

Radio-Détection des Rayons Cosmiques de Haute Énergie dans l'expérience CODALEMA



Diego Torres Machado

05/12/2011



JRJC



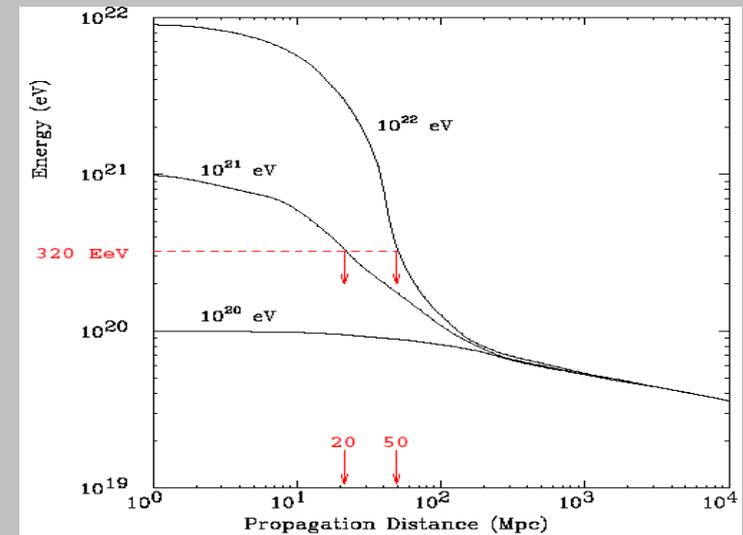
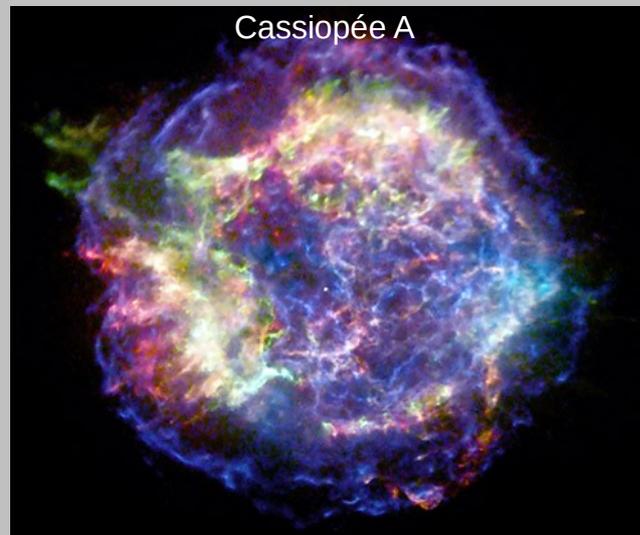
1

Plan

- Pourquoi étudier les rayons cosmiques ?
- Pourquoi la radio-détection ?
- L'expérience CODALEMA
- Une nouvelle génération d'antennes
- L'étude des sources parasites

Les enjeux scientifiques

- ✓ Messagers des événements les plus énergétiques de l'univers (AGN, GRB...)
- ✓ Accès à des informations sur le milieu traversé (ρ , champ B)
- ✓ Connaissance des processus de nucléosynthèse et datation des objets astrophysiques
- ✓ Existence d'une coupure GZK ? Sinon des nouvelles particules encore inconnues (Top-Down) ?



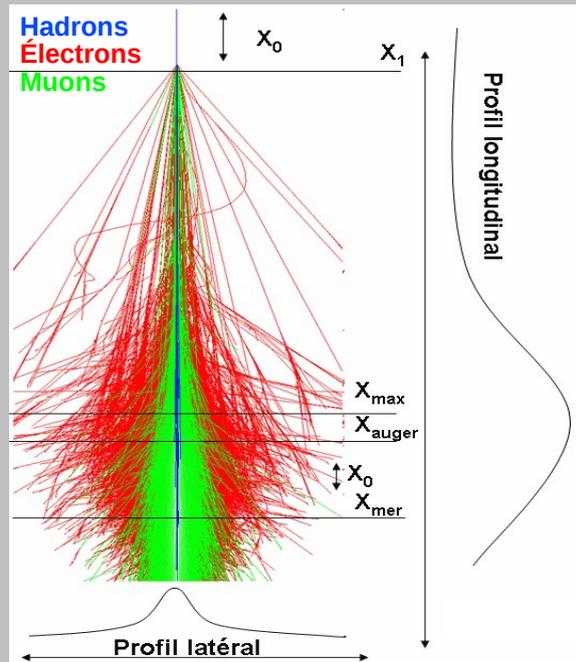
**Ou est-ce la limite
d'accélération des
sources ??**

- ✓ Spectre à ultra haute énergie ($>10^{19}$ eV)

Pourquoi la radio-détection ?

