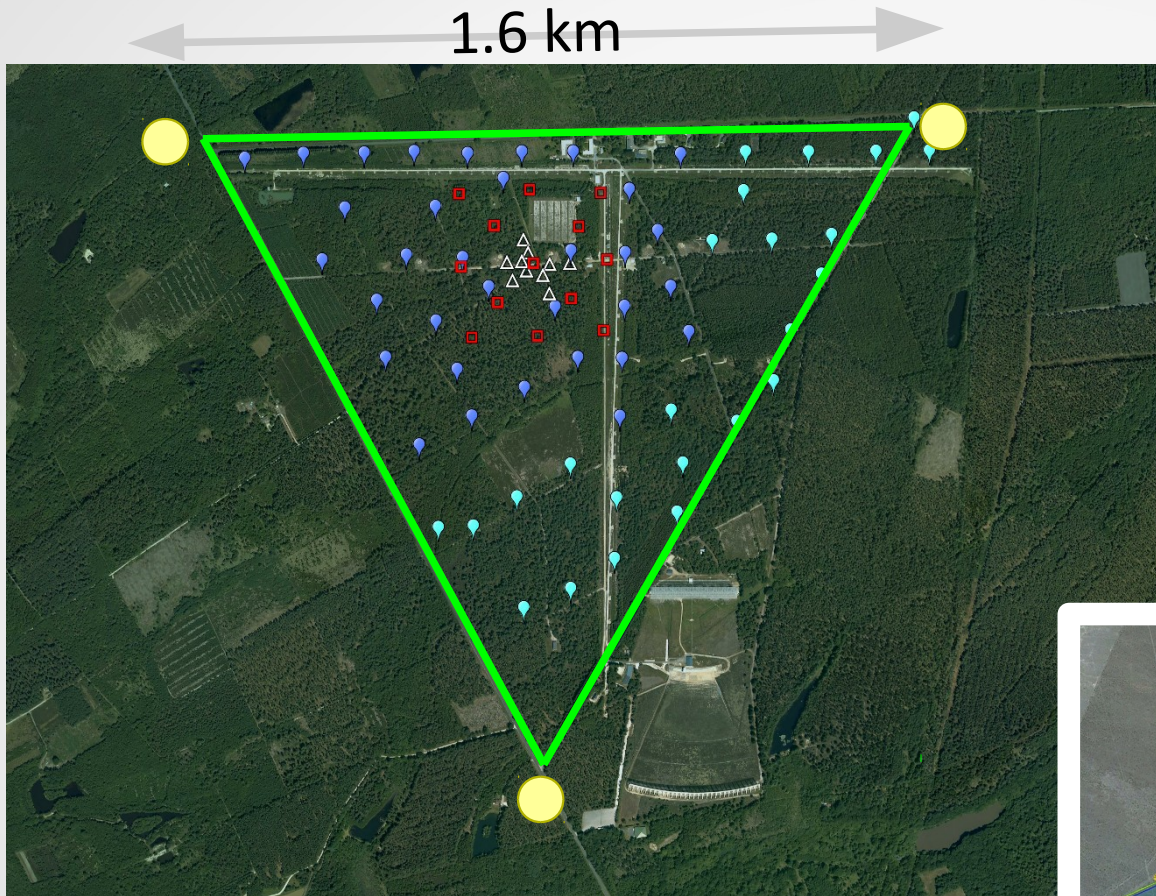
0.025 km² – 10 antennes
câblées – Réseau phasé
compact – Trigger externe



0.1 km² – 13 scintillateurs –
Validation et trigger Gerbes

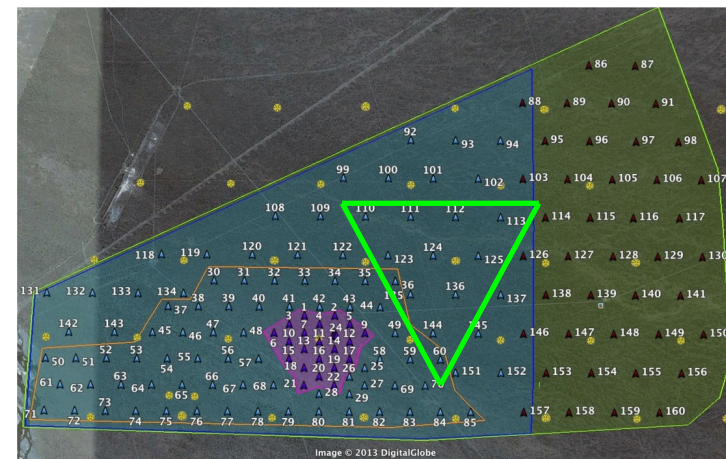
Scintillateurs : 2007
Stations autonomes : 2011 et 2013
Réseau compact : 2013

CODALEMA vs AUGER



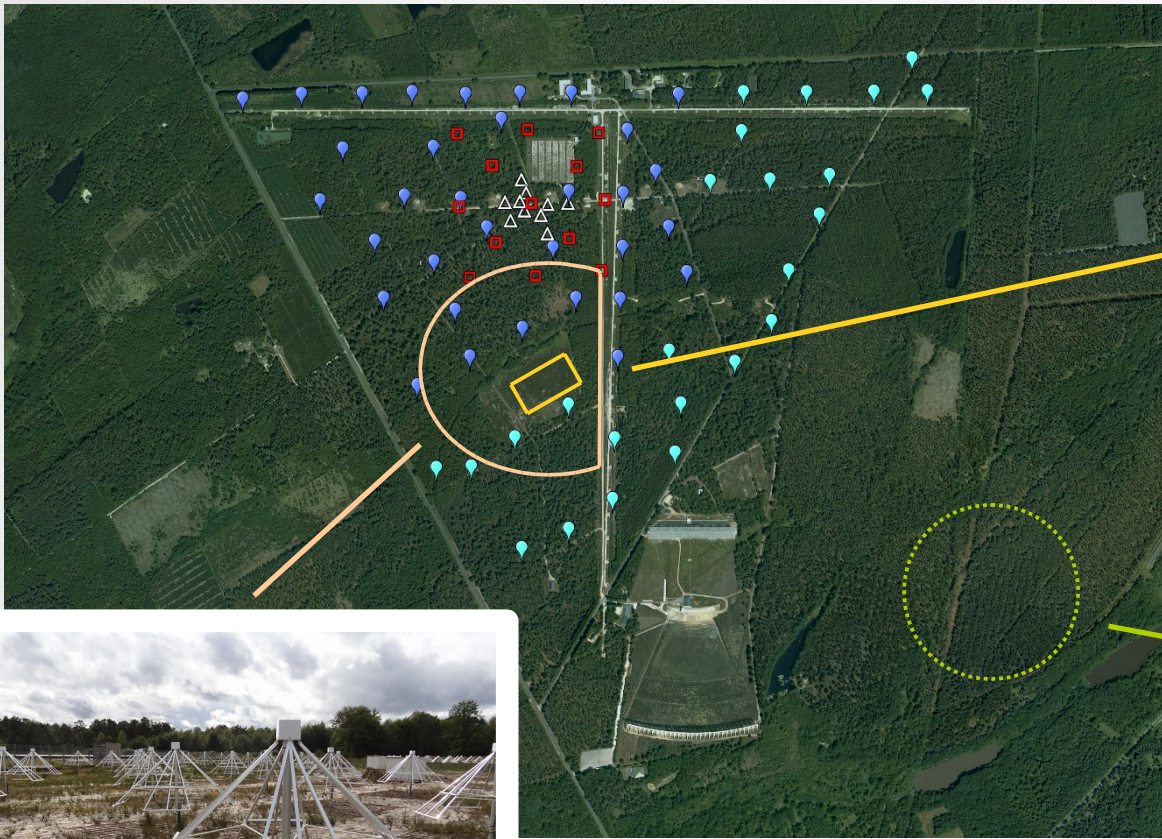
Le réseau de surface de AUGER
– 1600 cuves – 3000 km²

CODALEMA est équivalent à une maille du réseau de surface de AUGER !
CODALEMA est environ 10 fois plus petit que le démonstrateur AERA
Pas de concurrence en terme d'observation...



