

Radio-émission et radio-détection des gerbes atmosphériques



IIème École de Physique des Astroparticules, 7-12 septembre 2009
OHP, Saint Michel l'Observatoire, Avancées en Physique des Astroparticules

Plan

- Généralités

- composition de la gerbe atmosphérique (rappels)
- les observables

- Radio émission du champ électrique

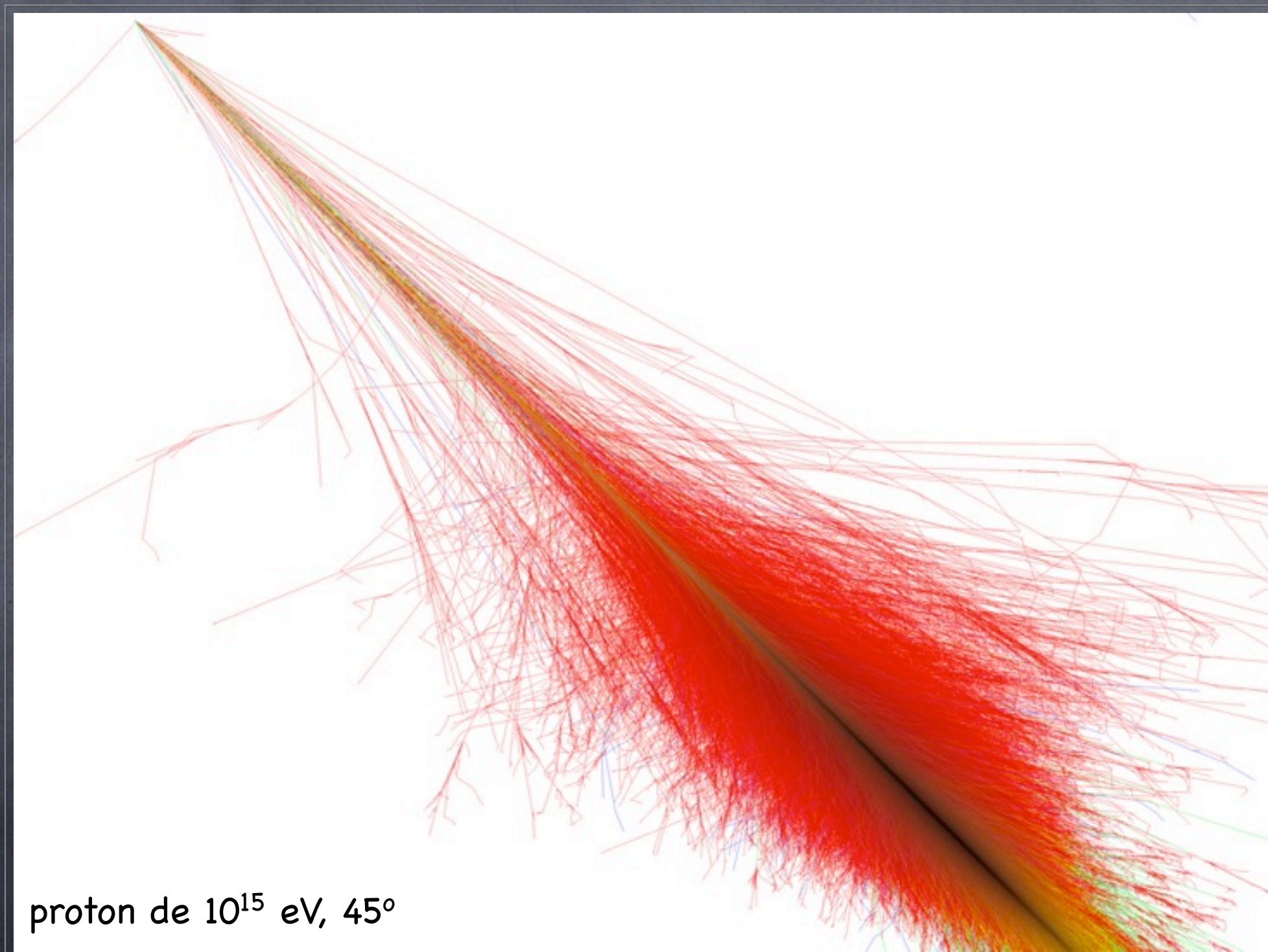
- ordres de grandeur avec un modèle Coulombien
- polarisation du champ avec un modèle radiatif

- Radio détection

- à Nançay (CODALEMA) et à Malargüe (Auger)
- le futur proche de la radio détection aux ultra-hautes énergies

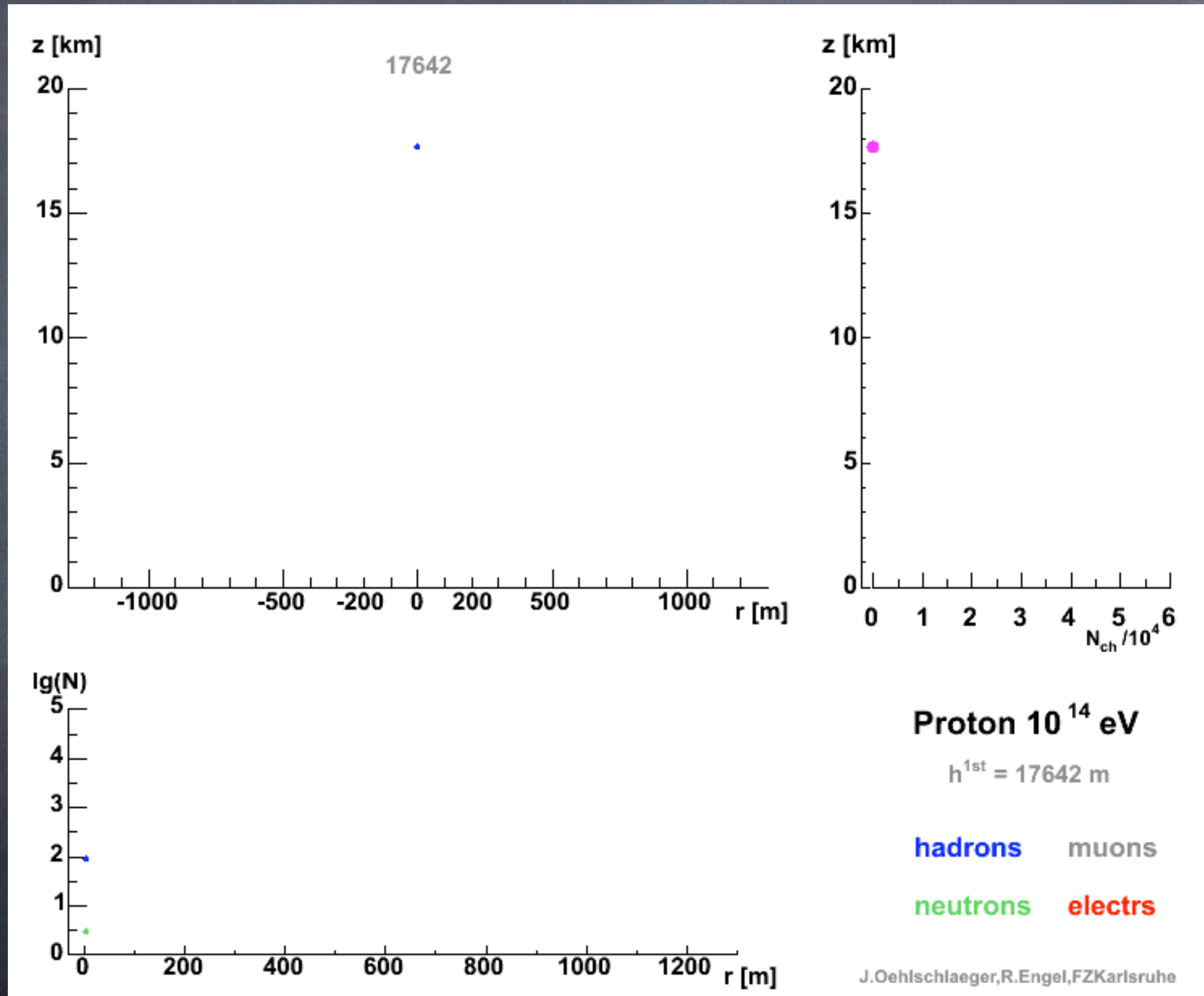
Composition de la gerbe atmosphérique

99 % de gammas, électrons, positrons, 0.9 % de muons
quelques milliards de particules secondaires au sol