Techniques de détection

Simulation d'une gerbe



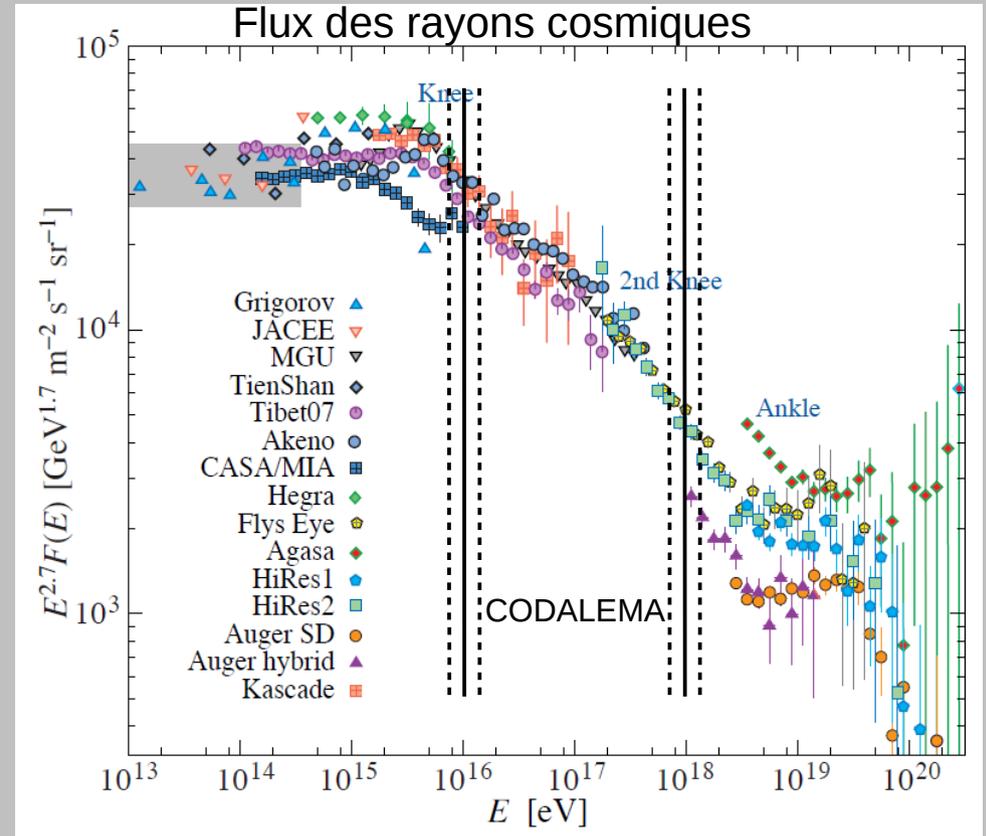
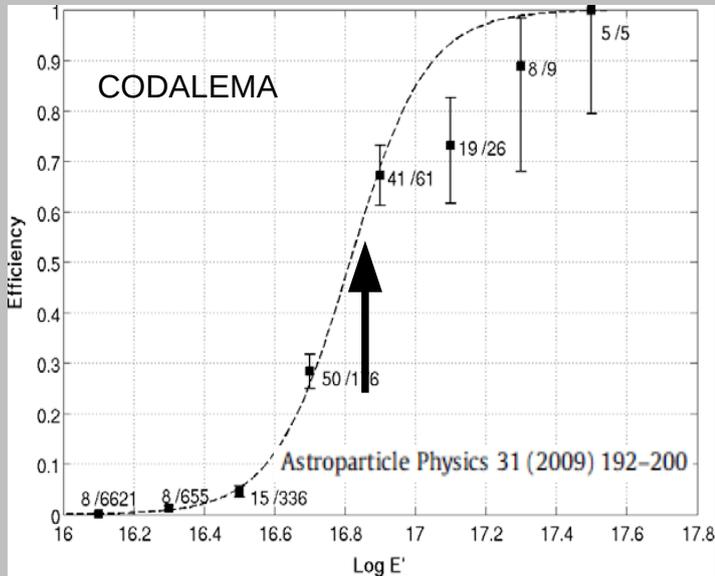
But : direction, énergie et nature du RC primaire

	Observable	Avantages	Désavantages
Détecteur de surface	<ul style="list-style-type: none"> Nombre de particules <p>↓</p> Profil latéral	<ul style="list-style-type: none"> Cycle utile de 100% Mesure directe du nombre de particules de la gerbe 	<ul style="list-style-type: none"> Modèle dépendant (pour déterminer E)
Télescopes de fluorescence	<ul style="list-style-type: none"> Fluorescence de l'azote <p>↓</p> Profil longitudinal (x_{max})	<ul style="list-style-type: none"> Développement de la gerbe en 3D Sensibilité à des dizaines de km 	<ul style="list-style-type: none"> Faible cycle utile (~10%)
Radio-détection	<ul style="list-style-type: none"> Champ radio crée par les particules chargées <p>↓</p> Profil latéral du champ ϵ	<ul style="list-style-type: none"> Cycle utile ~ 100% Coût de l'antenne Acceptance aux gerbes inclinées 	<ul style="list-style-type: none"> Sensibilité aux interférences radio électriques

Pourquoi la radio-détection ?

Observation entre 10^{16} et 10^{18} eV

Efficacité de radio-détection

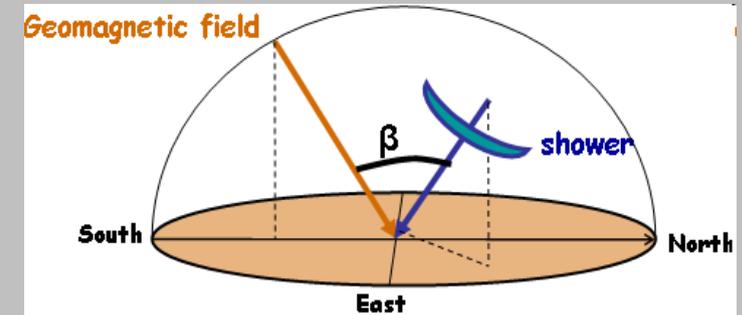


- Peupler la région entre les genoux
- Énergie du primaire fixée par la surface de détection.
A 10^{20} eV : 1 particule par km^2 et par siècle !
- Pas de « pointage » possible vers la source :
A ces énergies (autour de 10^{17} eV): $R_{\text{Larmor}} < \text{Taille de la galaxie}$ → les directions d'arrivée sont isotropisées

Pourquoi la radio-détection ?

Les mécanismes de production du signal radio électrique

- Terme coulombien
- Excès de charges (Askar'yan, 1962)
- Effet géomagnétique (Kahn and Lerche, 1965)
 - Courant transverse

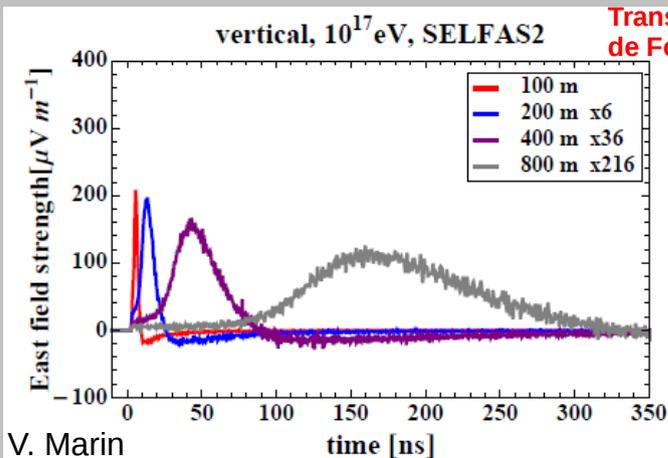


$$E(x, t) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left\{ \left[\frac{nq(t_{ret})}{R^2(1 - \beta \cdot n)} \right]_{ret} + \frac{1}{c} \frac{\partial}{\partial t} \left[\frac{nq(t_{ret})}{R(1 - \beta \cdot n)} \right]_{ret} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial}{\partial t} \left[\frac{vq(t_{ret})}{R(1 - \beta \cdot n)}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

Coulomb

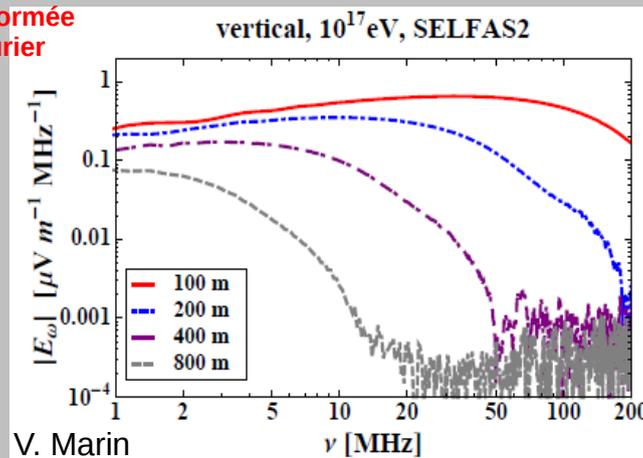
Excès de charge

Courant transverse



V. Marin

05/12/2011



V. Marin

JRJC

- Champ ϵ de quelques centaines de $\mu\text{V/m}$
- Des transitoires rapides ($< \mu\text{s}$)
- 1 – 100 MHz (ondes déca-métriques)

Pourquoi la radio-détection ?