Le démonstrateur radio AERA – 160 stations radio – 13 km²

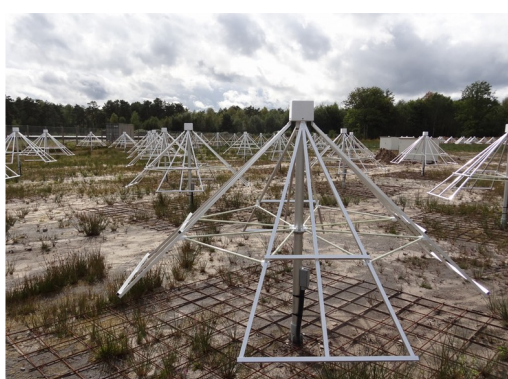
CODALEMA vs LOFAR



La station LOFAR de Nançay – 192 antennes



Le cœur de LOFAR aux Pays-Bas – 21x96 antennes – $\varnothing = 350$ m



Le projet NenuFAR à Nançay – 19x96 antennes – $\varnothing = 400$ m

CODALEMA couvre une surface supérieure au cœur de LOFAR
Des instruments complémentaires...

Le réseau de stations autonomes

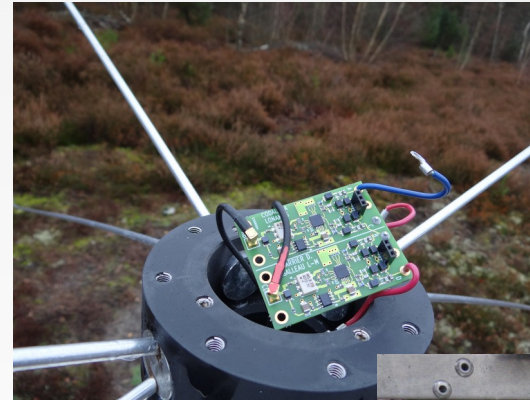
Réalisation d'une station de radio détection à Nançay :

- Définir un capteur possible pour un futur réseau : un déclenchement radio autonome
- Maîtriser un prototype de réseau de capteurs : un ensemble de plusieurs dizaines d'éléments (proximité, simplicité)
- Augmenter les capacités de mesure fine des gerbes avec CODALEMA : un nouveau design d'antenne.



Quelques éléments clés

- Une antenne robuste, large bande, linéaire : un design et un LNA dédié et réussi (exporté par la suite dans AERA, NenuFAR)
- Une électronique modulaire (une carte=une fonction), embarquée et « upgradable » : Alim., GPS, Trigger, Comm., ADC, PC...
- Auto-pollution radio contenue = châssis+caisson CEM
- Un réseau d'alimentation + un réseau informatique (10 km de câble et de fibre enterrés) : pas de panneaux voltaïques ni de réseau Wi-Fi à gérer (problème commun à tous les systèmes)
- Un trigger de premier niveau analogique (direction orthogonale à AERA). Pas de numérisation en continue : un budget énergie contenu (~20W par station)



Amplificateur bas bruit 2 voies intégré dans la tête de l'antenne

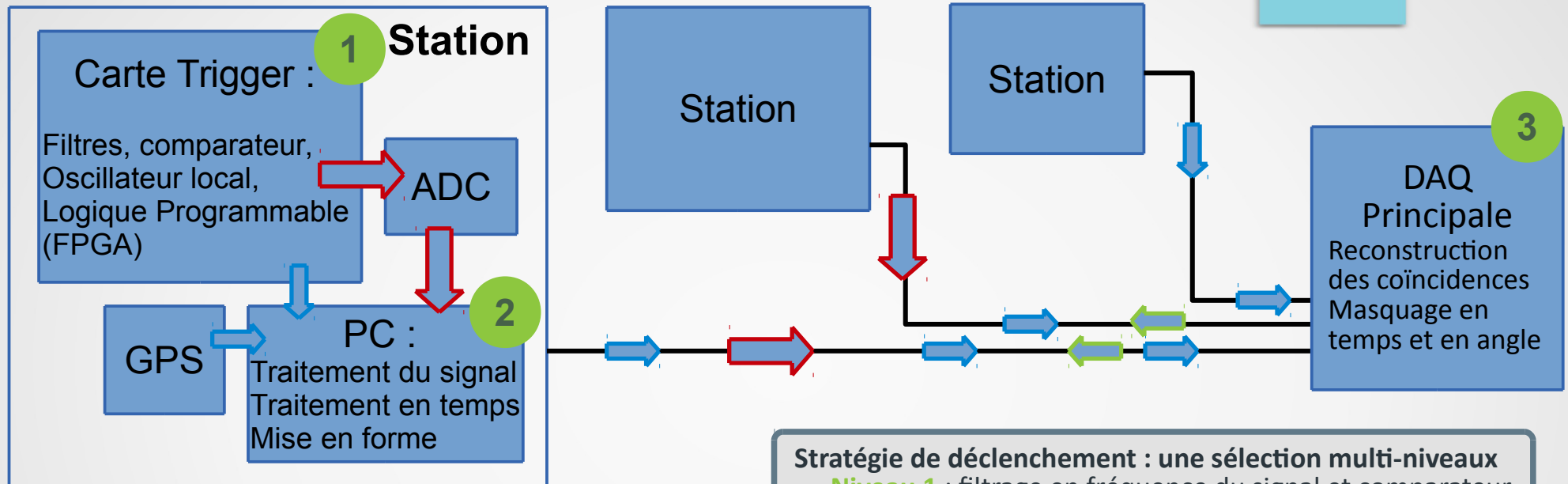


Une double barrière CEM : châssis et caisson



10 km de tranchées et de caniveaux le long des chemins et routes

Un système de déclenchements étagés



➡ Transmission d'événement

➡ Transmission d'en-tête

← Requête d'événement

Stratégie de déclenchement : une sélection multi-niveaux

- **Niveau 1** : filtrage en fréquence du signal et comparateur analogique à seuil sur une carte dédiée.
- **Niveau 2** : discrimination sur la forme d'onde et sur le temps du signal sur le PC embarqué.
- **Niveau 3** : coïncidence en temps entre stations et reconstruction angulaire sur le PC maître

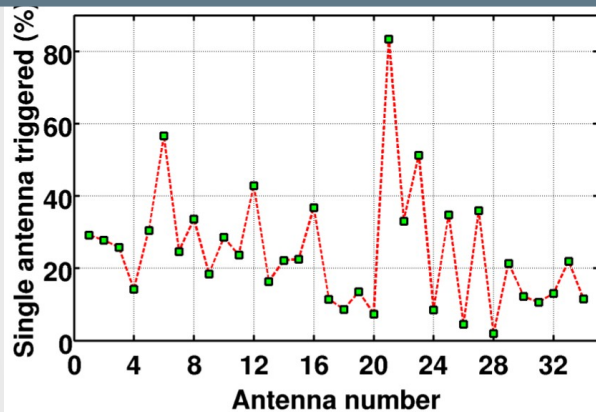
Schéma de sauvegarde des données

- Après un L1 : tout l'événement est sauvé localement
- Après un L2 : l'en-tête de l'evt est envoyé par la station
- Après un L3 : tous les événements concernés par la coïncidence sont requis (DAQ) et envoyés par les stations

Le format de données a été développé et adopté pour le prototype AERA (AUGER). Les données sont sauvegardées dans une base Firebird pour la surveillance, le traitement et l'archivage.