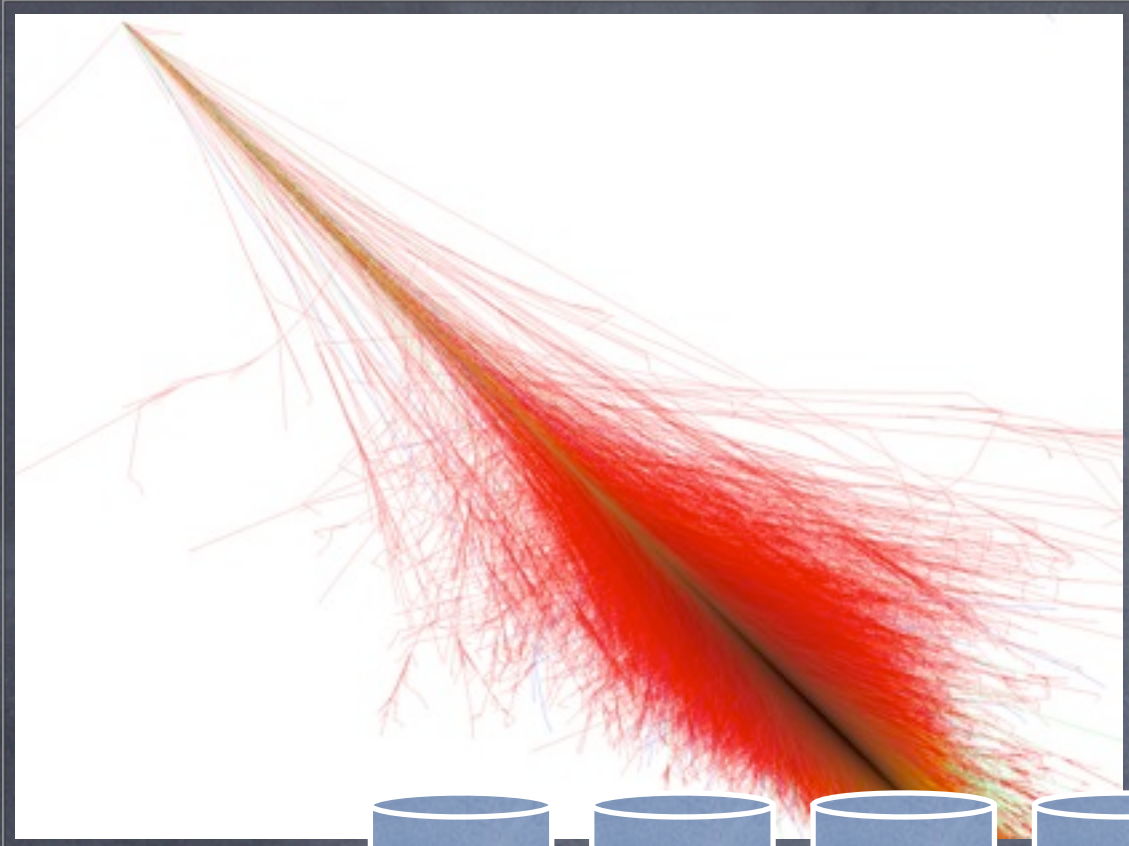


F. Schmidt, "CORSIKA Shower Images", <http://www.ast.leeds.ac.uk/~fs/showerimages.html>

Composition de la gerbe atmosphérique

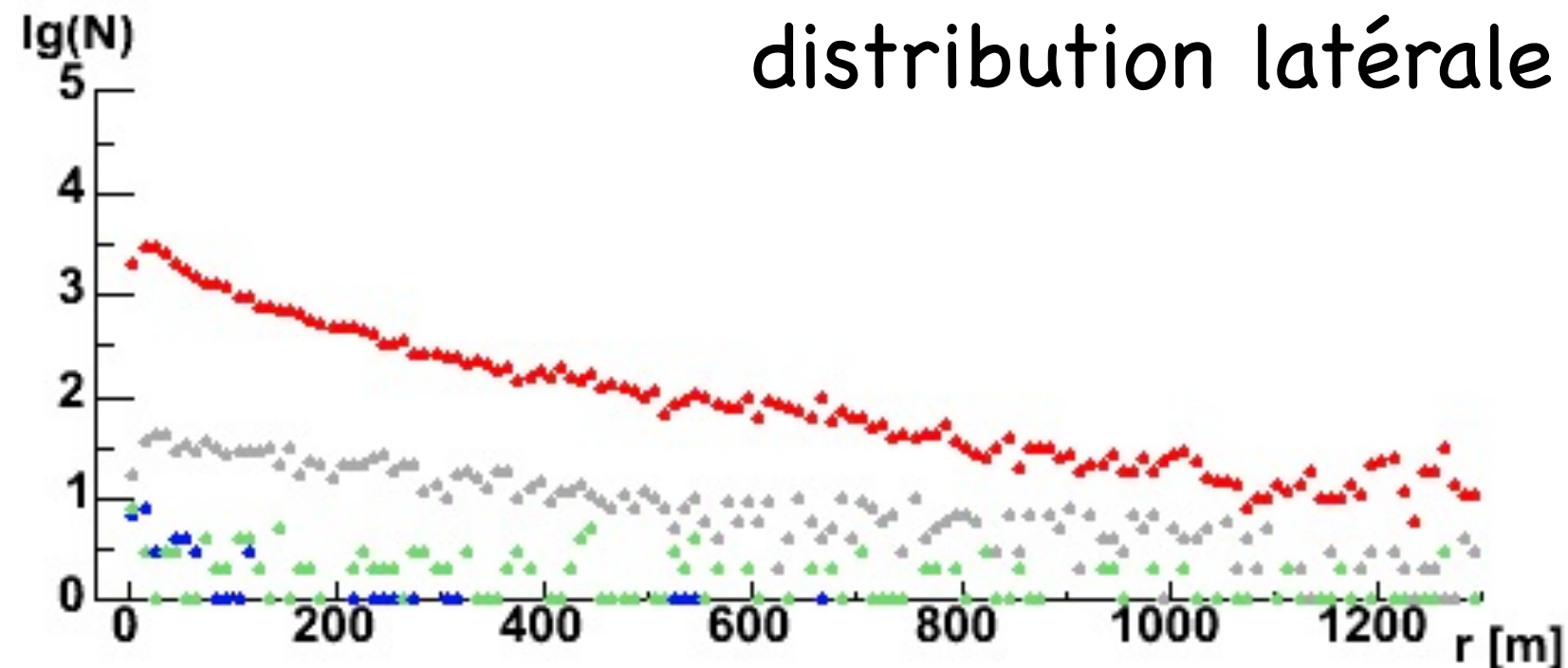


Composition de la gerbe atmosphérique



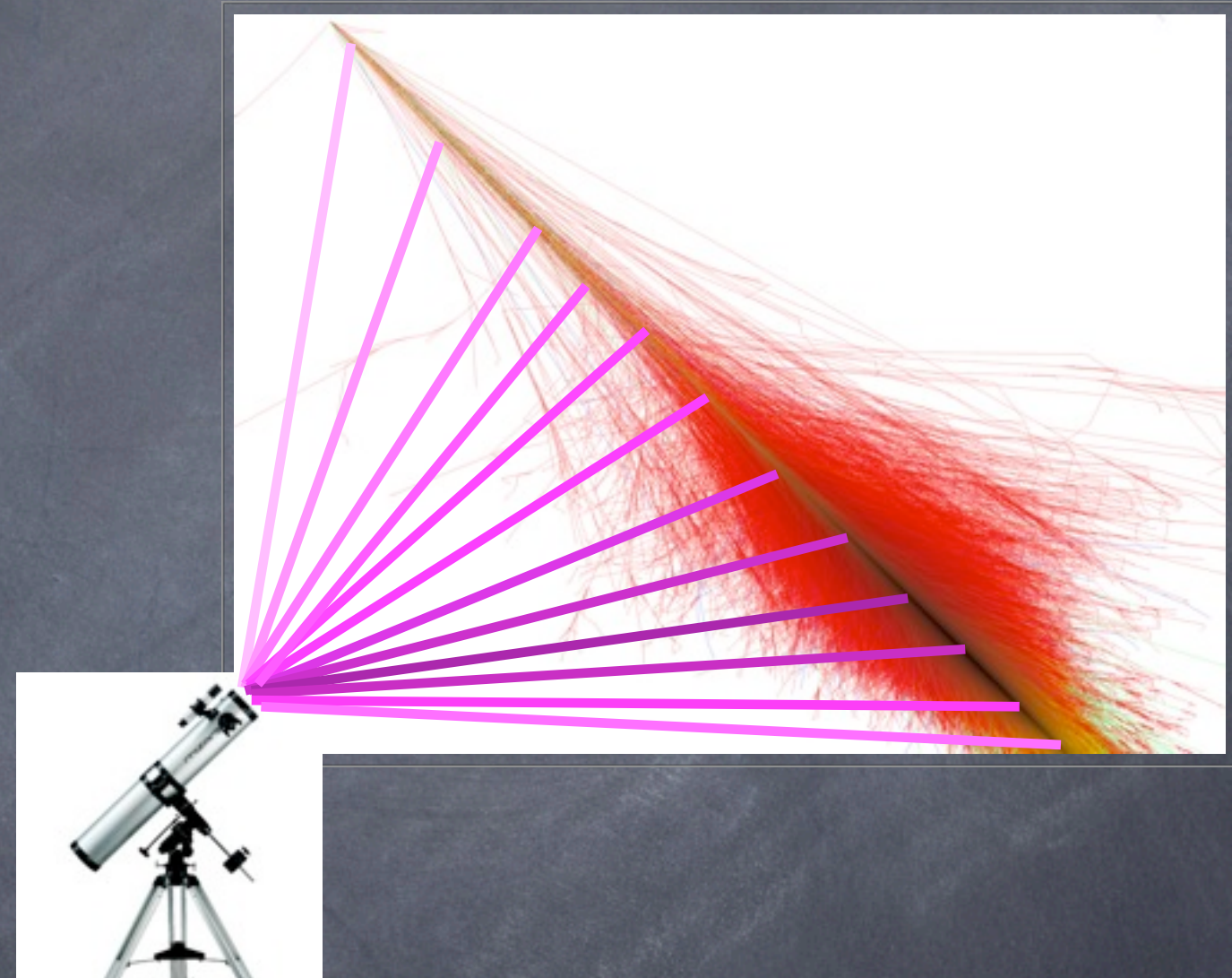
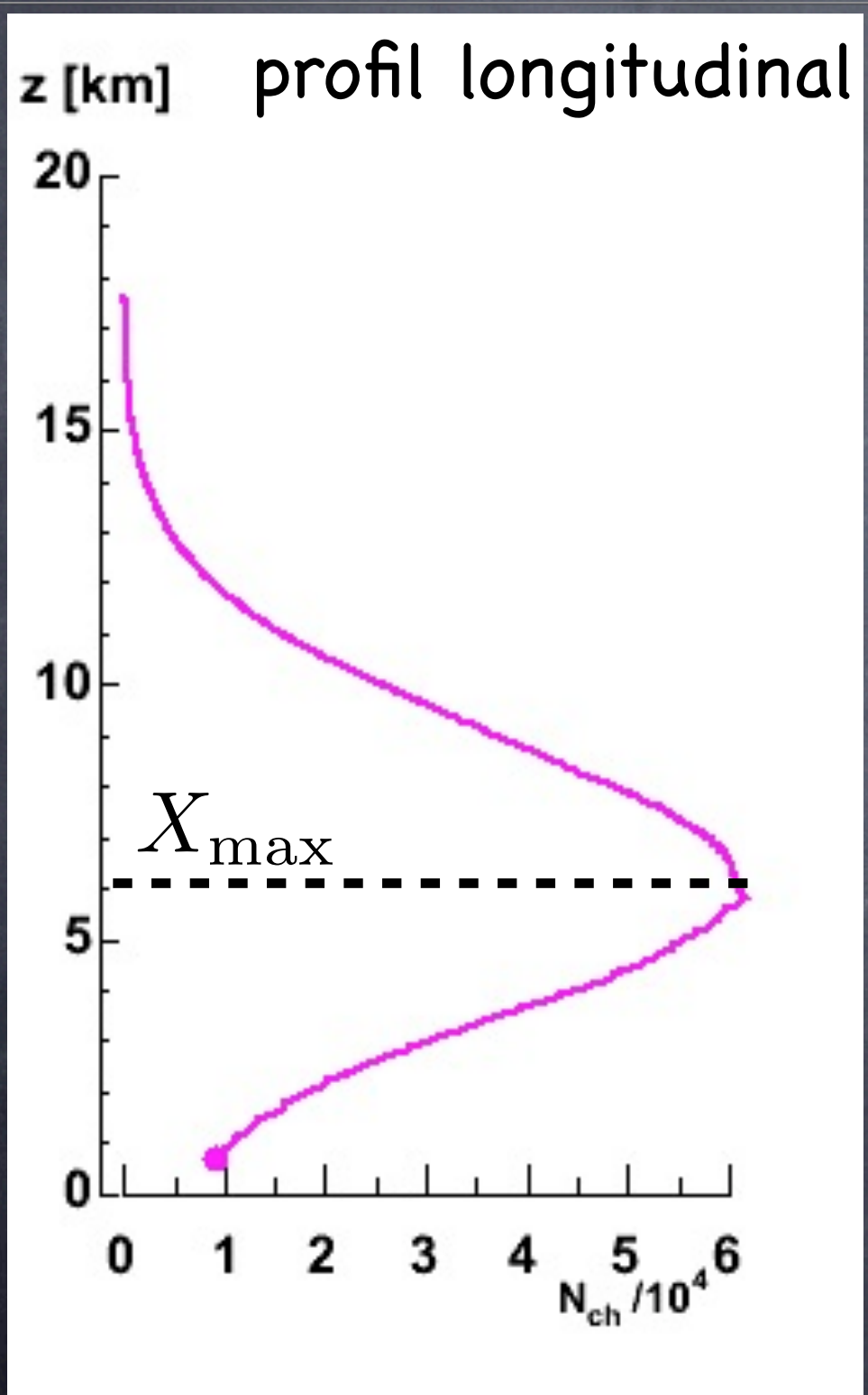
détection des particules
secondaires touchant le sol

- calcul de la **direction d'arrivée**
- estimation de l'**énergie par MC**
- contraintes sur la nature du primaire



Composition de la gerbe atmosphérique

observable : lumière de fluorescence



X_{max} est lié à la **nature** du
primaire et à son **énergie**
mesure **calorimétrique**
temps effectif de 10% environ

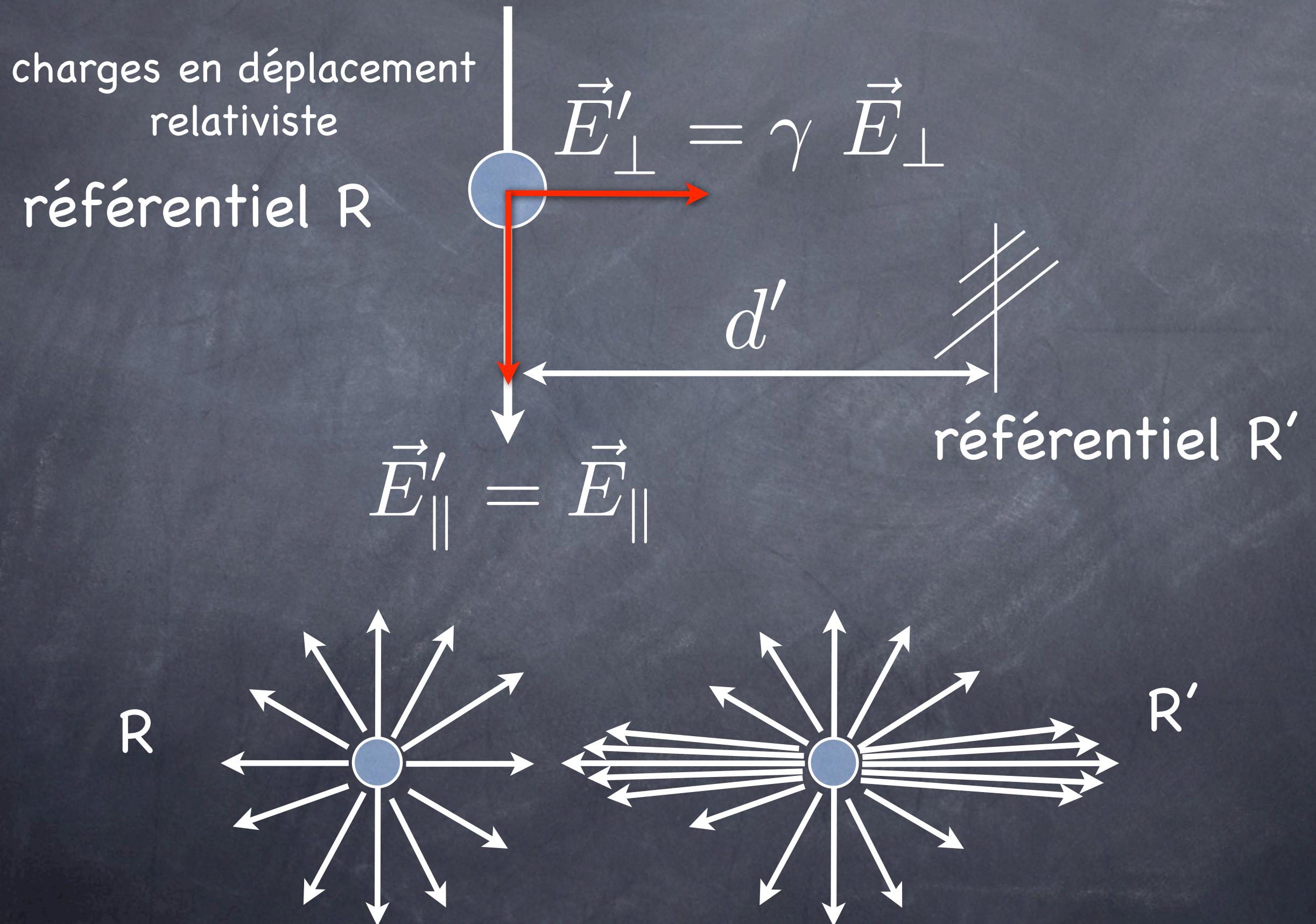
Radio-émission : modèle Coulombien

à haute énergie (EeV...), les particules secondaires chargées se comptent par 10^8

génération d'un champ électrique :
quelle bande de fréquence ?
quels mécanismes ?

les ordres de grandeur de façon très simple :
le champ Coulombien

Radio-émission : modèle Coulombien



Radio-émission : modèle Coulombien

$$E'_{\perp} = \frac{\gamma q d'}{4\pi\epsilon_0 (\gamma^2 \beta^2 c^2 t'^2 + d'^2)^{3/2}}$$

avec comme origine des temps le moment où les charges sont au plus proche de l'observateur

on sait que (FD) le nombre de charges est proportionnel à l'énergie du primaire : même chose pour le champ

$$\underline{\underline{||\vec{E}|| \propto E_p}}$$

e- de 30 MeV ($\gamma \sim 60$), 200 millions de charges à Xmax (gerbe de 2×10^{17} eV),
excès d'e- de 20%