Informations contenues dans le signal radio

- ✓ **Polarisation** → La plupart des modèles prédisent une polarisation selon $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$
- ✓ **Amplitude du signal** → Devrait être reliée au nombre de particules dans la gerbe, et donc à l'**énergie** du primaire (dépend du degré la cohérence)

Allan et al : $\varepsilon (\mu V / m / MHz) = cte. \left(\frac{E_p}{10^{17}} \right) . \sin \alpha . \cos \theta . e^{-\frac{d}{d_0(\mu, \theta)}}$ + correction du lobe de l'antenne

- ✓ **Durée du signal** → Paramètre d'impact d

Nouvelles pistes:

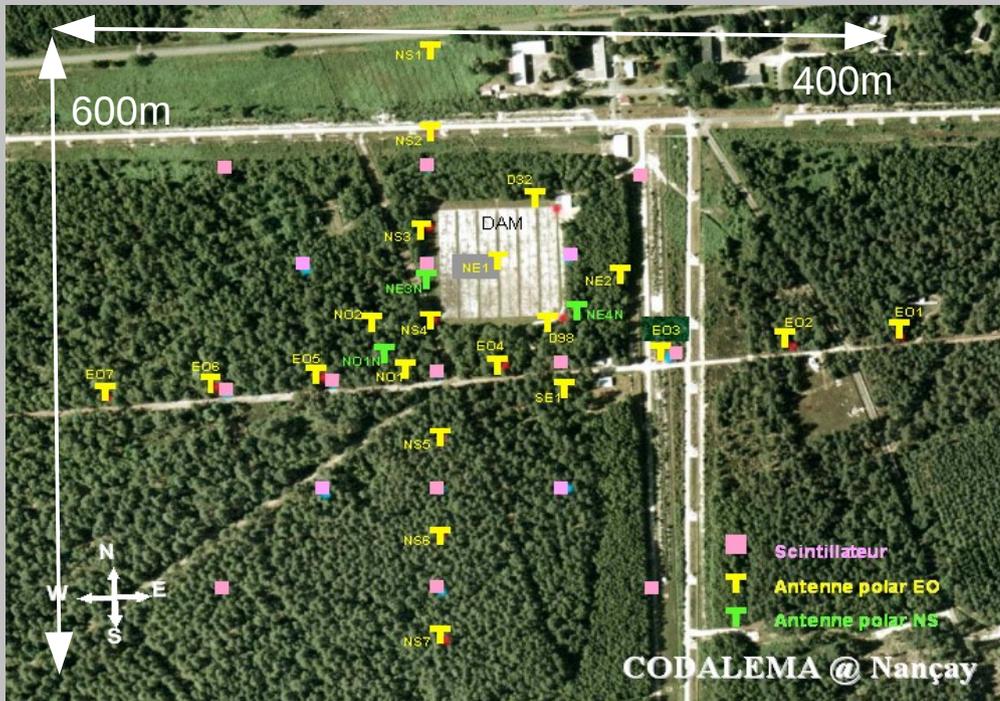
- ✓ **Étude du front d'onde** → position du X_{\max} → profil longitudinal → **nature** du RC



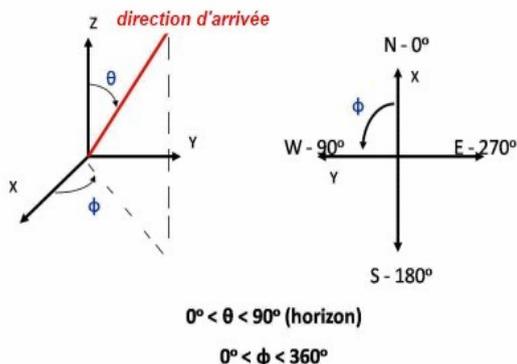
Mais : $X_{\max} < 350 \text{g.cm}^{-2}$ (15km); excellente précision en temps et en position des antennes exigée (A. Rebai)

L'expérience CODALEMA

Station de Radioastronomie de Nançay
Observatoire Paris-Meudon



- Réseau d'antennes dipôles
 - 21 antennes en polarisation EW
 - 3 antennes en polarisation NS
 - 23-83 MHz
 - Sensible au signal galactique
 - θ et ϕ par triangulation
 - Accès aux profils latéraux du champ : estimateur de E_p



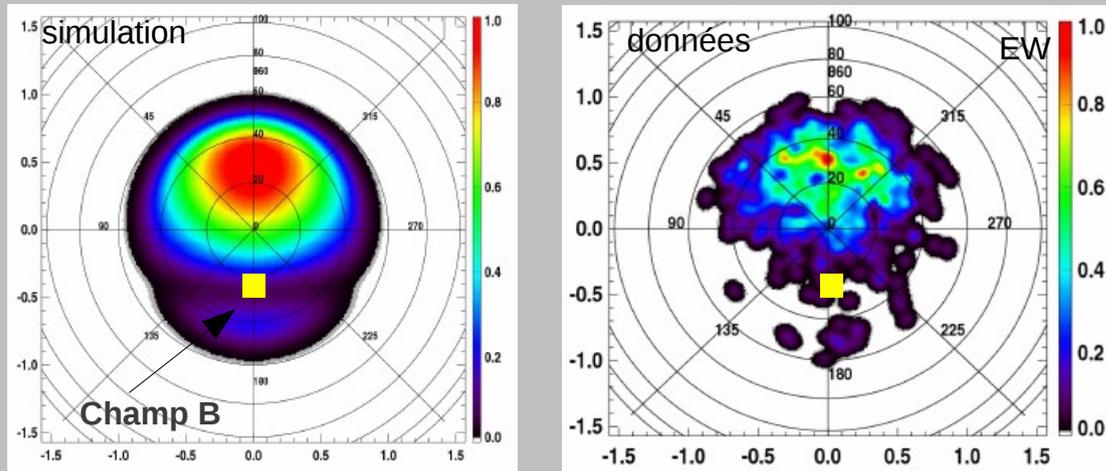
Coïncidence entre les
détecteurs

- Réseau de scintillateurs
 - 17 détecteurs de particules
 - Trigger des antennes
 - Énergie du primaire (modèle dépendant) ; seuil à 10^{15} eV
 - θ, ϕ et cœur de gerbe