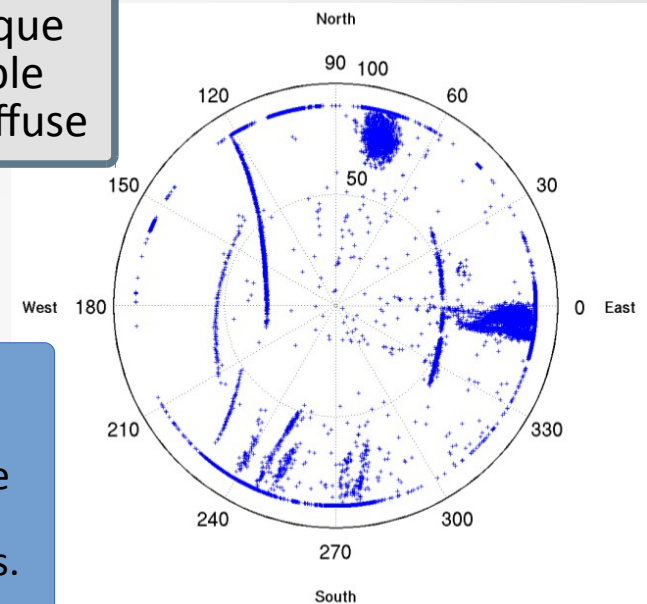
Le ciel « transitoires » : un nouveau monde

Une part importante des événements ne concernent qu'une station : sources de bruit très locales

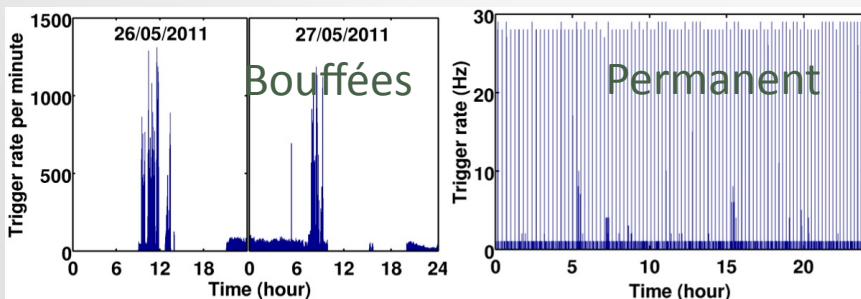


Un jour typique : mobile vs statique intense vs faible ponctuelle vs diffuse

Malgré une réglementation sévère en terme de pollution RF, la station de radio astronomie de Nançay est entourée de sources parasites transitoires très variées.



Signaux permanents ou bouffées périodiques : identité des sources

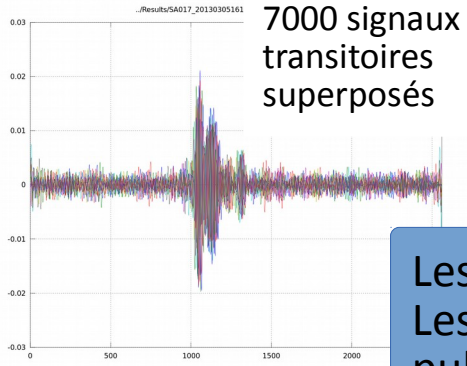


Une large fraction des sources de transitoires radio ont été identifiées, caractérisées et localisées.

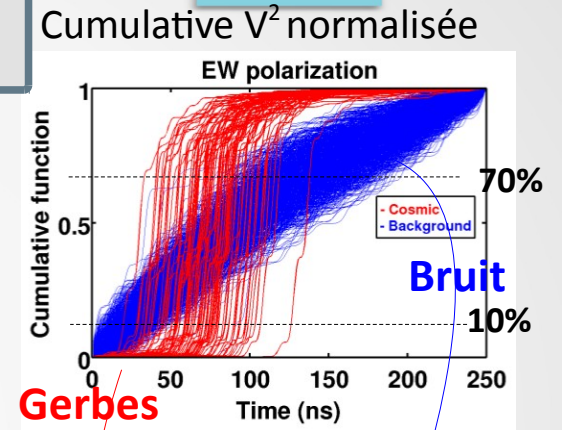
Stratégie adoptée : on ne cherche pas à les éteindre mais à rendre les stations immunes à leur émission.

Des outils de réjection/sélection

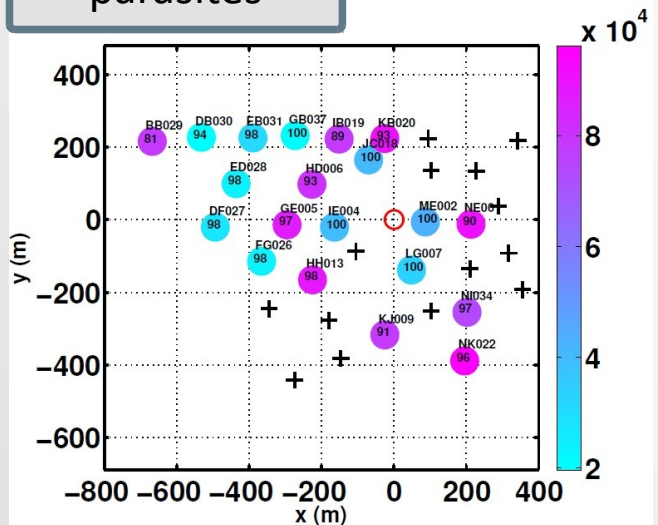
Sélection en forme d'onde



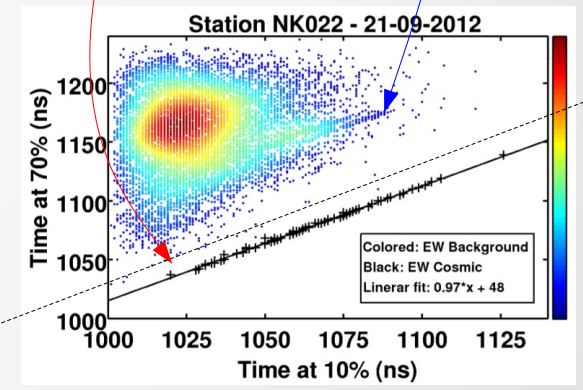
Les signaux gerbes/bruits sont courts/longs
 Les signaux de bruit sont similaires, avec des pulses secondaires et souvent périodiques
Sélection en forme d'onde, en énergie et en périodicité