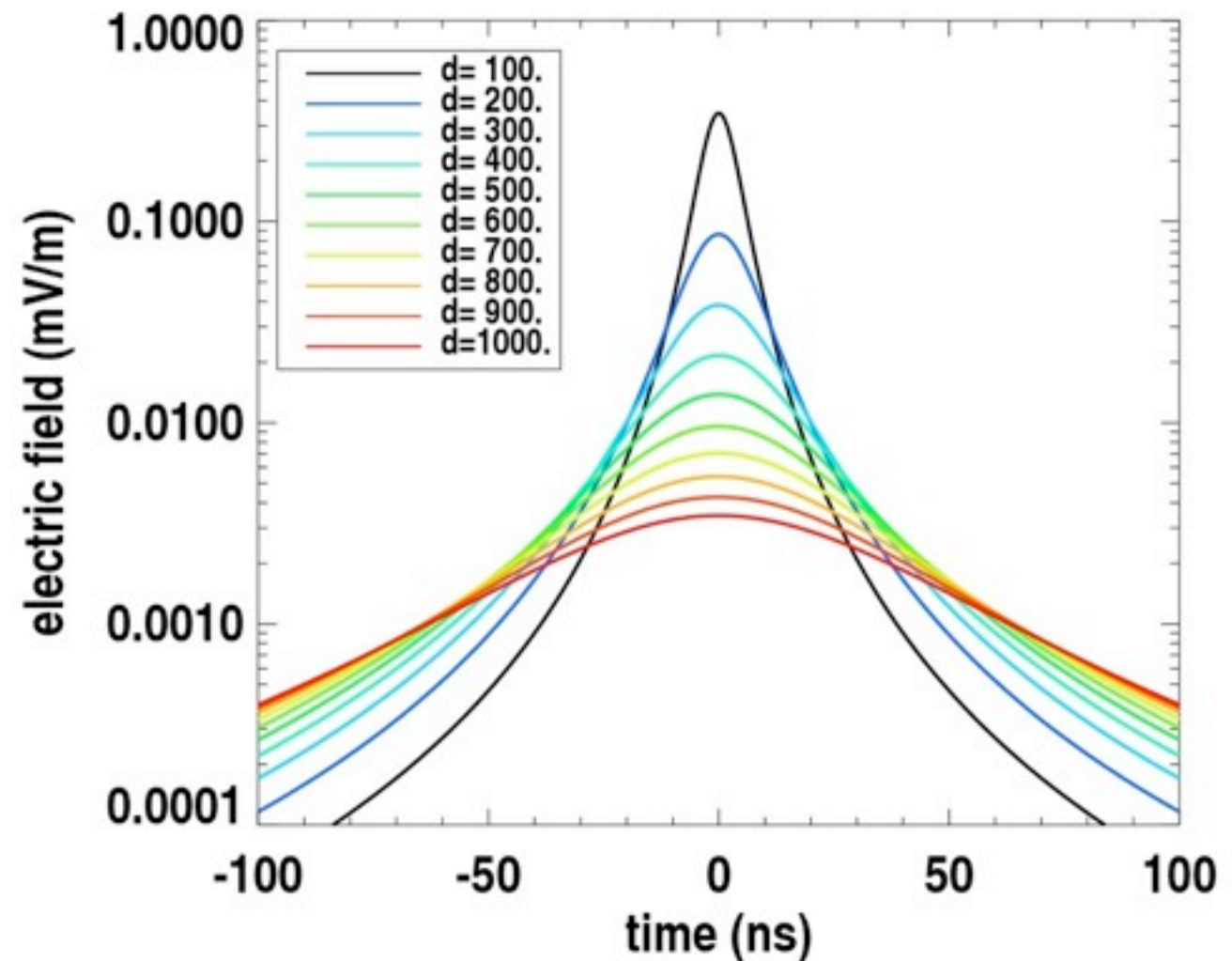
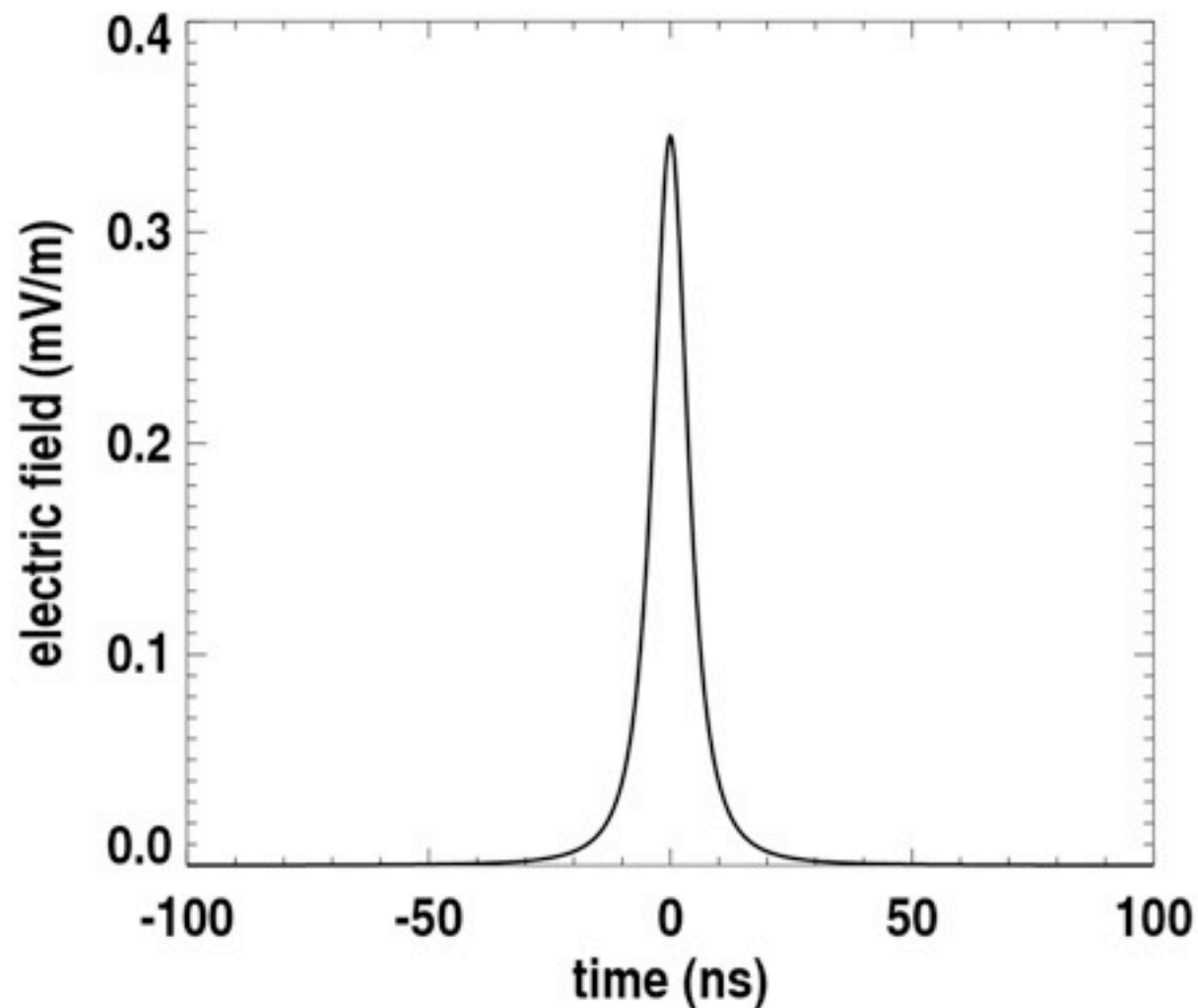
Radio-émission : modèle Coulombien

$$E_{\max} = \frac{\gamma q}{4\pi\epsilon_0 d^2},$$

$$\tau = \frac{d}{\gamma c}$$

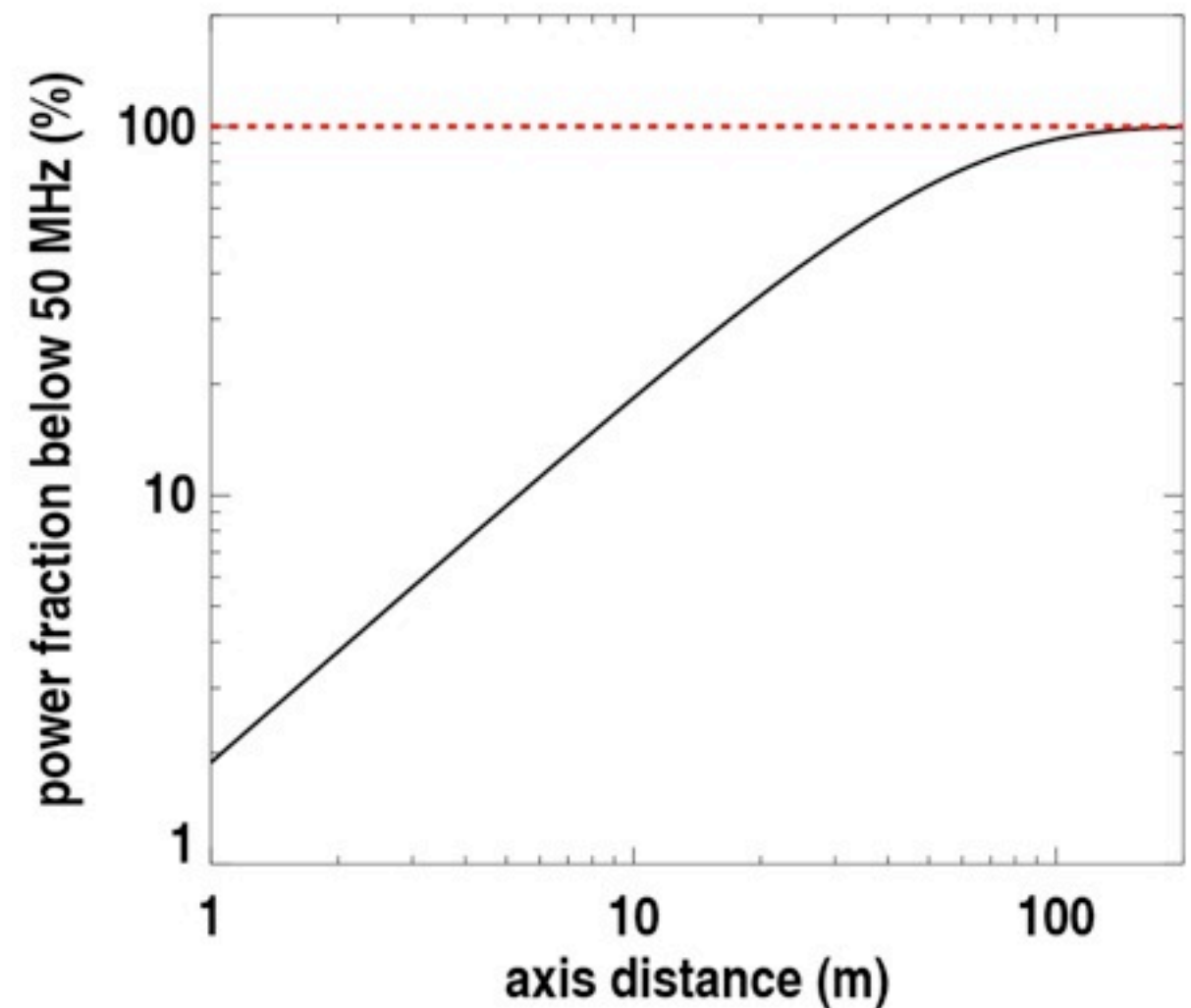
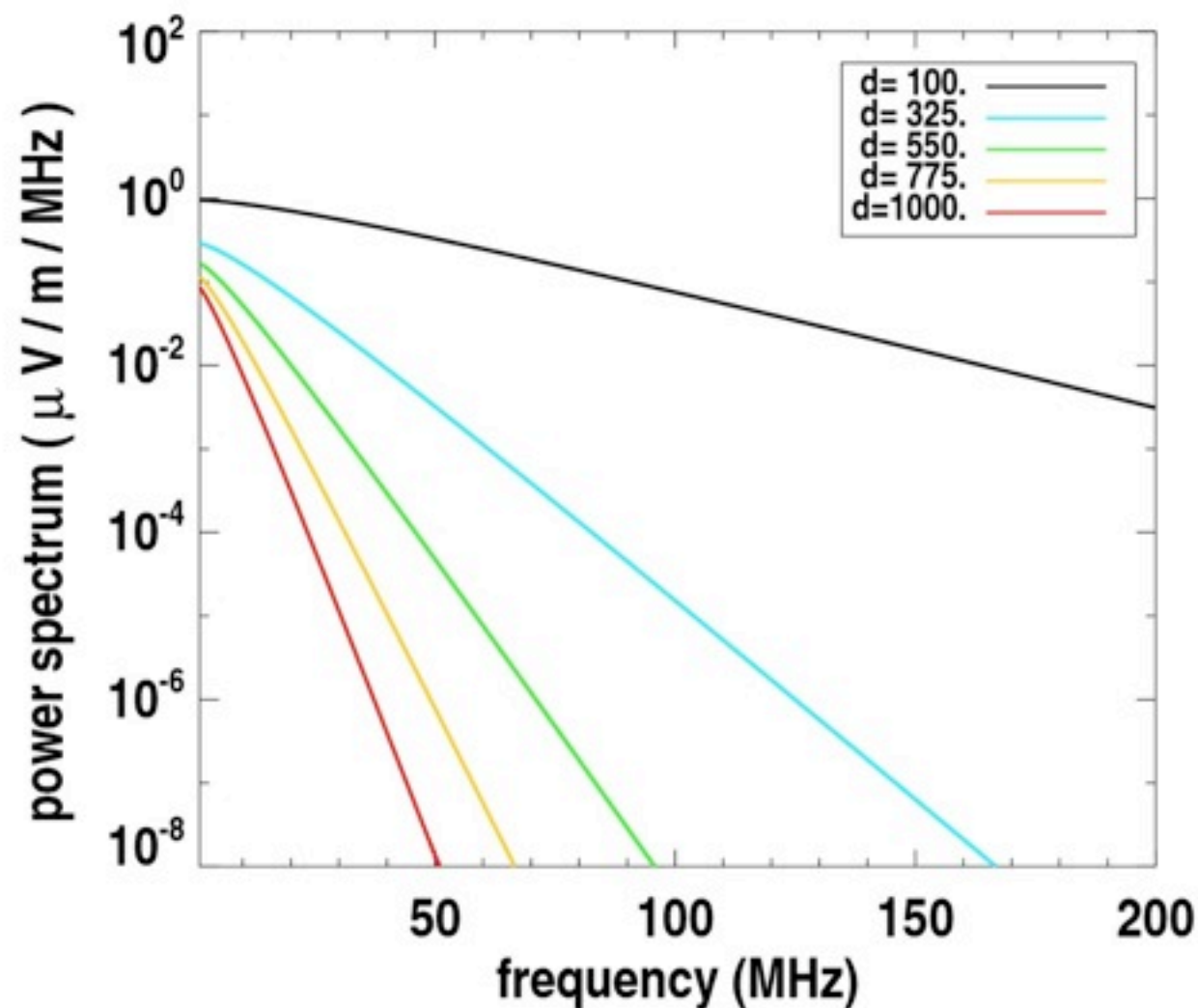
0.1 mV/m pour $d = 100$ m

impulsion monopolaire
d'environ 5 ns FWHM



Radio-émission : modèle Coulombien

contenu fréquentiel



nécessité d'avoir accès aux basses fréquences
pour être capable de voir des gerbes à grand
paramètre d'impact !