L'expérience CODALEMA

Les principaux résultats

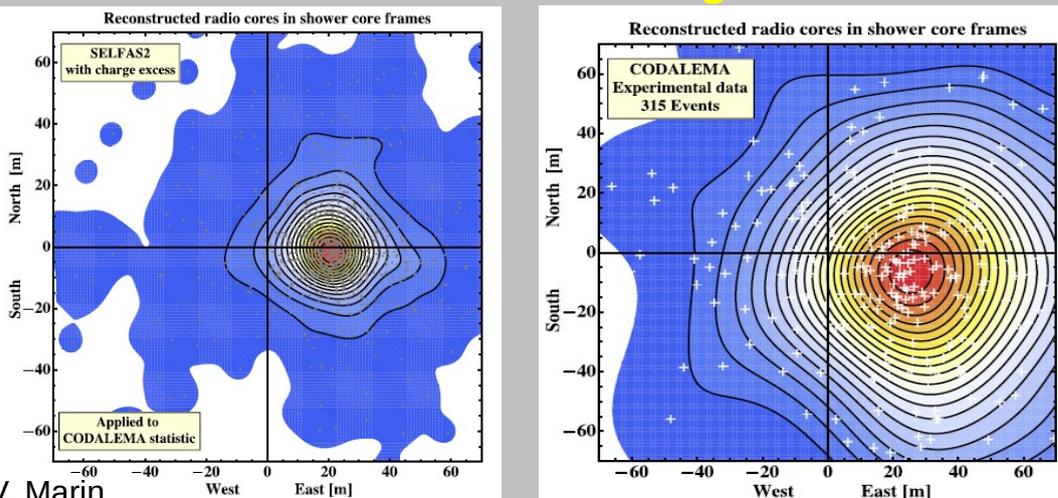
Effet géomagnétique



Asymétrie dans les directions d'arrivée :

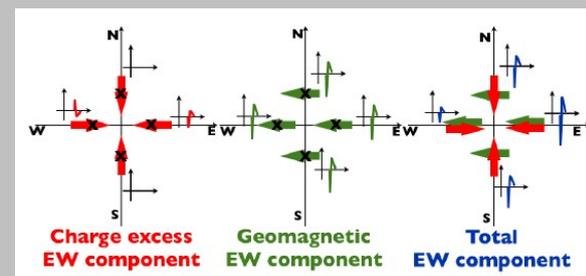
- Champ électrique proportionnel à $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$
- Polarisation linéaire selon $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$
- Accord entre simulation et données pour les 2 polarisations (EW et NS)
- Modèle à affiner

Excès de charge



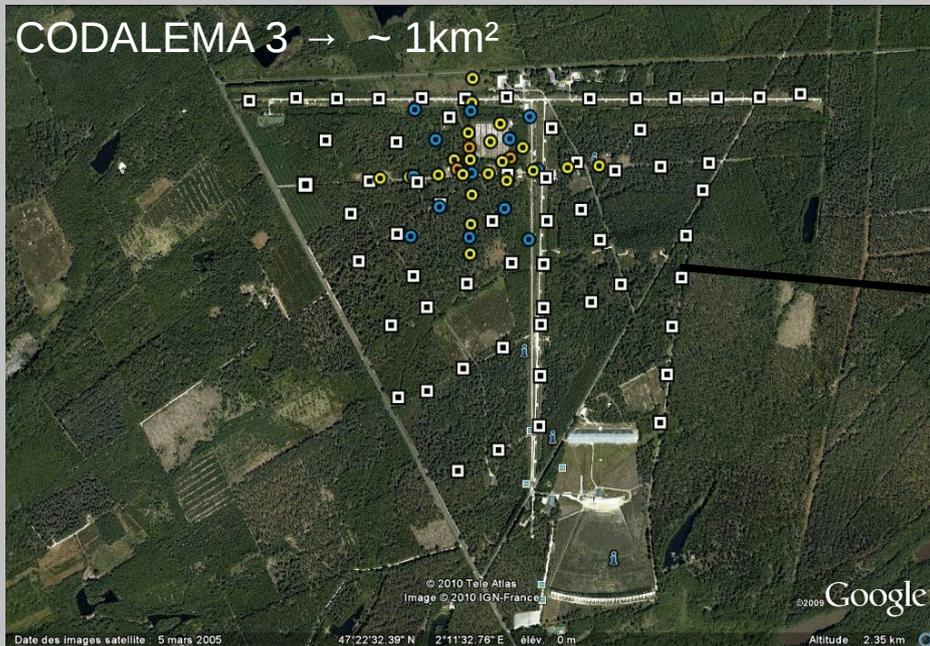
Les cœurs radio et particules ne coïncident pas :

- Interprétation : variation de l'excès de charge
- Besoin de statistique \parallel au champ \mathbf{B} (uniquement excès de charge)
- Sensibilité à l'énergie et à la nature du RC ?



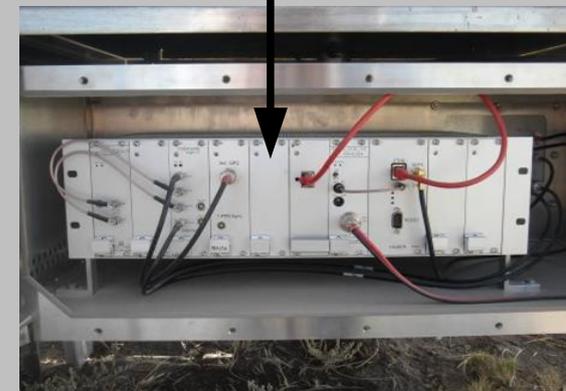
La nouvelle génération d'antennes

CODALEMA 3



Pour l'instant : 34 antennes en fonctionnement → 60 en 2012

- ✓ Augmentation de la taille du réseau :
 - Accès à des énergies supérieures
 - Meilleure estimation du profil latéral
- ✓ Autonomie : trigger radio (45 – 55 MHz) et numérisation « sur place »
- ✓ 2 polarisations horizontales du champ ϵ
- ✓ Plus sensible aux basses fréquences
 - Grand paramètre d'impact
- ✓ Maîtrise du réseau de stations autonomes
 - Préparation d'un réseau géant (Auger)



Étude des sources parasites

Trigger radio :