Réjection des parasites



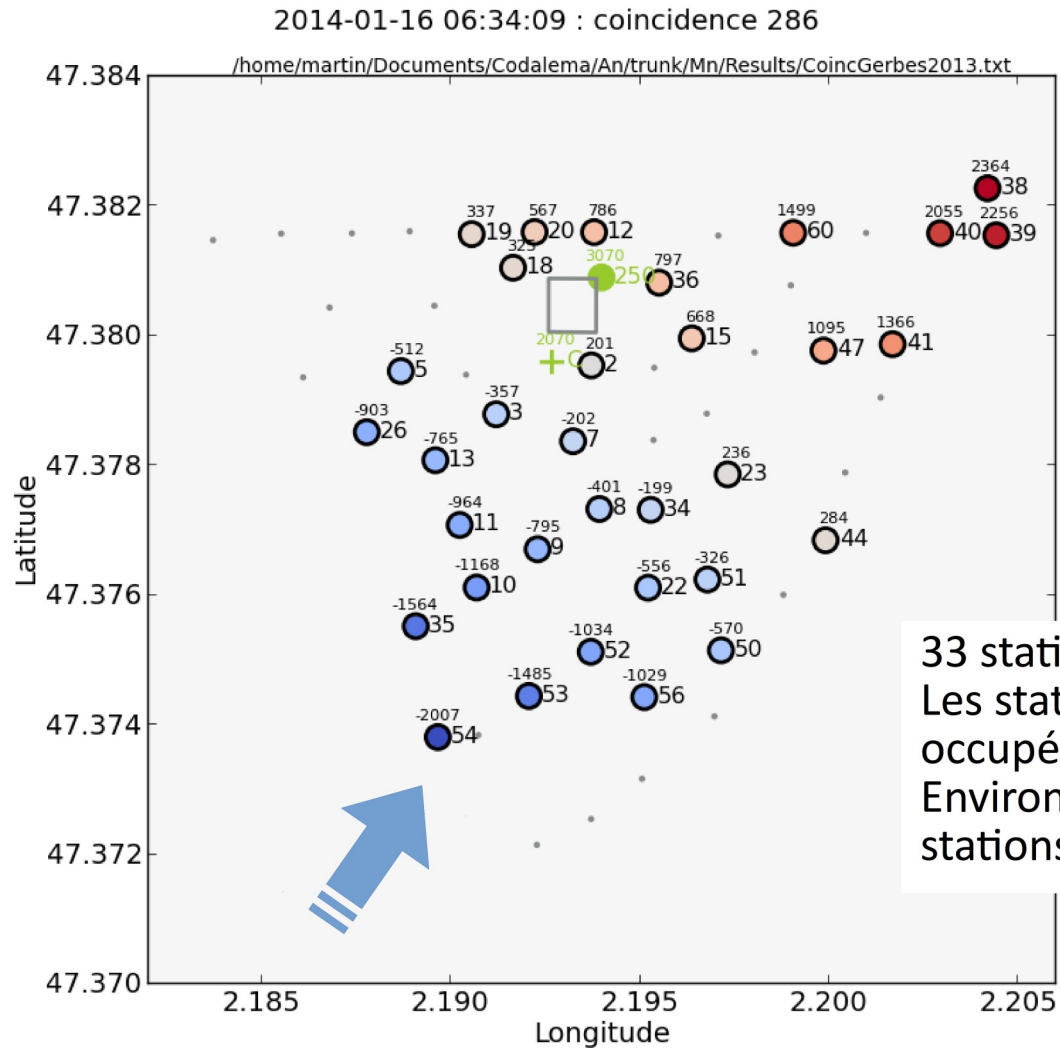
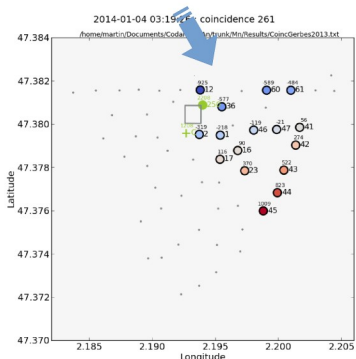
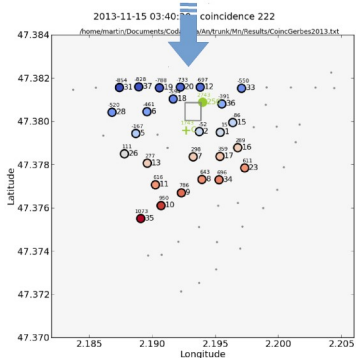
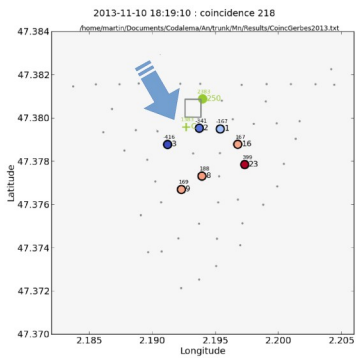
Réjection au dessus de la ligne d'accumulation des signaux gerbes



Des stations et un réseau perfectibles mais fonctionnels
 Des données gerbes mesurées de façon stable depuis environ un an

Taux de réjection : 94.2 % (T2)
 Implémentation au niveau T1
 Optimisation aux niveaux T2 et T3

Des événements gerbes



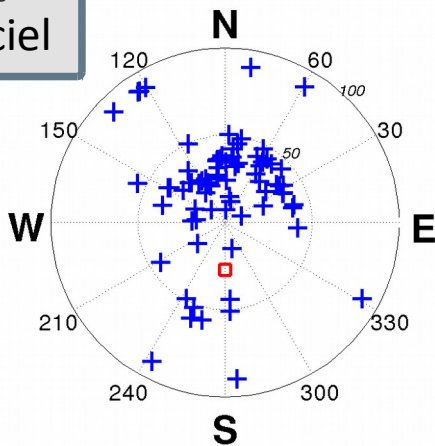
33 stations ont vu la gerbe.
 Les stations absentes étaient occupées (parasites).
 Environ 1.5 km entre les stations les plus éloignées.

Analyse des gerbes atmosphériques

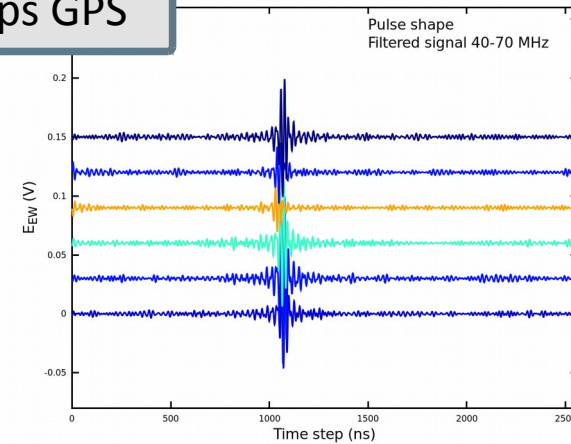
Les gerbes sont identifiées sans ambiguïté

- Forme d'onde et signature spectrale
- Consistance des temps GPS
- Direction d'arrivée au dessus de l'horizon
- Coïncidence temporelle et angulaire avec le réseau de scintillateurs
- Les propriétés connues apparaissent clairement : anisotropie des directions d'arrivée, distribution latéral du champ électrique