Radio-émission : modèle Coulombien

ce que nous a appris le modèle Coulombien

- le champ électrique est **proportionnel** au nombre de charges et donc à l'énergie du primaire
- il faut chercher le signal dans une bande **[1-200] MHz**
- il faut une **antenne large bande** pour voir des gerbes lointaines
- il faut une antenne pouvant mesurer des champs d'une **fraction de mV/m**

Radio-émission : raffinements

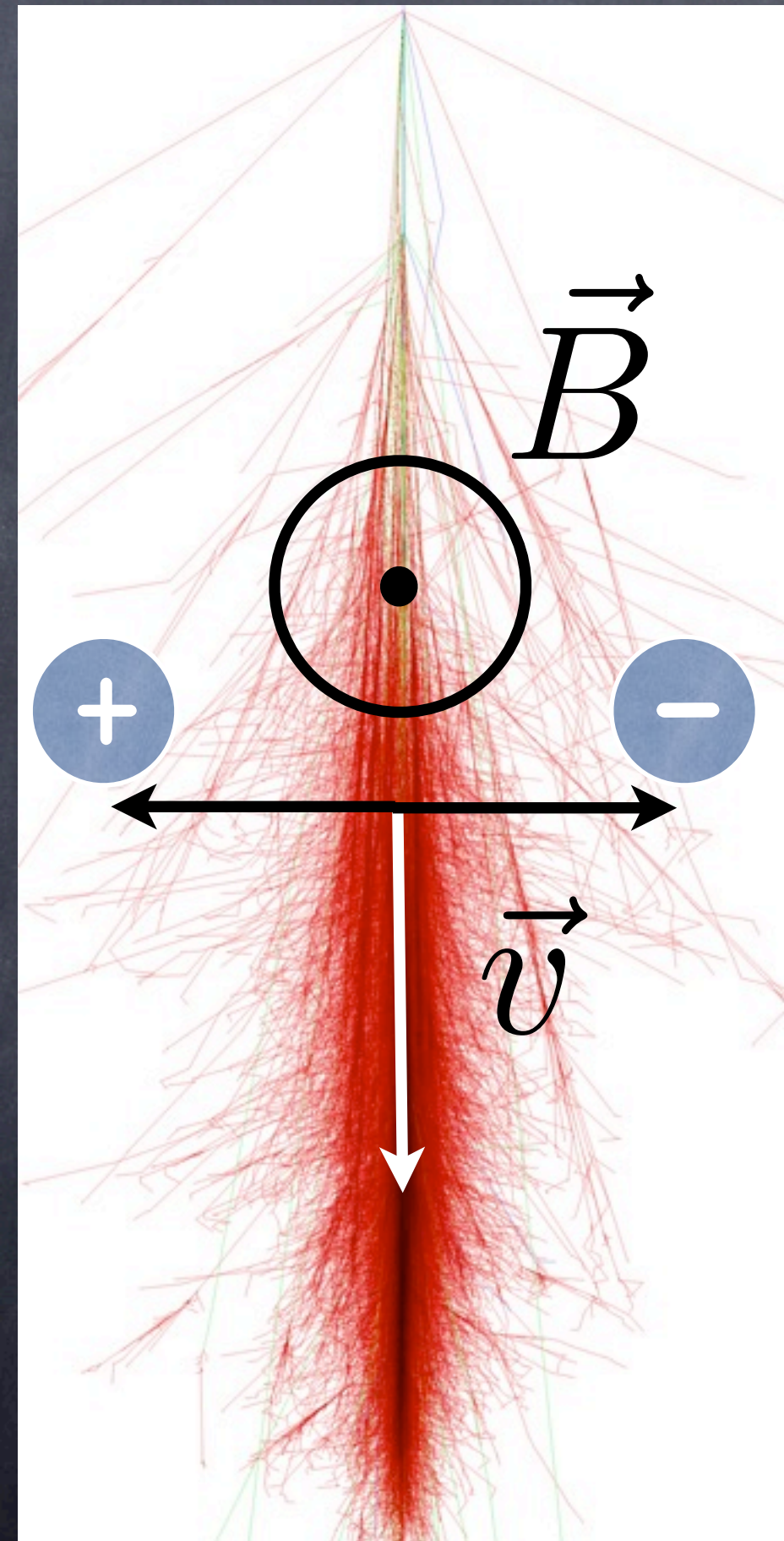
la réalité est bien plus complexe que notre cas hyper-simplifié :

- l'indice de l'air varie avec l'altitude et les conditions météo (Cerenkov)
- la gerbe a des distributions latérale et longitudinale
- épaisseur de la galette de particules de quelques mètres : fréquences entre 1 MHz et 200 MHz (domaine de cohérence en N^2 , bien plus favorable à la détection)
- \vec{B} sépare les charges de façon systématique par la force de Lorentz

Radio-émission : les sources de champ

différentes sources :

- rayonnement Cerenkov de l'excès d'électrons (l'excès est de 10-20 %), effet Askaryan
- émission par le courant \vec{j} , $A^\mu \propto \int j^\mu / R$
- rayonnement cohérent synchrotron des paires e^+/e^-
- champ radiatif des charges accélérées par Lorentz
- champ Coulombien boosté
- polarisation de la gerbe (dipole)



année	théorie	expérience
1962	Askaryan : Cerenkov des électrons	
1965	Kahn et Lerche : excès de charge, courant transverse (dominant) et dipole	Jelley, premières mesures d'impulsion radio en coïncidence avec des compteurs Geiger
1970		Allan propose une paramétrisation : $\mathcal{E}_\nu = 20 \left(\frac{E_P}{10^{17} \text{ eV}} \right) \sin \alpha \cos \theta \exp \left(-\frac{R}{R_0(\nu, \theta)} \right)$
fin 70	Abandon de la radiodétection	
2000	Nouvelles technologies : reprise de la radio	
2003	Falcke, Gorham, Huege : émission cohérente synchrotron des paires e+/e-	CODALEMA, LOPES
2005	DuVernois, Cai, Kleckner : émission radiative des particules chargées	CODALEMA, LOPES
2007 2008	Scholten, Werner : courant transverse Meyer, Lecacheux, Ardouin : champ Coulombien boosté, Cerenkov	CODALEMA, LOPES, RAuger
2009		CODALEMA, LOPES, RAuger, AERA phénoménologie CODALEMA : $\vec{v} \times \vec{B}$

Radio-émission : différentes signatures

- Cerenkov des électrons : aucune particularité directionnelle et dominant dans un milieu dense (eau, glace....) : GLUE, ANITA, RICE, SALSA
- courant transverse : impulsion bipolaire, polarisation selon $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$, pic lié à la partie précédant le maximum de la gerbe, le champ lié au développement longitudinal
- synchrotron cohérent des e^+/e^- : pulse monopolaire, pic lié au maximum de la gerbe (longueur d'onde > épaisseur du disque)
- champ radiatif des charges accélérées : pulse monopolaire, polarisation selon $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$
- champ Coulombien : dû à la partie basse énergie de la gerbe, pas de signature directionnelle

bilan : le champ est lié au développement de la gerbe et plusieurs modèles prédisent une dépendance en $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$

Radio-émission : signature géomagnétique

autre cas d'école intéressant : le wire-model (ReAIRES)

$$\vec{E} = \frac{e}{4\pi\epsilon_0} \left[\frac{\vec{n} - \vec{\beta}}{\gamma^2 R^2 (1 - \vec{\beta} \cdot \vec{n})^3} + \frac{\vec{n} \times ((\vec{n} - \vec{\beta}) \times \vec{\beta}')}{Rc(1 - \vec{\beta} \cdot \vec{n})^3} \right]_{\text{ret}}$$

Coulomb,
champ proche,
vu précédemment

radiatif,
champ lointain

avec

$$t_{\text{obs}} = t + \frac{|R(t)|}{c}$$

$$\vec{\beta}' = \omega \vec{\beta} \times \vec{b}$$

$$\omega = \frac{eB}{\gamma m}$$

$$\vec{b} = \frac{\vec{B}}{B}$$

Lorentz !

pulsation synchrotron

$$\vec{E}_{\text{radiatif}} \propto \vec{\beta} \times \vec{B}$$

Radio-émission : signature géomagnétique

auto-cohérence du modèle :

$$\frac{(\vec{v} \times \vec{B})_z}{(\vec{v} \times \vec{B})_{NS}} = \frac{E_z}{E_{NS}} = \mp \tan \theta_B$$

selon hémisphère
N ou S

constante !

mais difficulté à mesurer la composante verticale
sur des sites trop bruités (émissions humaines)

Radio-émission : signature géomagnétique

$$\vec{E}_{\text{radiatif}} \propto \vec{\beta} \times \vec{B}$$

Formule disponible sur le marché depuis 1970 (Allan) :

$$\mu\text{V}.\text{m}^{-1}.\text{MHz}^{-1}$$

$$\mathcal{E}_\nu = 20 \left(\frac{E_P}{10^{17} \text{ eV}} \right) \sin \alpha \cos \theta \exp \left(-\frac{R}{R_0(\nu, \theta)} \right) .$$

proportionnel à
l'énergie
du primaire

$$\frac{|\vec{\beta} \times \vec{B}|}{\beta B}$$

atténuation
atmosphérique

décroissance
du champ avec
la distance à
l'axe

Radio-émission : potentialités

- **direction et cœur** : triangulation possible avec datation GPS individuelle et distribution latérale (comme un SD)
- **énergie** : signal lié à l'histoire de la gerbe (comme un FD), mesure calorimétrique
- **temps effectif proche de 100 %** (périodes orageuses plus difficiles à maîtriser)
- détecteur **peu cher** ! (environ 4 000 euros pour une station complètement autonome hors coût d'expédition, 3 fois moins qu'une cuve Auger)



test avec des expériences hybrides
(CODALEMA, LOPES)

Radiodétection des gerbes atmosphériques

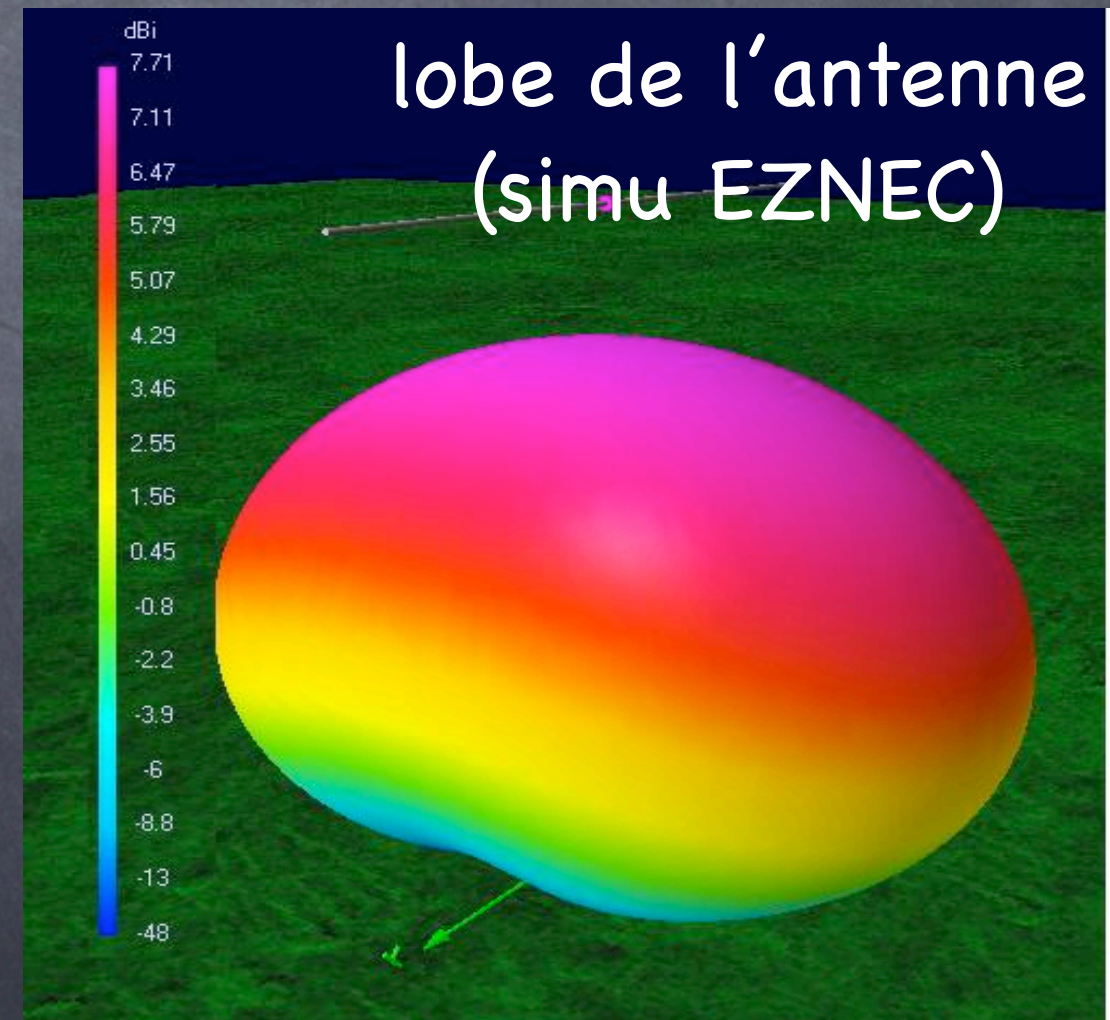
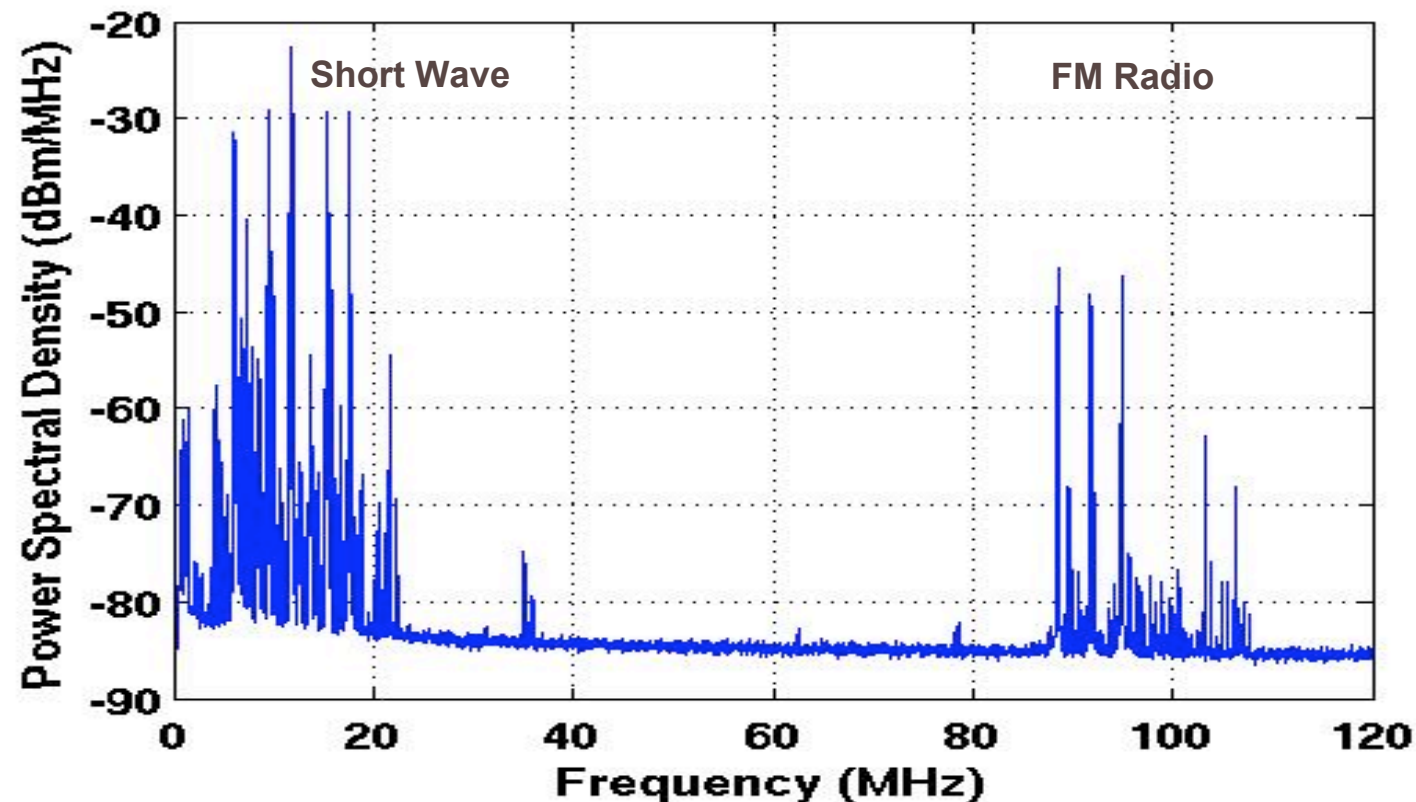
Illustration avec l'expérience CODALEMA