- Sensibilité aux bandes AM et FM
- Environnement radio parasite

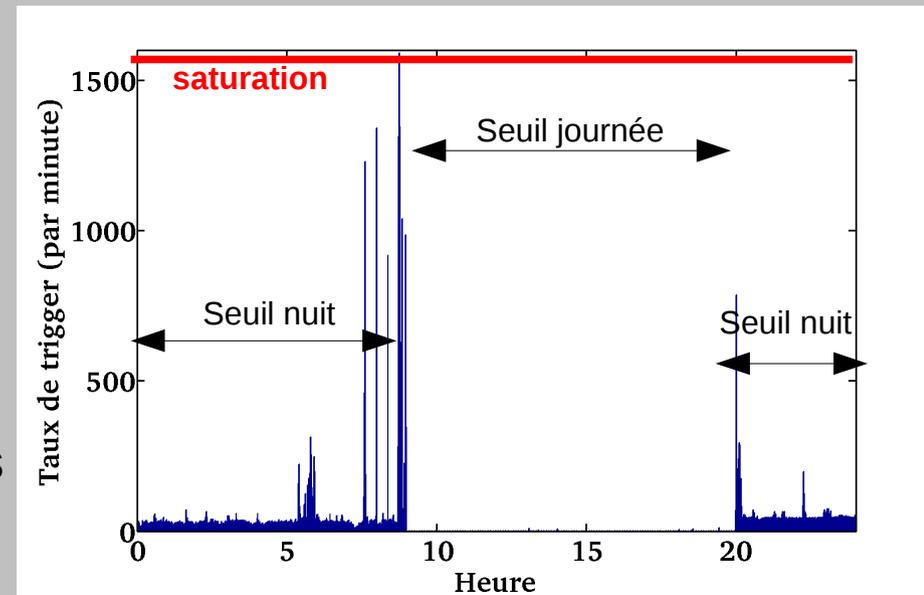
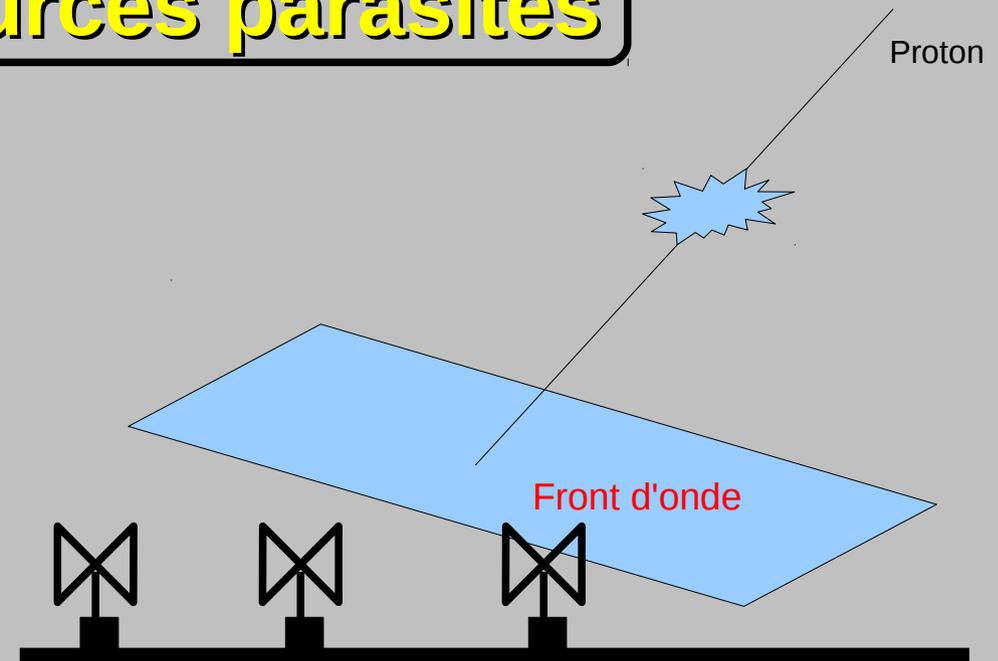
Premiers résultats (sur 53 jours de données)

✓ Plus de 16 millions d'événements

- Saturation des disques de stockage
- Saturation de l'acquisition des antennes
- Augmentation du seuil de détection
- Des sources parasites internes et externes à l'observatoire
- Traces d'avions

✓ Comment les identifier ?

- Coïncidence : au moins 4 stations touchées dans $3.5\mu\text{s}$
- Reconstruction du front d'onde par triangulation



Étude des sources parasites

Fit plan :

- Reconstruction des gerbes, trajectoires des avions
- Fournit la direction d'arrivée au fit sphérique

Fit sphérique :

- Très sensible aux conditions initiales
- Bonne précision exigée sur la datation des événements et position des antennes
- Grande incertitude sur la position des sources à l'horizon

On **minimise** la quantité suivante :

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

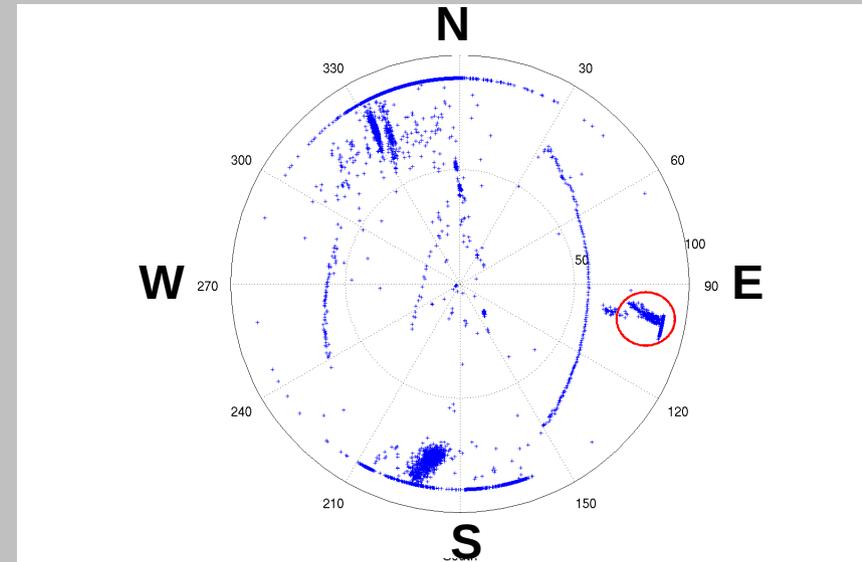
Avec x_0, y_0, z_0, t_0 : coordonnées du point d'émission