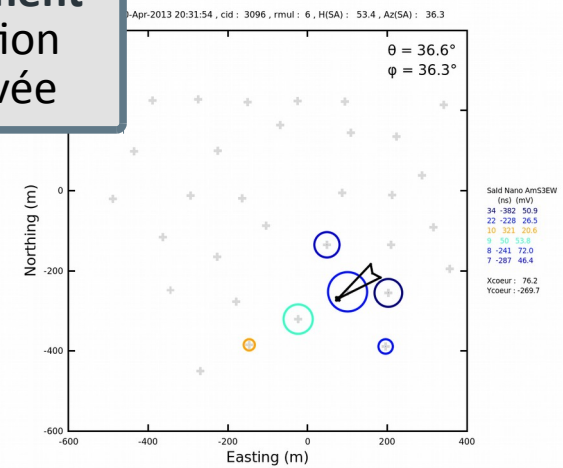
Dataset Carte du ciel



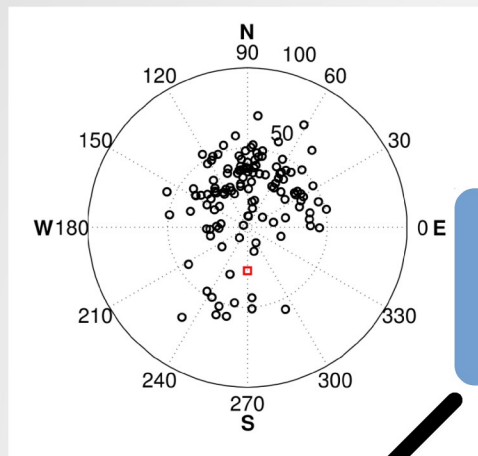
Station Temps GPS



Événement Direction d'arrivée



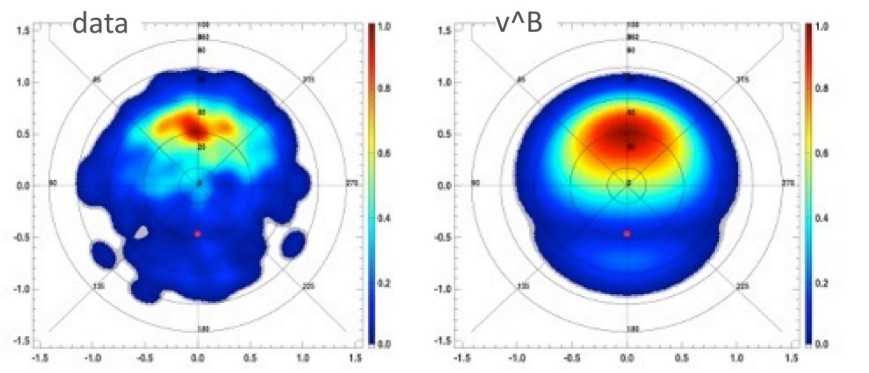
Mesurer les propriétés des gerbes



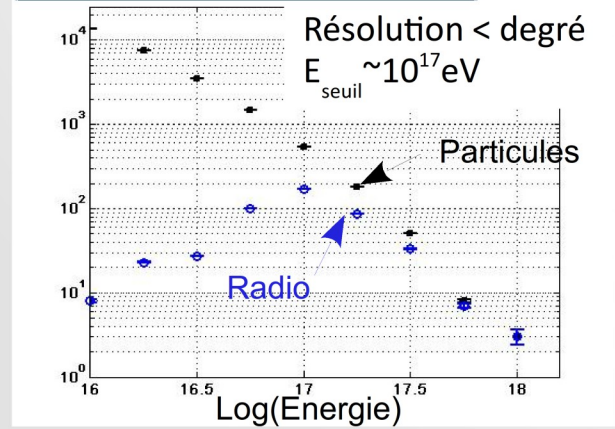
Temps et directions d'arrivée

Mécanismes de production du signal radio

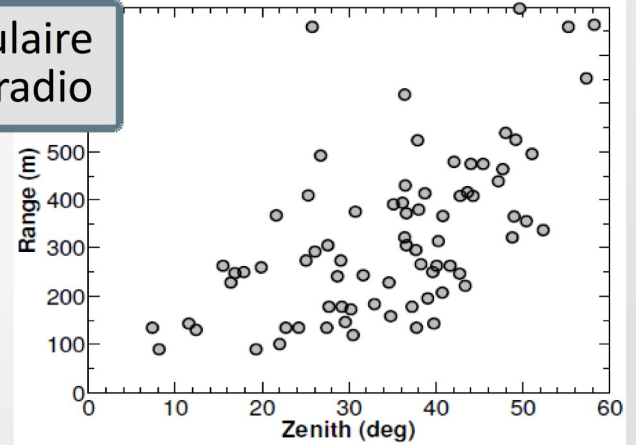
Le champ géomagnétique est l'acteur majeur !



Résolution angulaire
Seuil et efficacité de détection



Acceptance angulaire
« Portée » de la radio

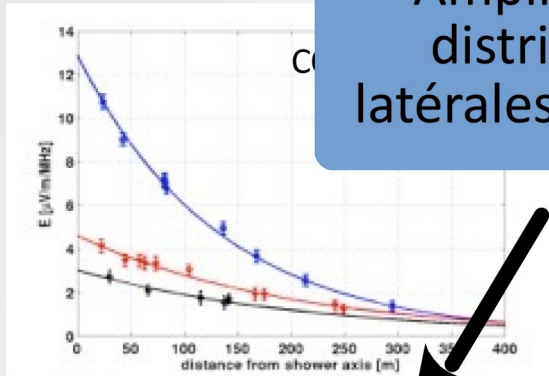


Courbure du front d'onde :
sphérique, parabolique,
conique ?
Lien avec le point
d'émission max ?

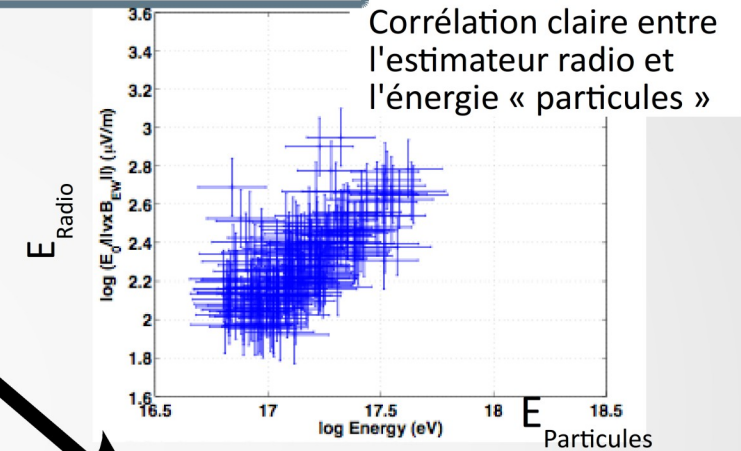
On voit à plusieurs centaines de m.
On voit les gerbes inclinées