La radio détection : choix de l'antenne

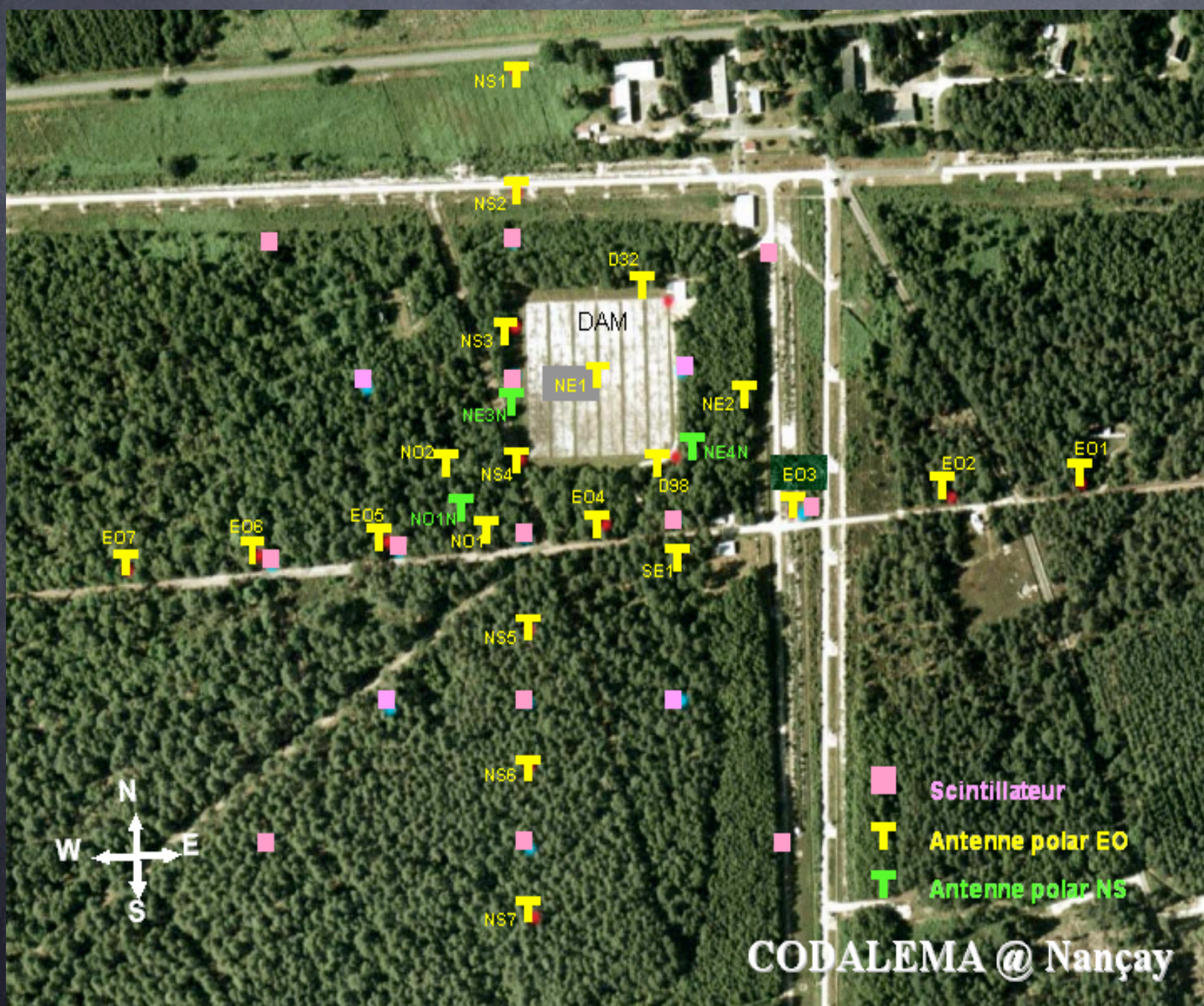


- antenne dipolaire active
- 1.2 m de longueur, 10 cm de large
- 1 m au dessus du sol
- amplificateur linéaire de gain 30 dB
- bande passante 80 kHz–230 MHz
- lobe bien uniforme



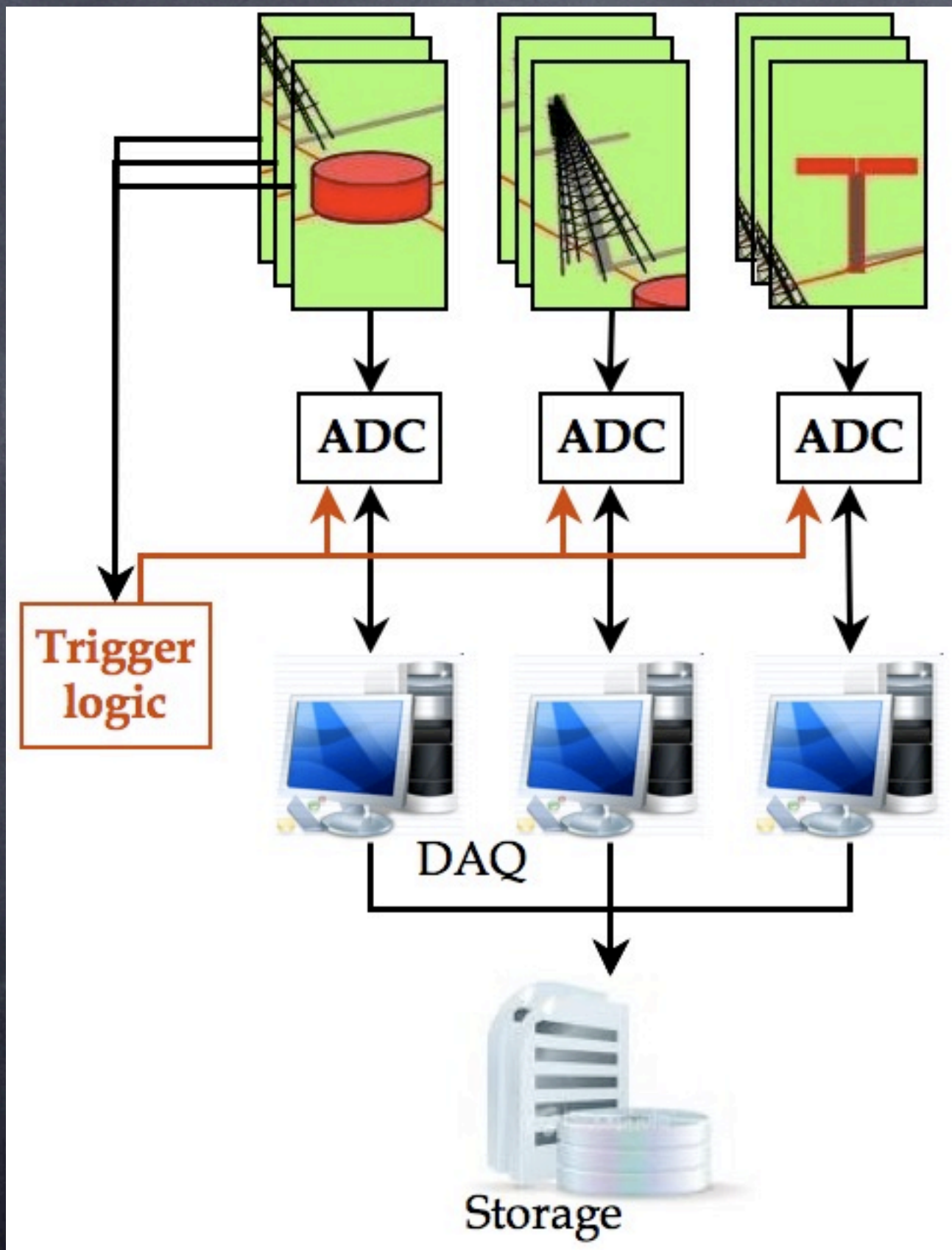
La radio détection : CODALEMA

implantée sur le site du
radiotélescope de Nançay



- réseau de 17 scintillateurs, pas de 80 m, 300m x 300m : **trigger de CODALEMA**
- le seuil est à 10^{15} eV (genou), acceptance saturée à 10^{16} eV
- réseau de 21 antennes en polarisation EW et 3 en polarisation NS, pas de 85 m, 2 bras en croix de 600 m de long
- DAM : 144 antennes log-periodiques $80 \times 80 \text{ m}^2$

La radio détection : CODALEMA

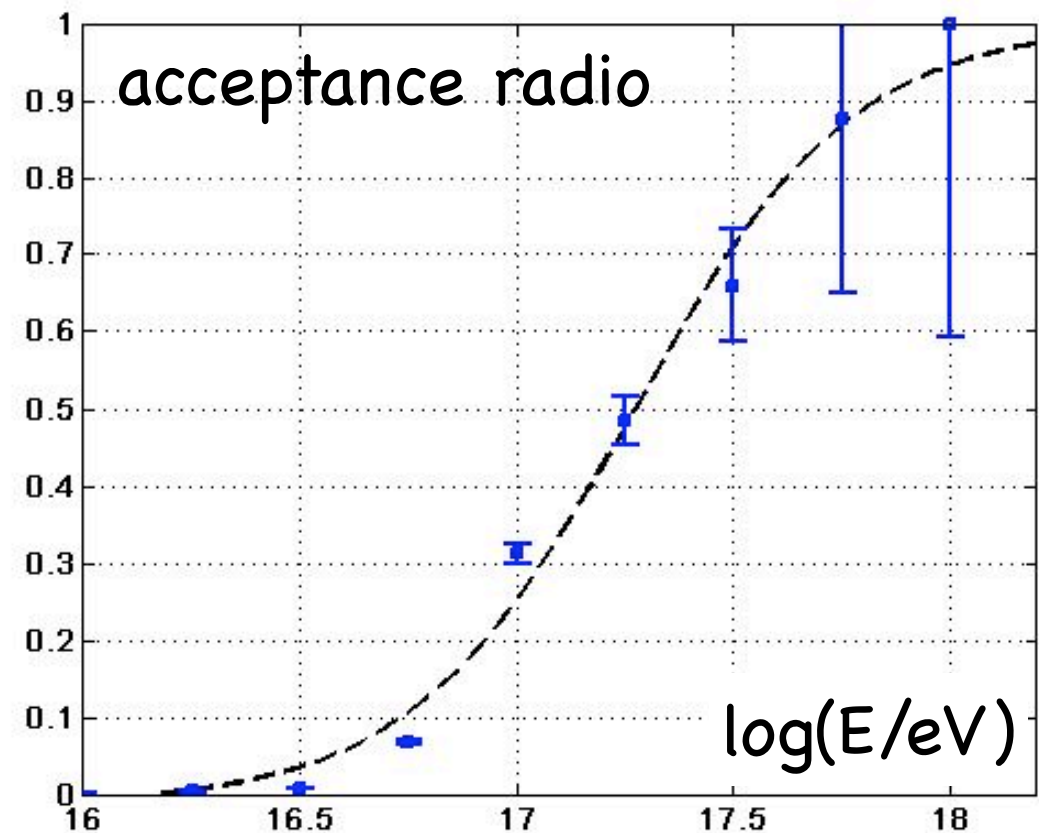
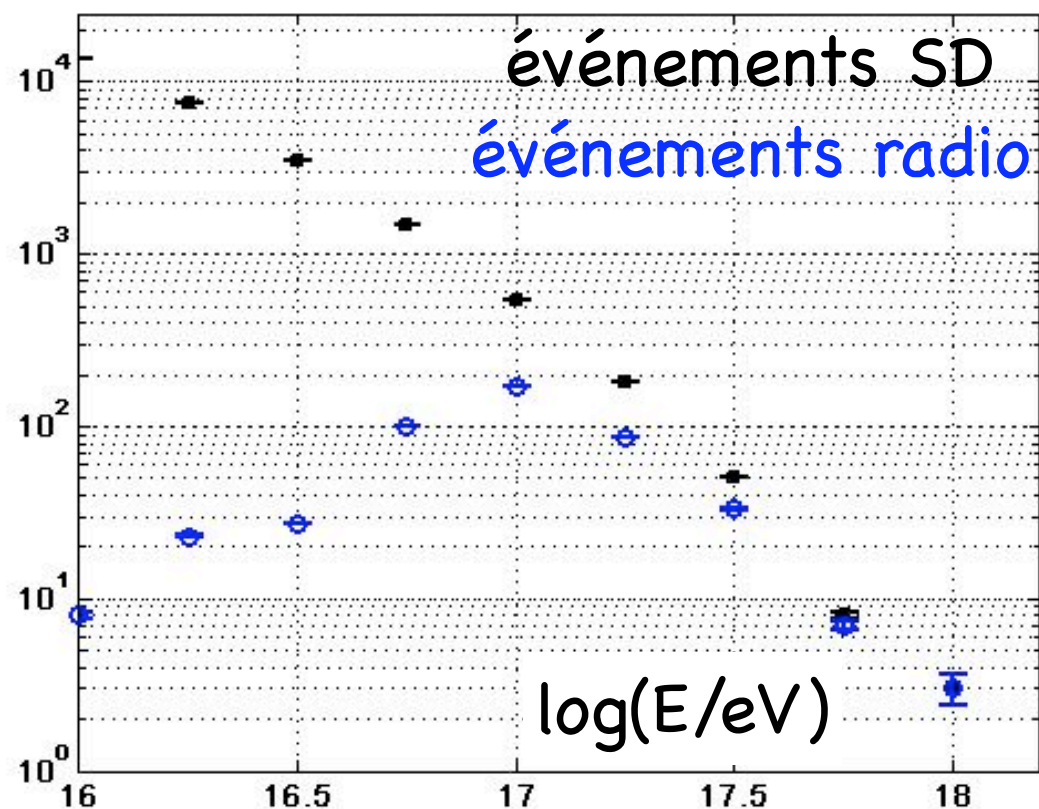
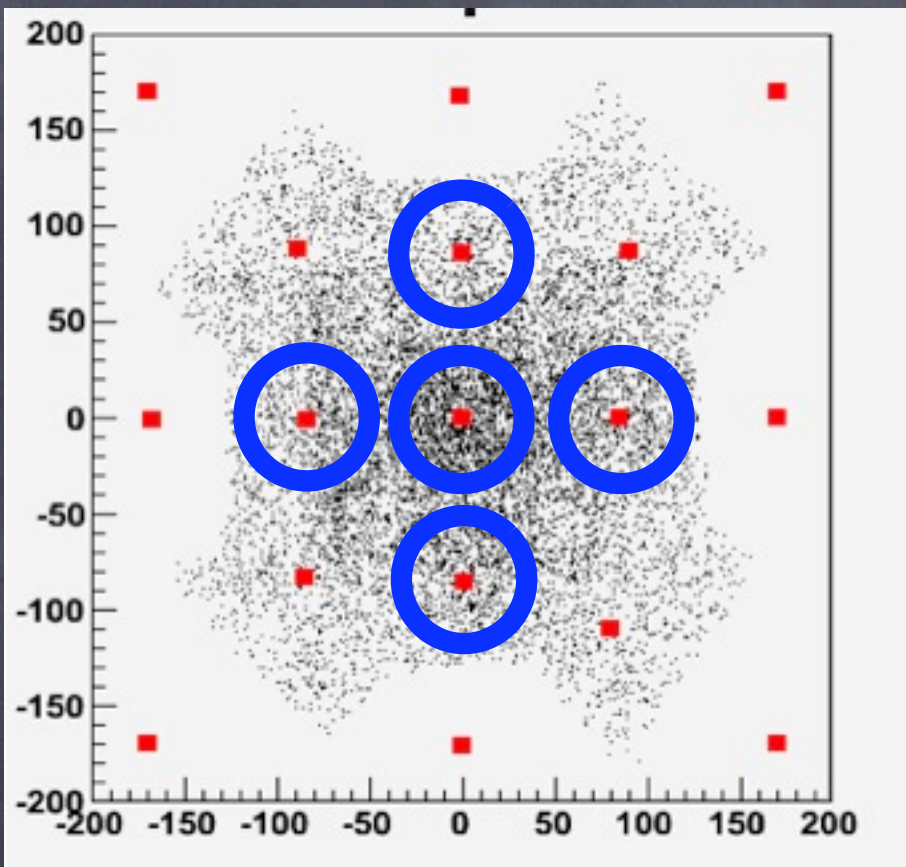


logique de trigger :
changement à distance des
valeurs de seuil et des
conditions de trigger