Et x_i, y_i, z_i, t_i : temps d'arrivée du transitoire

05/12/2011

JRJC

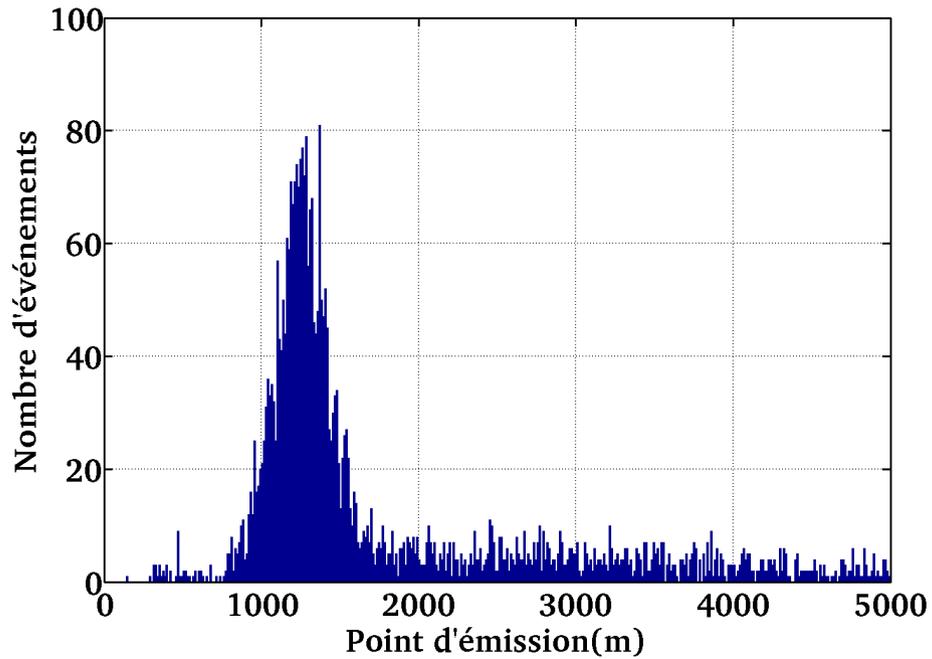
Carte du ciel



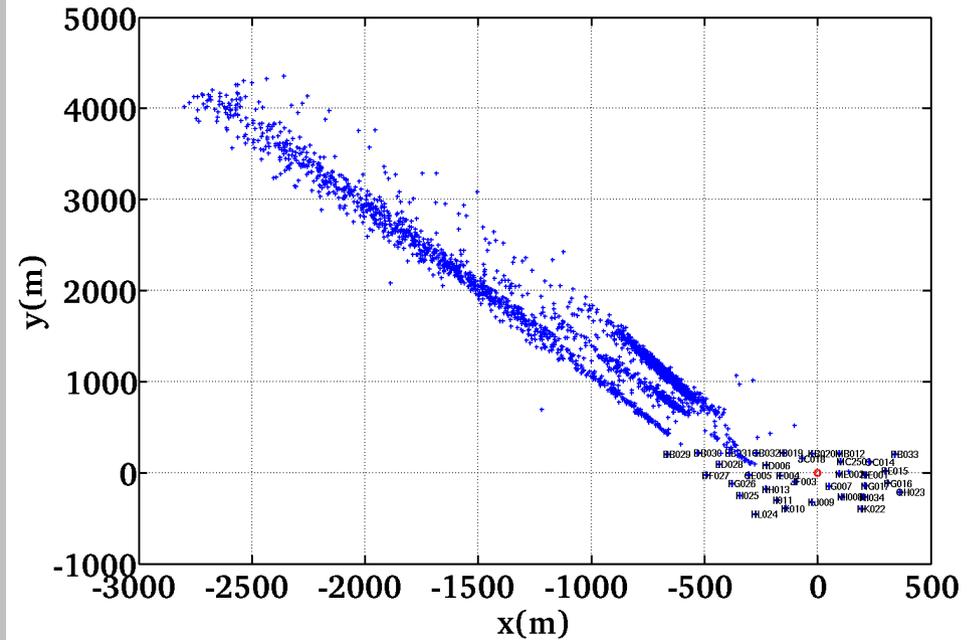
- ✓ Rayon de courbure
- ✓ Direction
- ✓ χ^2 sphérique