Mesurer les propriétés des gerbes

Amplitudes et distributions latérales du champ

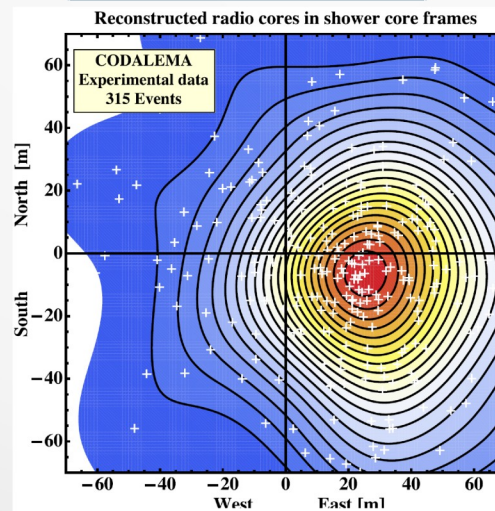


Estimateur d'énergie



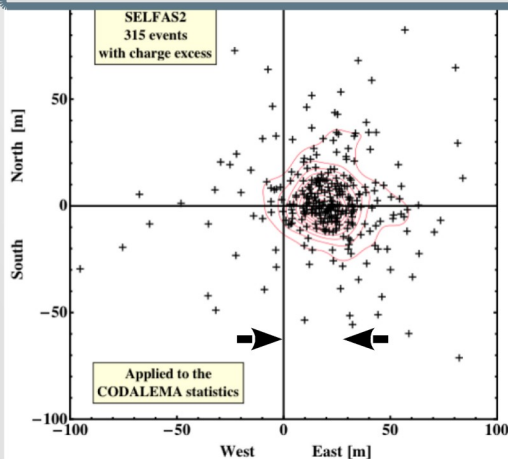
Corrélation claire entre l'estimateur radio et l'énergie « particules »

Position des cœurs de gerbe



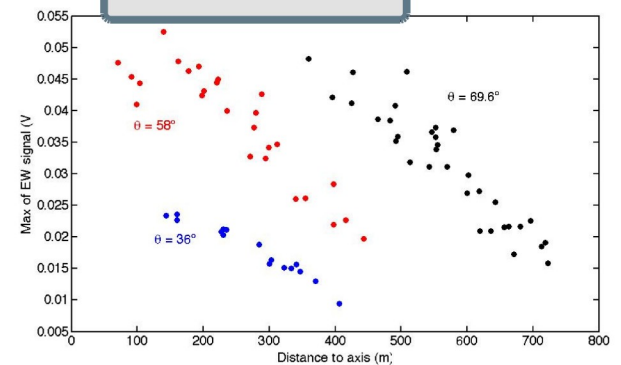
Le pied de gerbes radio est corrélé au cœur « particules »

Mécanismes de production du signal radio



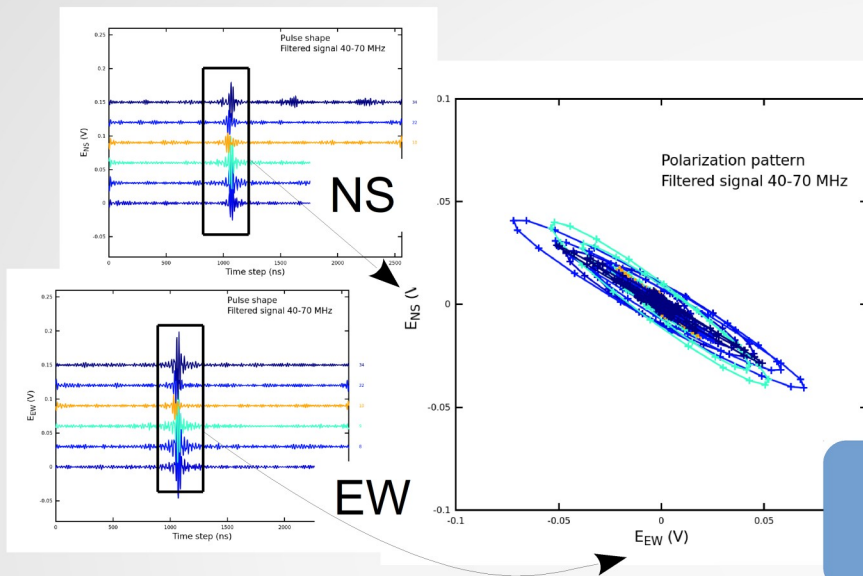
L'excès de charge explique un décalage systématique de 20m

Forme des distributions latérales

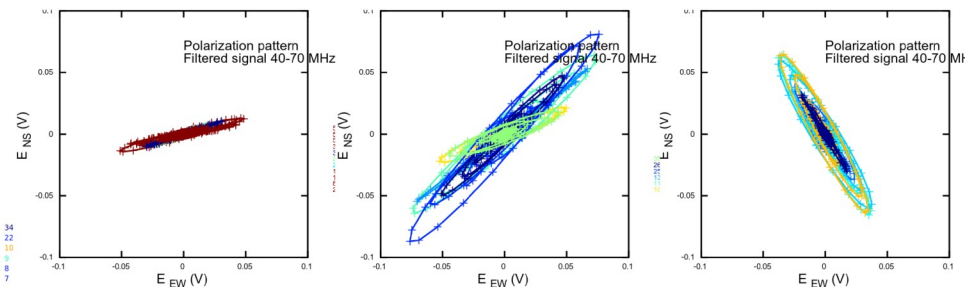


Les distributions latérales sont chahutées : figures au sol complexes et donc riches

Au delà des propriétés de base : polarisation



Les signaux radio sont fortement polarisés !



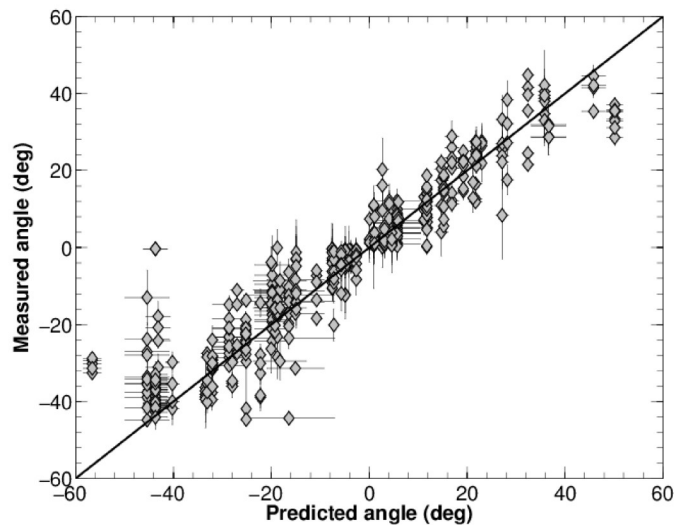
Amplitudes et polarisation

Analyse en paramètres de Stokes : pour chaque événement et chaque antenne

$$Q = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (E_{EW,i}^2 - E_{NS,i}^2)$$

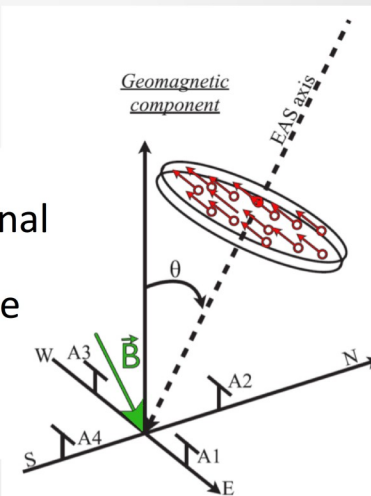
$$U = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n (E_{EW,i} E_{NS,i})$$

$$\psi_{meas.} = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{U}{Q} \right)$$



Courant transverse : la polarisation du signal est donnée par la géométrie de la gerbe

$$\psi_{Pred.} = \tan^{-1} \left(\frac{(\vec{v} \times \vec{B})_{NS}}{(\vec{v} \times \vec{B})_{EW}} \right)$$