MATACQ ADC : 300 MHz, 12
bits, 1 Gs/s, 2500 échantillons

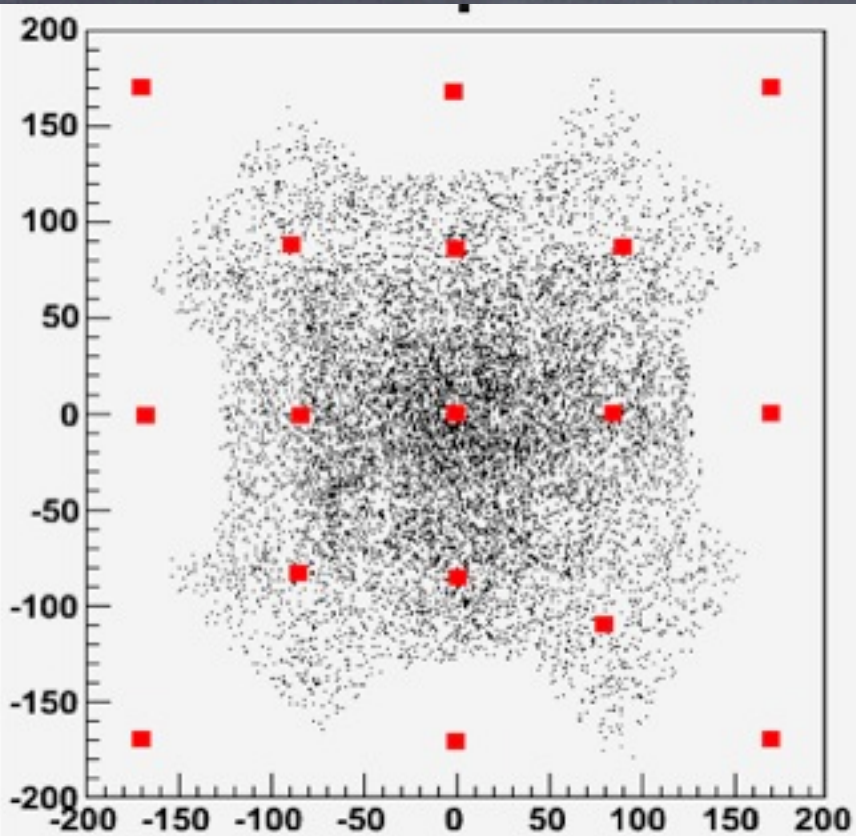
La radio détection : CODALEMA

- condition pour 1 scintillateur : seuil > 0.3 VEM
- trigger : les 5 stations centrales dans 600 ns
- taux de trigger : 1 pour 7 min
- événement interne : le scintillateur ayant le maximum de signal n'est pas situé au bord : bonne confiance pour le cœur et l'énergie
- événement externe : direction seule
- 50 000 événements internes en 2 ans $\theta \leq 50^\circ$

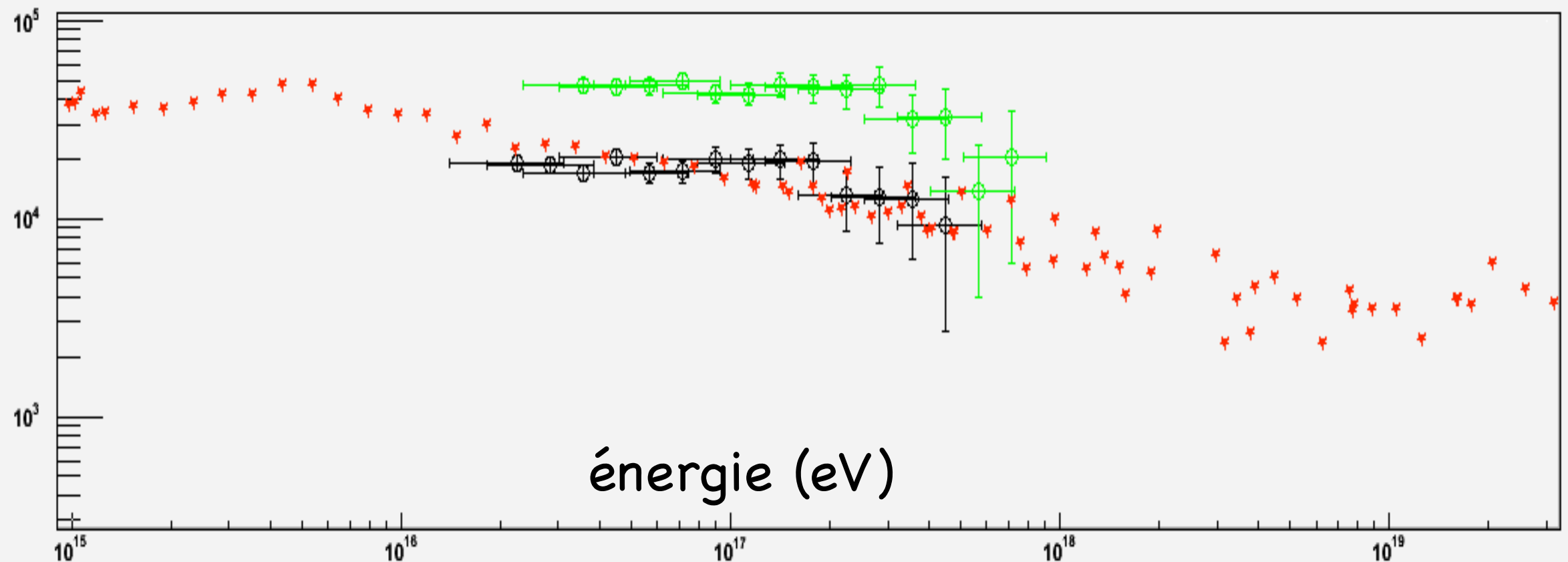


La radio détection : CODALEMA

- condition pour 1 scintillateur : seuil > 0.3 VEM
- trigger : les 5 stations centrales dans 600 ns
- taux de trigger : 1 pour 7 min
- événement interne : le scintillateur ayant le maximum de signal n'est pas situé au bord : bonne confiance pour le cœur et l'énergie
- événement externe : direction seule
- 50 000 événements internes en 2 ans $\theta \leq 50^\circ$



$$E^{2.7} \Phi(E) [\text{GeV}^{1.7} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}]$$