Étude des sources parasites

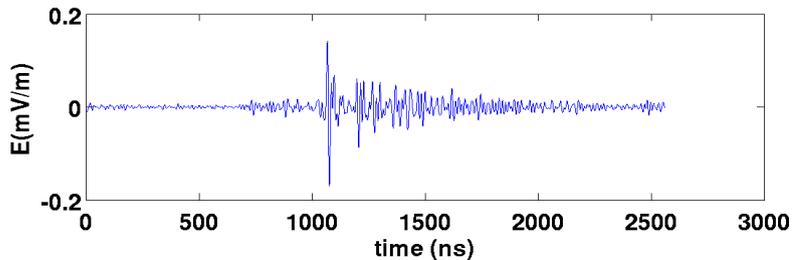
$330 < \phi < 340$



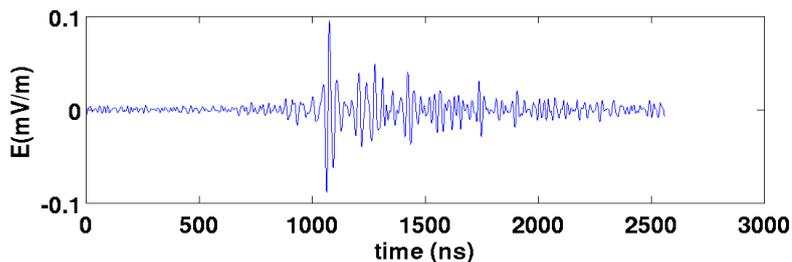
$330 < \phi < 340$



21/06/2011 - GB032 - 36633 - EW - filtré dans 23-83MHz



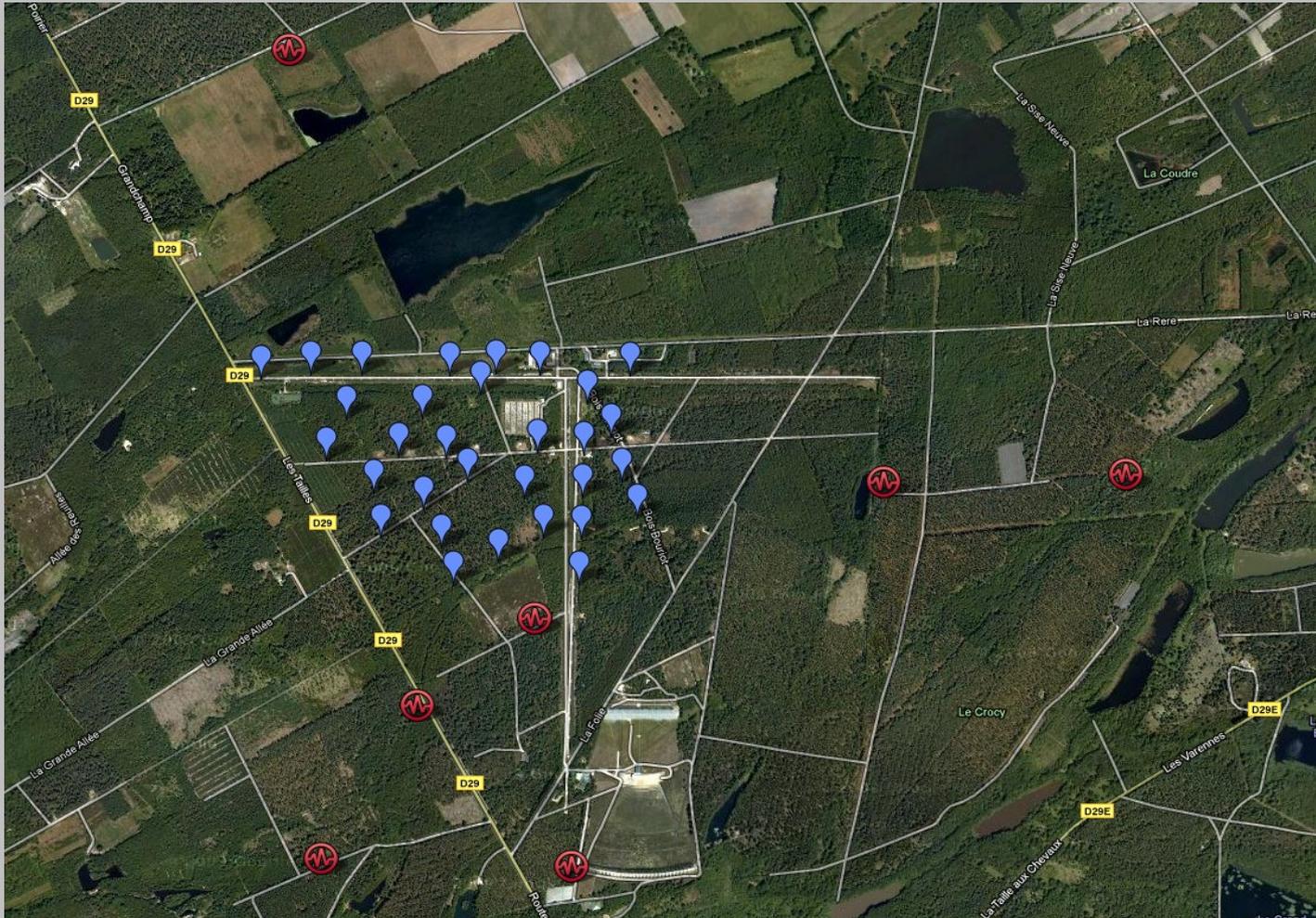
21/06/2011 - GB032 - 36633 - NS - filtré dans 23-83MHz



- ✓ Source qui émet toutes les 1.4s
- ✓ Probablement associée à une clôture électrique
- ✓ Forme d'onde différente d'un « événement gerbe »

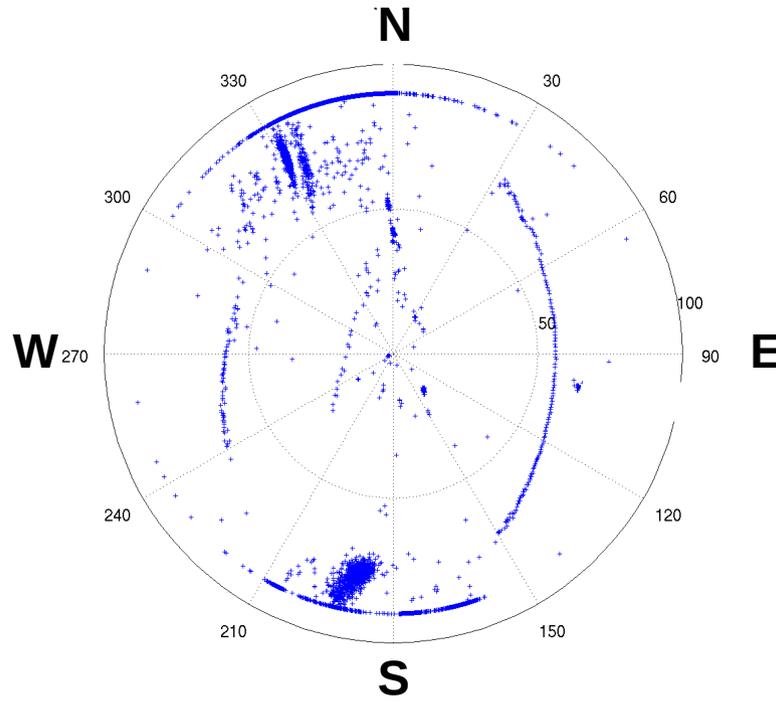
Étude des sources parasites

- ✓ D'autres sources présentes
 - Certaines saturent l'acquisition des données (>25 Hz)
 - Grande multiplicité (souvent >10 antennes touchées)
 - **Mais** : 60% des événements sont vus par une seule antenne