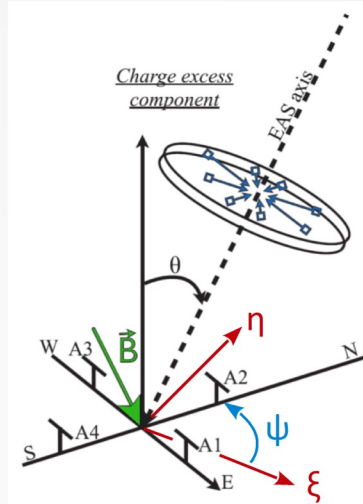
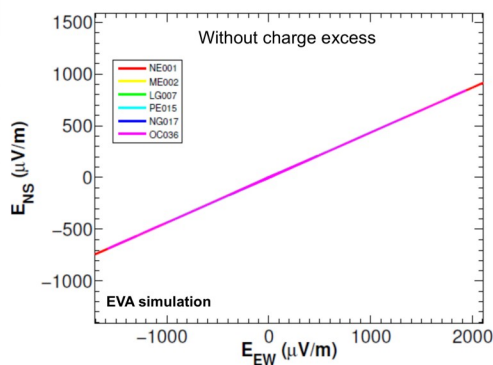
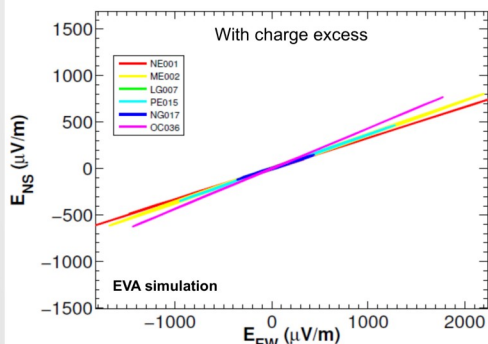
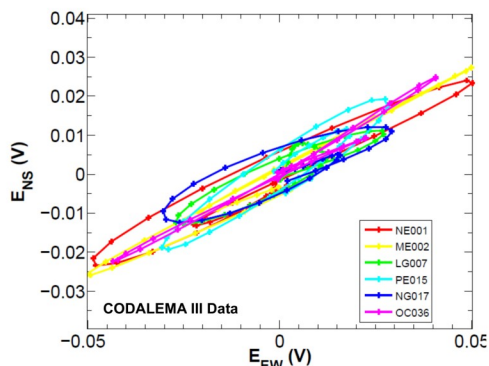


Corrélation forte avec l'angle prédit
Direction d'arrivée ↔ Polarisation !
Discrimination Gerbe – Parasite !

Au delà des propriétés de base : polarisation

Amplitudes et polarisation

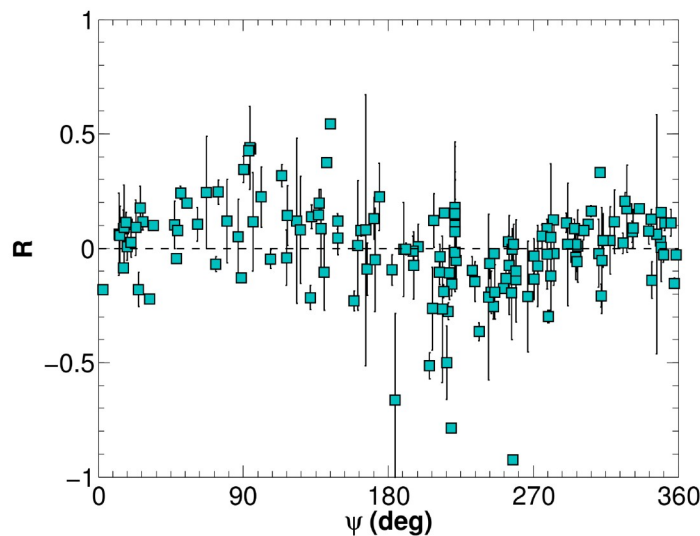
Événement par événement : les angles de polarisation sont systématiquement dispersés autour de la valeur moyenne.



On exprime la polarisation dans un repère (ξ, η) propre à chaque gerbe (on supprime la contribution du courant transverse) :

$$R(\psi) = \frac{2 \sum_{i=1}^n (E_{\xi,i} E_{\eta,i})}{\sum_{i=1}^n (E_{\xi,i}^2 + E_{\eta,i}^2)}$$

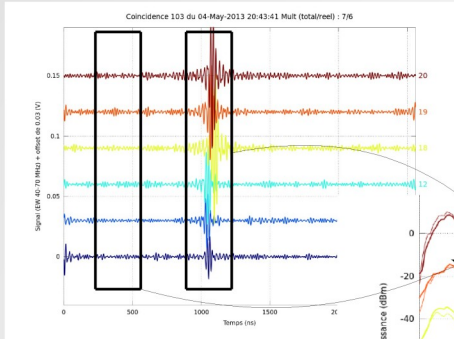
Une contribution radiale apparaît par un sinus !



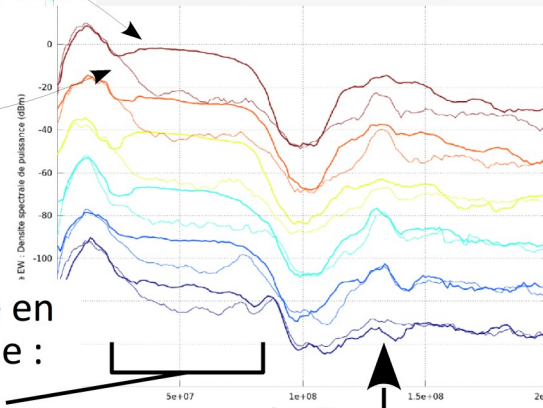
Oscillation dans la distribution expérimentale = excès de charge

Position du pied de gerbe \leftrightarrow dispersion de la polarisation !
Localisation de la gerbe à partir des valeurs de polarisation

Au delà des propriétés de base : fréquence

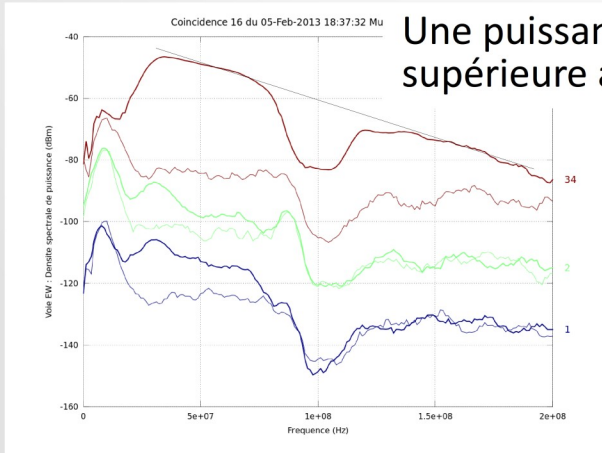


Contenu fréquentiel



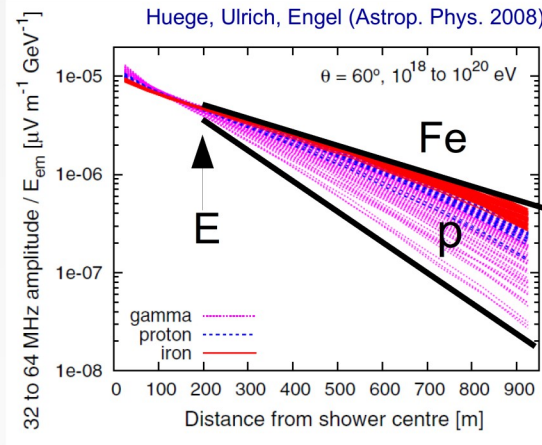
Un contenu variable en fonction de l'antenne : variation avec la distance à la gerbe !