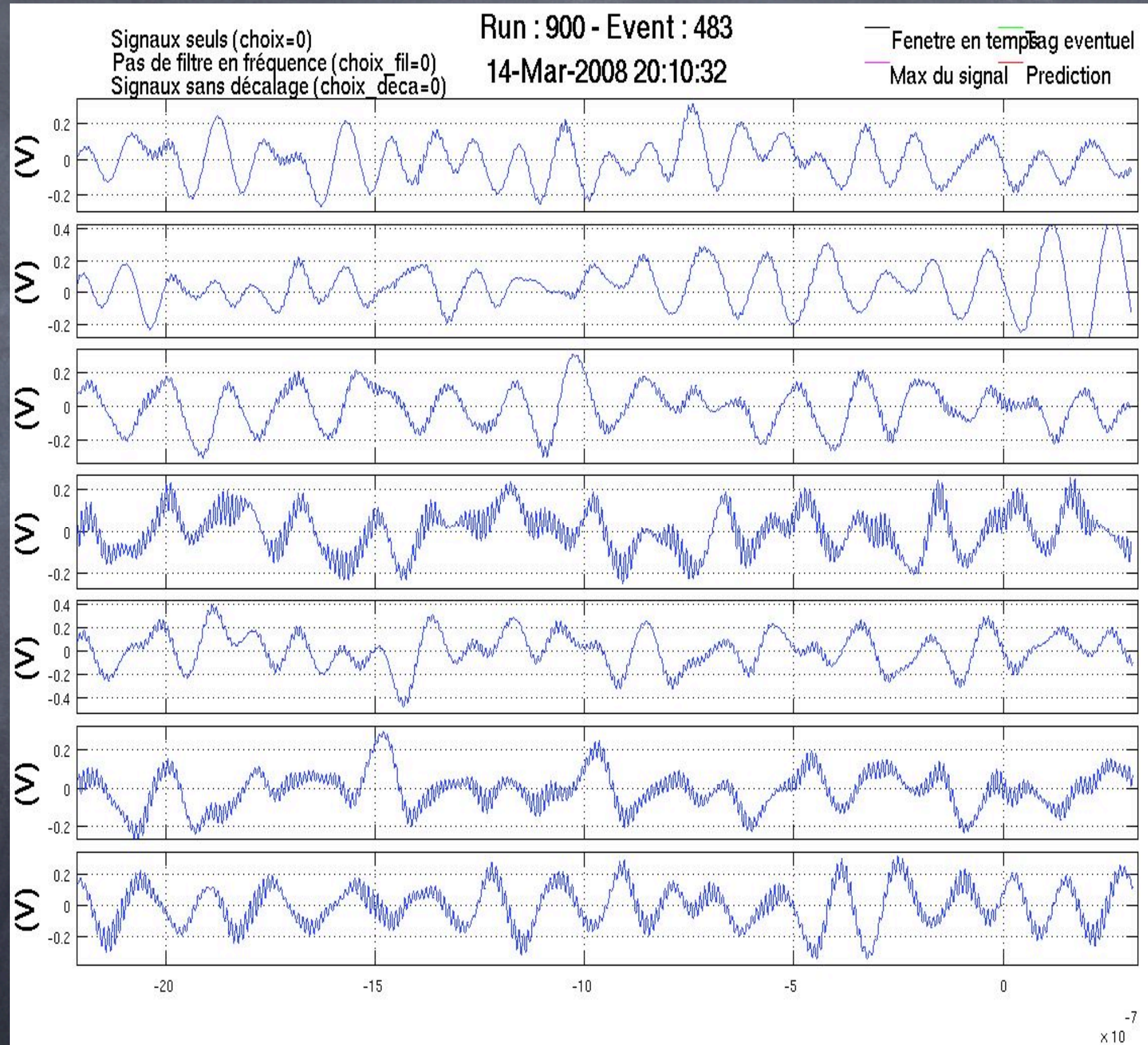


La radio détection : CODALEMA

trigger
scintillateur

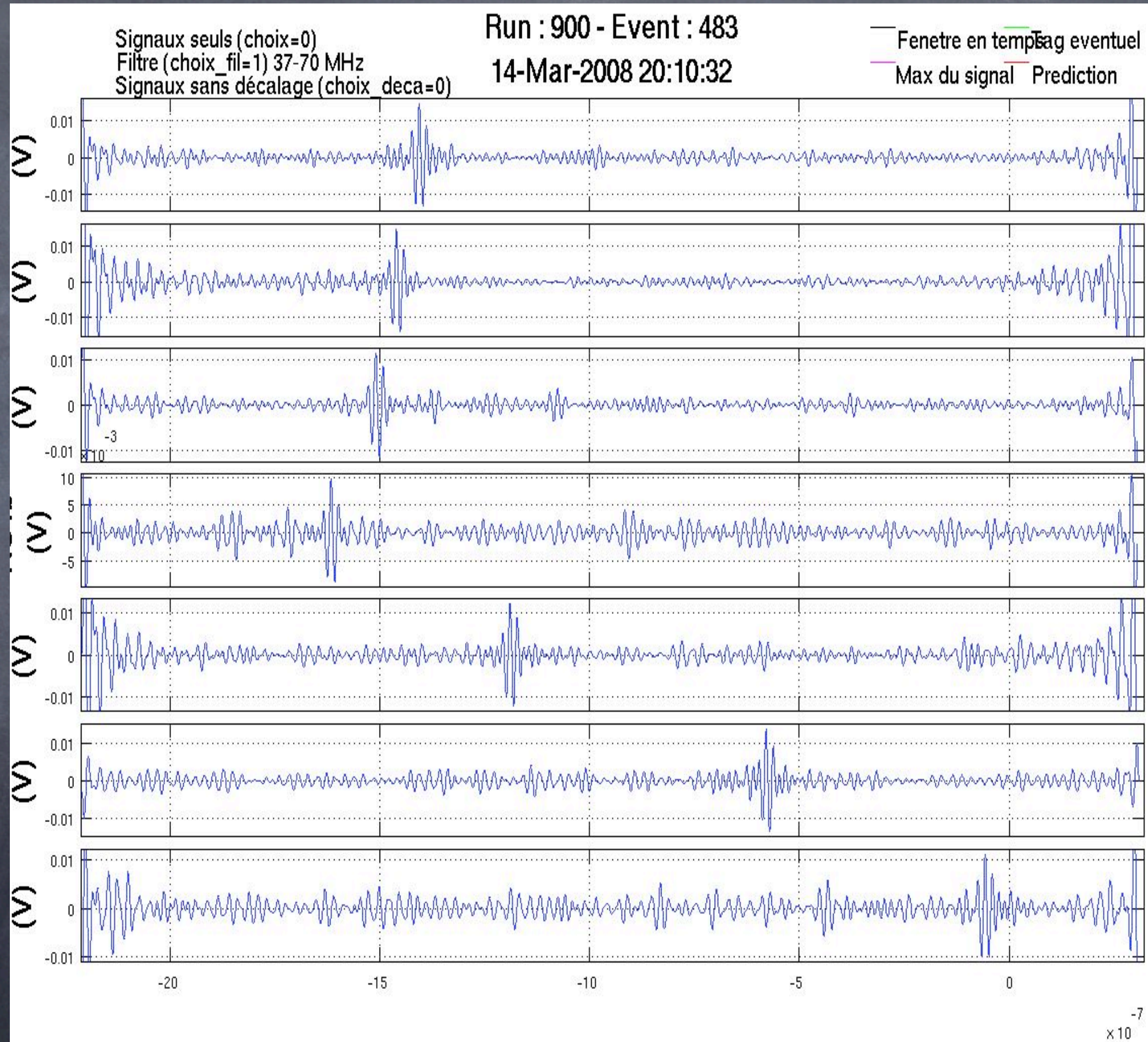


enregistrement
des données
radio, 1 Gs/s,
 $2.5 \mu\text{s}$



La radio détection : CODALEMA

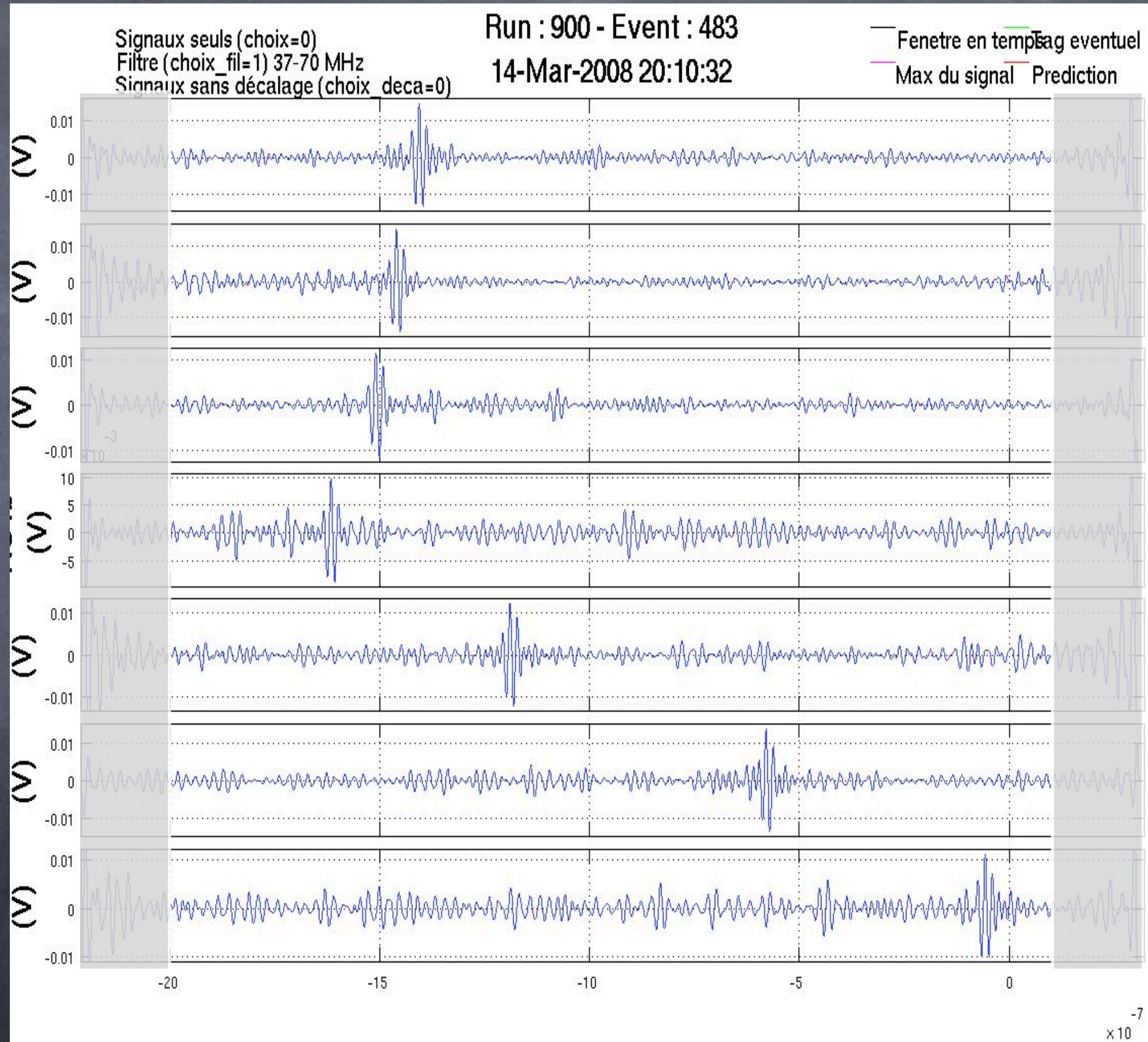
filtrage
numérique
dans la bande
23-82 MHz