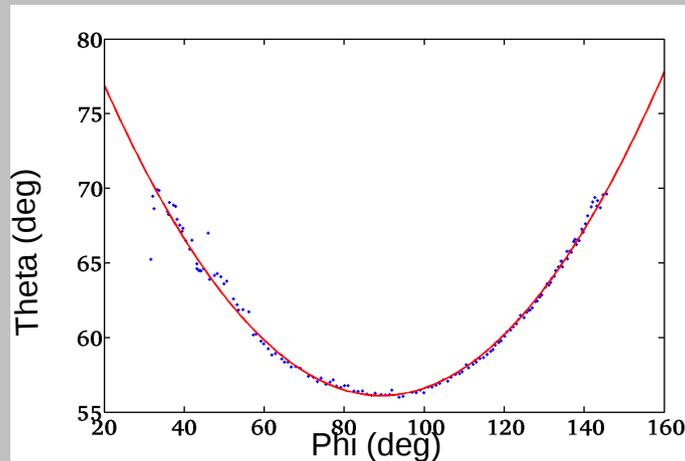
Étude des sources parasites

Les sources mobiles



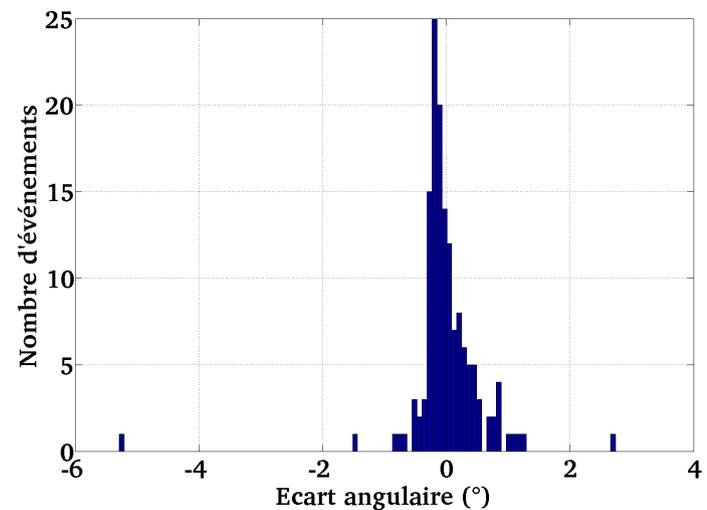
- Des traces d'avions vues quotidiennement
- Grande multiplicité (>10 antennes)
- Durée de passage : environ 2 min
- Estimation de la résolution angulaire des antennes

Résidus : 70% des événements ont une résolution meilleure que 0.34°



05/12/2011

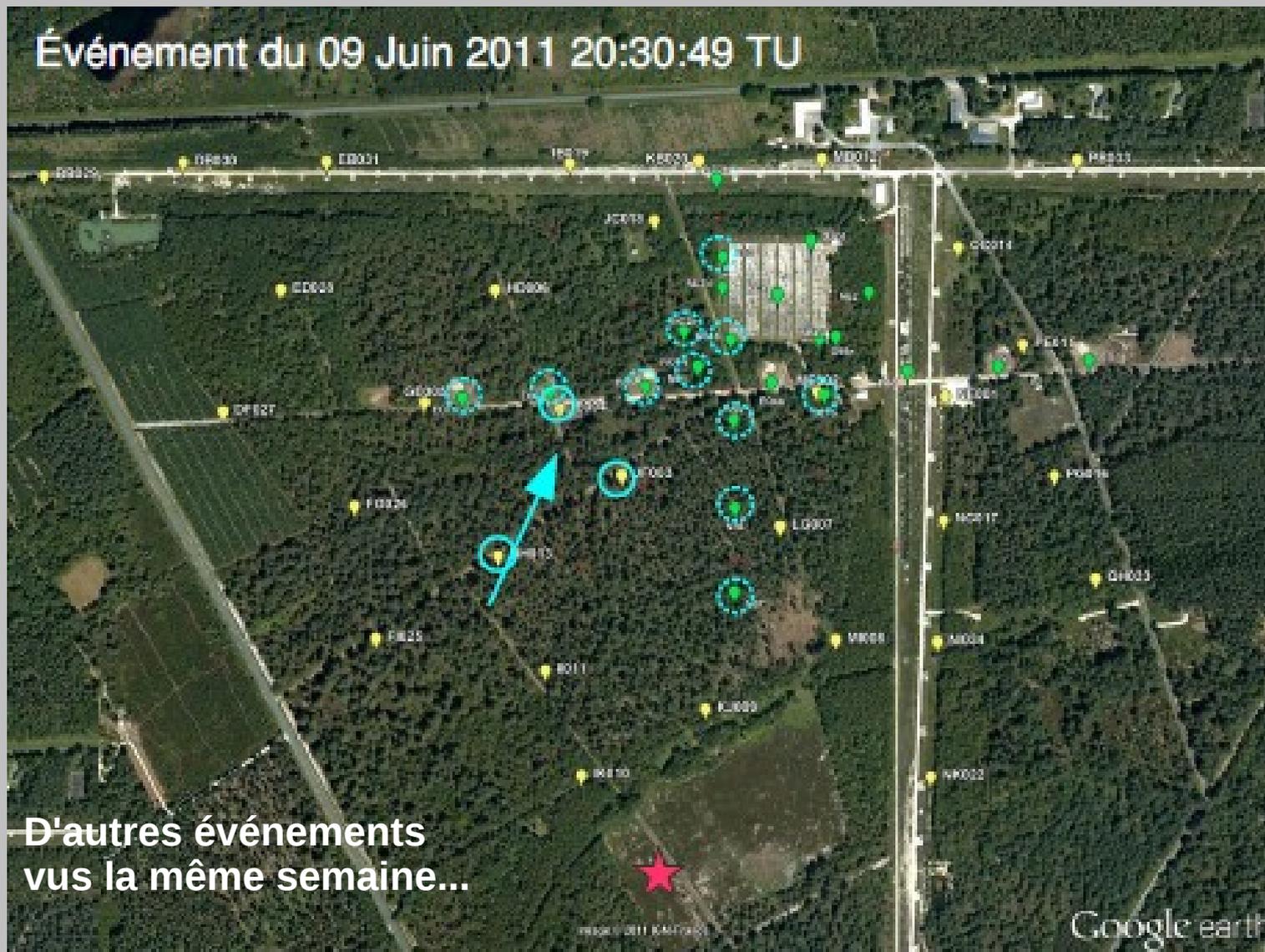
JRJC



15

Étude des sources parasites

Des rayons cosmiques quand même !

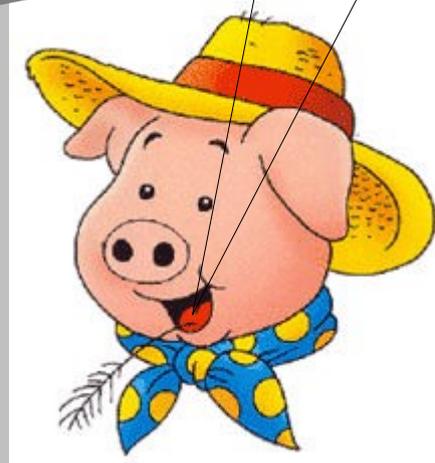


Conclusion / Perspectives

- ✓ Sur le plan physique
 - Faisabilité de la radio-détection prouvée
 - Courant transverse et excès de charge comme mécanismes principaux de création de champ ϵ
 - A affiner : corrélation en énergie, X_{\max} à travers le rayon de courbure
- ✓ Maîtrise de la chaîne expérimentale dans un milieu **défavorable**
 - Extinction / blindage des sources parasites
 - Conception d'un trigger plus performant capable de « vivre » avec les sources parasites
 - Comprendre le nombre élevé d'événements célibataires
- ✓ Extension du réseau à Nançay et en Argentine (Pierre Auger)

Questions ?

CODALEMA



Cosmic Ray Detection Array with Logarithmic Electromagnetic Antennas