Une contribution HF !

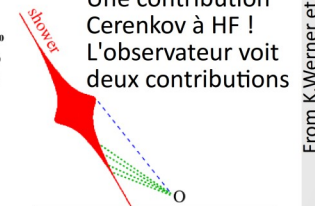
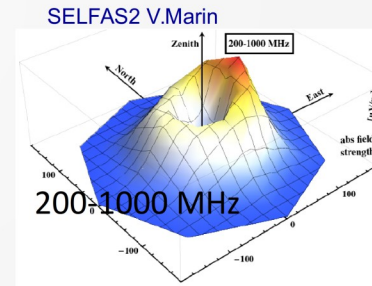
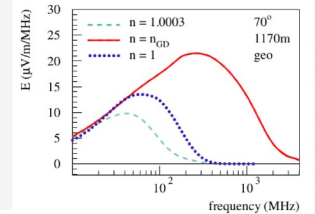


Une puissance bien supérieure aux AM !

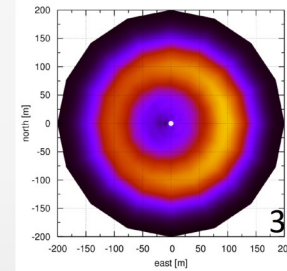
Fréquence : Informations de position, énergie et masse
Il faut une antenne large bande, sensible et maîtrisée
 Travail en cours !



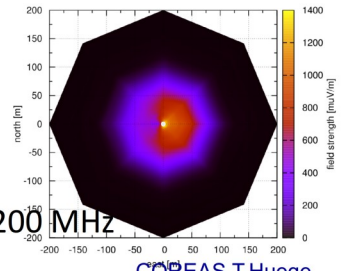
Rapport (E_{f1} / E_{f2}) :
 Mesure de l'énergie
 Discrimination en masse



vertical iron 10^{17} eV



vertical proton 10^{17} eV

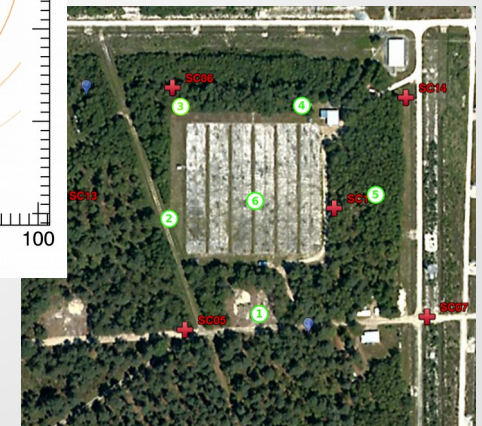
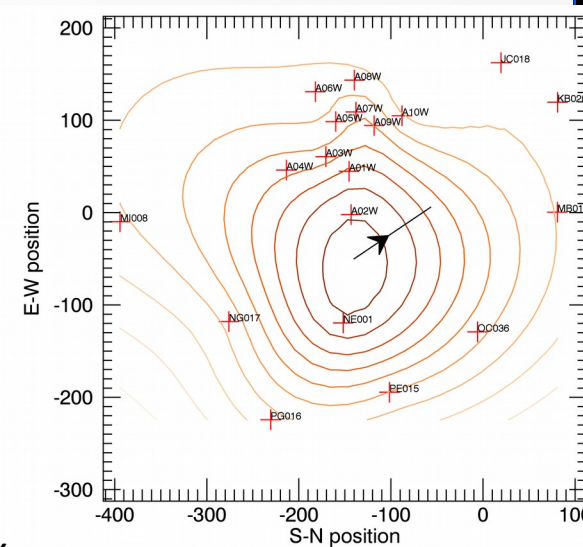
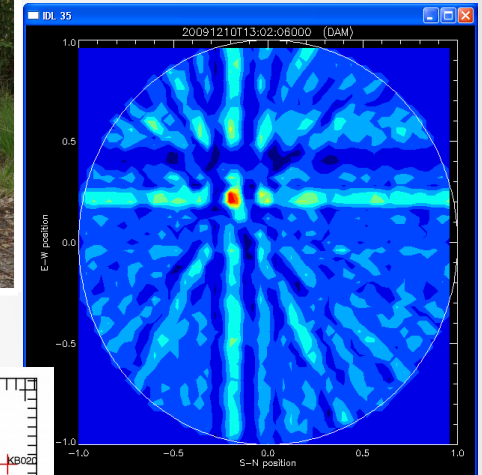


COREAS T.Huege

L'effet Cerenkov induit des contributions HF discriminantes !

Réseau compact et trigger composite

- Analyse de la radio détection au seuil (validation par les scintillateurs)
- Étude des variations du champ radio électrique sur de petites distances
- Mise au point d'un signal de déclenchement « gerbes » temps réel.
 - Utilisation du réseau compacte ou installation de 6 antennes LWA autour du DAM (polarisations mixées)
 - Reconstruction temps réel de la direction d'arrivée (pavage de l'espace des phases)
 - Cartes numérisation + GPU + CPU
- Intérêts :
 - Efficacité accrue aux limites (distance, énergie)
 - Masquage des sources de parasites
 - Signal transmissible aux stations et réseaux voisins \leftrightarrow trigger régional



Une technique en progression

La mesure des rayons cosmiques

| Observables | Méthodes |
|---------------------|---|
| Direction d'arrivée | Timing entre antennes Angles de polarisation |
| Cœur de la gerbe | Profil du champ électrique Angles de polarisation |
| Énergie | Profil latéral du champ Analyse multi-fréquences |
| Nature, Xmax | Courbure du « front » radio Profil latéral du champ Profil longitudinal vs forme d'onde Distribution 2D du champ Contribution Cerenkov Analyse multi-fréquences |

Une instrumentation adaptée

| Propriétés | Force/Faiblesse |
|---------------------|---|
| Acceptance | Couverture aux grands angles Portée à accroître – Mesures aux BF |
| Cycle utile | Pas de dépendance aux conditions météo (orages ?) Sélection/réjection efficace contre les transitoires parasites Optimisation du T1 analogique |
| Sensibilité | Optimale : variations galactiques Optimiser les mesures en BF (qlq MHz) et en HF (100-300 MHz) |
| Robustesse Usage | Capteur mécanique Encombrement faible Pas de fluide Pas d'étanchéité à la lumière Déploiement aisé |
| Coût | Capteur peu onéreux (LNA). Budget énergétique contrôlé. Chaîne d'acquisition « standard » à optimiser Intégration/Miniaturisation à travailler |

Conclusions

- CODALEMA est un ensemble d'instruments fonctionnels et performants : on poursuit les optimisations mais pas d'investissement matériel important (en coût et manpower) à venir.
- Une prise de données de qualité assurée pour les prochaines années.
- Des possibilités indéniables de nouveaux développements pour caractériser les capacités de la radio-détection :
 - Mesures des trois polarisations
 - Mesures à des fréquences différentes
 - Caractérisation des gerbes avec peu de capteurs
 - Optimisation de la sensibilité (portée, sélectivité)
- Un programme établi pour 4 ans : EXTASIS (B.Revenu)
- Une complémentarité et une contribution forte dans AUGER : AERA (R.Dallier)
- Des liens à développer avec les radio-astronomes à Nançay.