La radio détection : CODALEMA

filtrage
numérique
dans la bande
23-82 MHz

suppression
des oreilles de
Gibbs

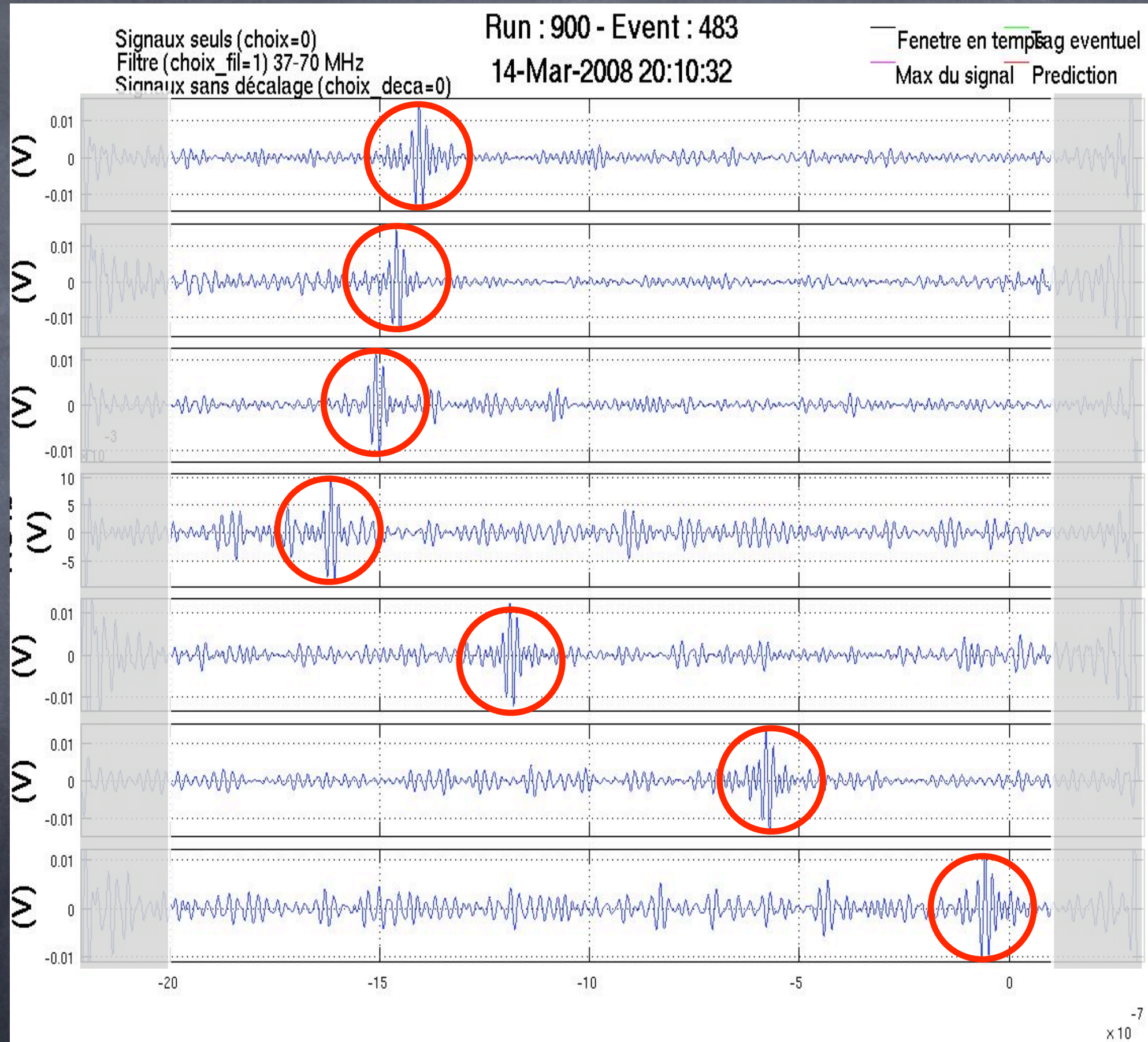


La radio détection : CODALEMA

filtrage
numérique
dans la bande
23-82 MHz

suppression
des oreilles de
Gibbs

détection des
transitoires



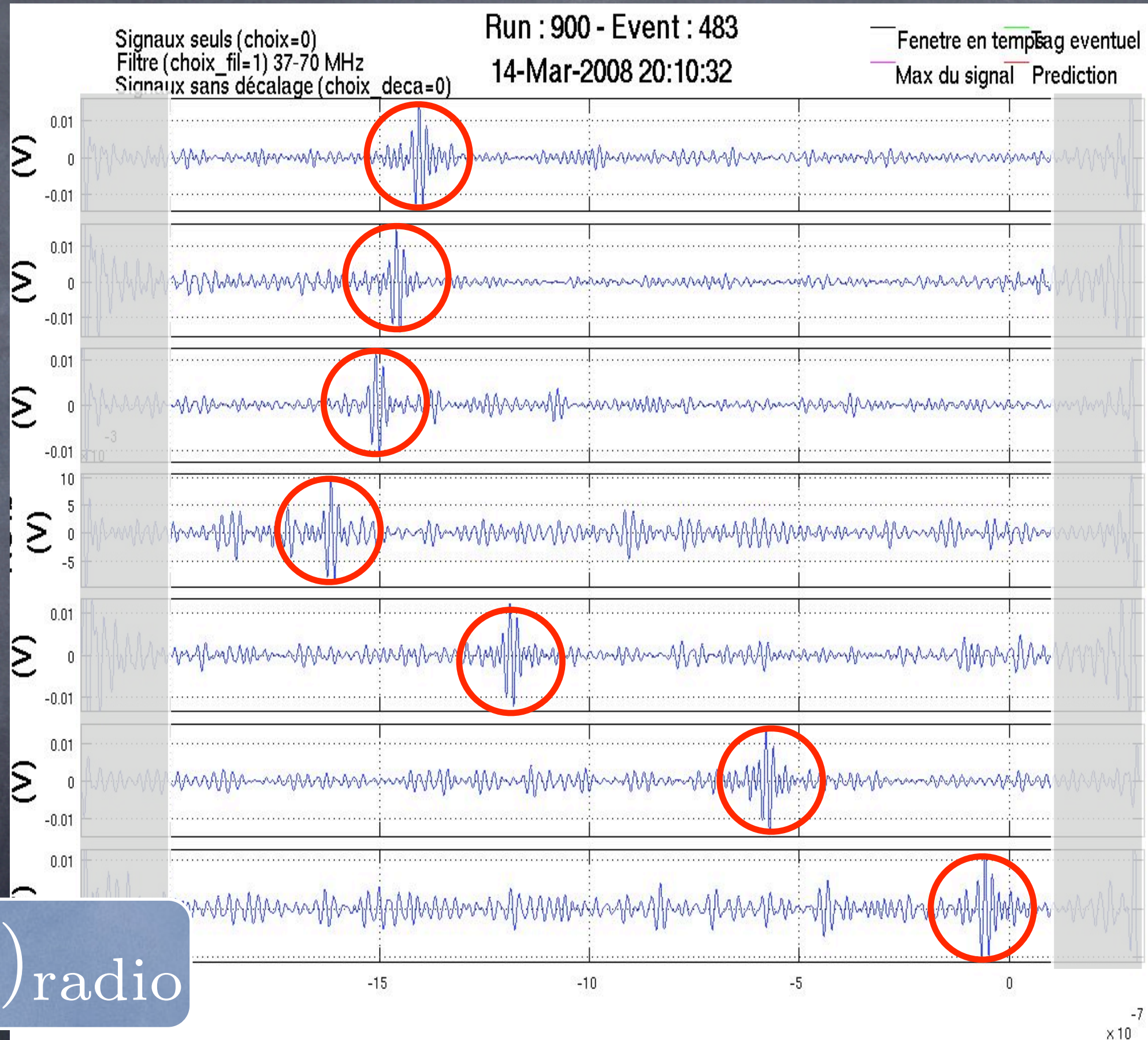
La radio détection : CODALEMA

filtrage
numérique
dans la bande
23-82 MHz

suppression
des oreilles de
Gibbs

détection des
transitoires

$(\theta, \phi, t_0)_{\text{radio}}$



La radio détection : CODALEMA

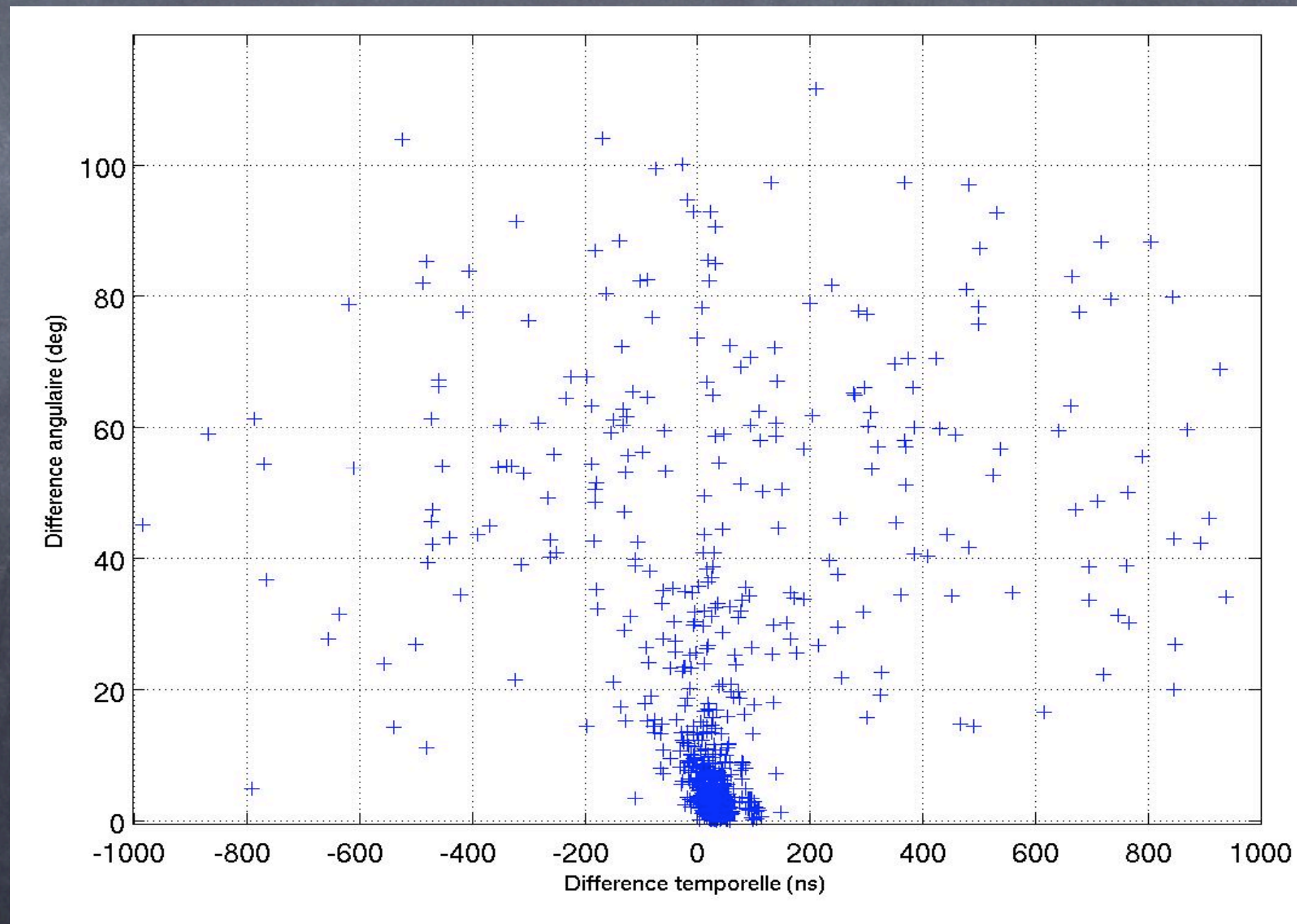
identification des gerbes radio :
comparaison des géométries radio/scintillateur

$(\theta, \phi, t_0)_{\text{radio}}$

$(\theta, \phi, t_0)_{\text{scintillateur}}$

$\delta\Omega, \delta t$

27/11/06–20/03/08
355 jours effectifs
619 coïncidences
(internes et externes)



La radio détection : CODALEMA

identification des gerbes radio :
comparaison des géométries radio/scintillateur

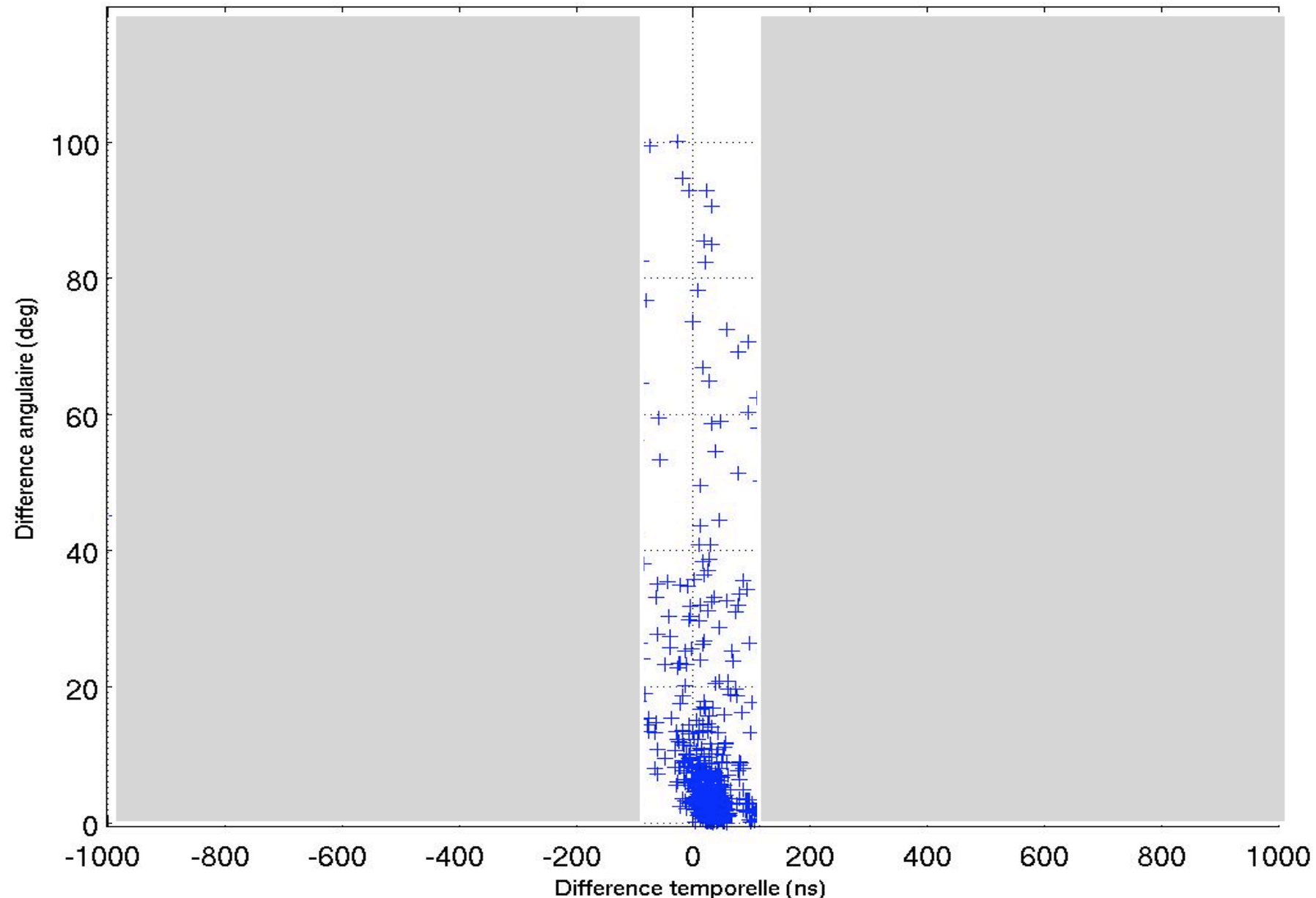
$$(\theta, \phi, t_0)_{\text{radio}}$$

$$(\theta, \phi, t_0)_{\text{scintillateur}}$$

$$\delta\Omega, \delta t$$

$$|\delta t| \leq 100 \text{ ns}$$

27/11/06–20/03/08
355 jours effectifs
619 coïncidences
(internes et externes)



La radio détection : CODALEMA

identification des gerbes radio :
comparaison des géométries radio/scintillateur

$$(\theta, \phi, t_0)_{\text{radio}}$$

$$(\theta, \phi, t_0)_{\text{scintillateur}}$$

$$\delta\Omega, \delta t$$

$$|\delta t| \leq 100 \text{ ns}$$

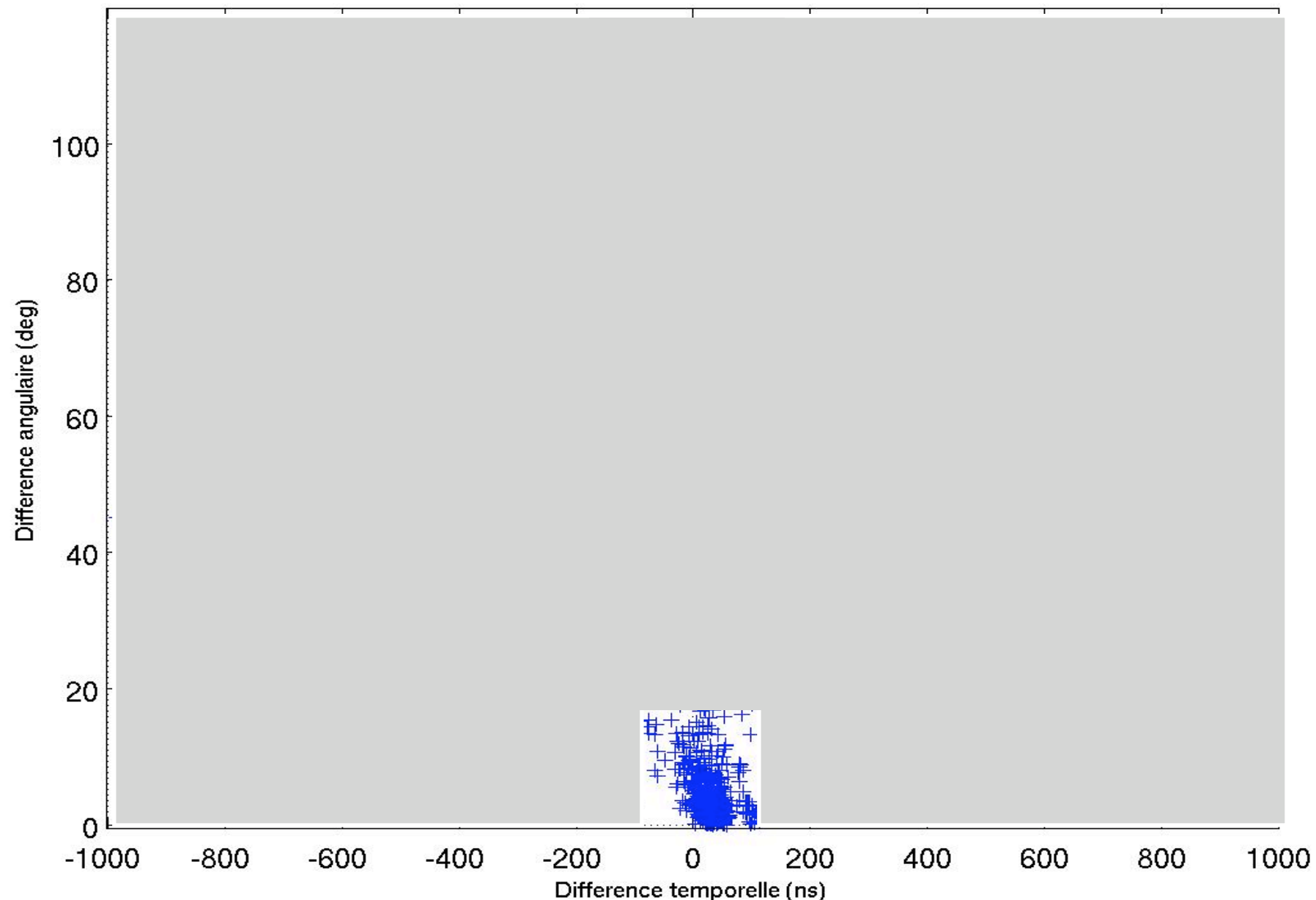
$$\delta\Omega \leq 20^\circ$$

27/11/06–20/03/08

355 jours effectifs

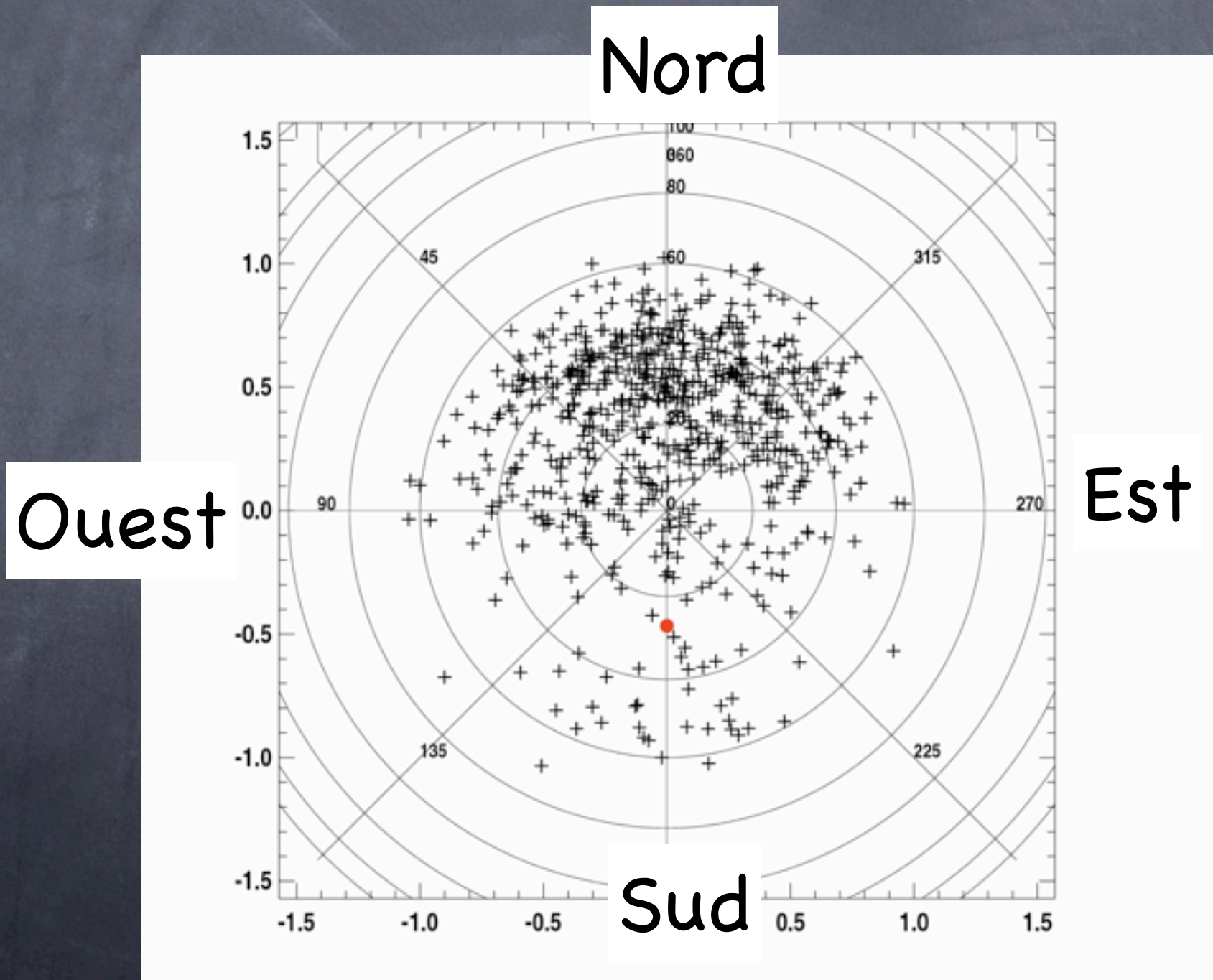
619 coïncidences

(internes et externes)



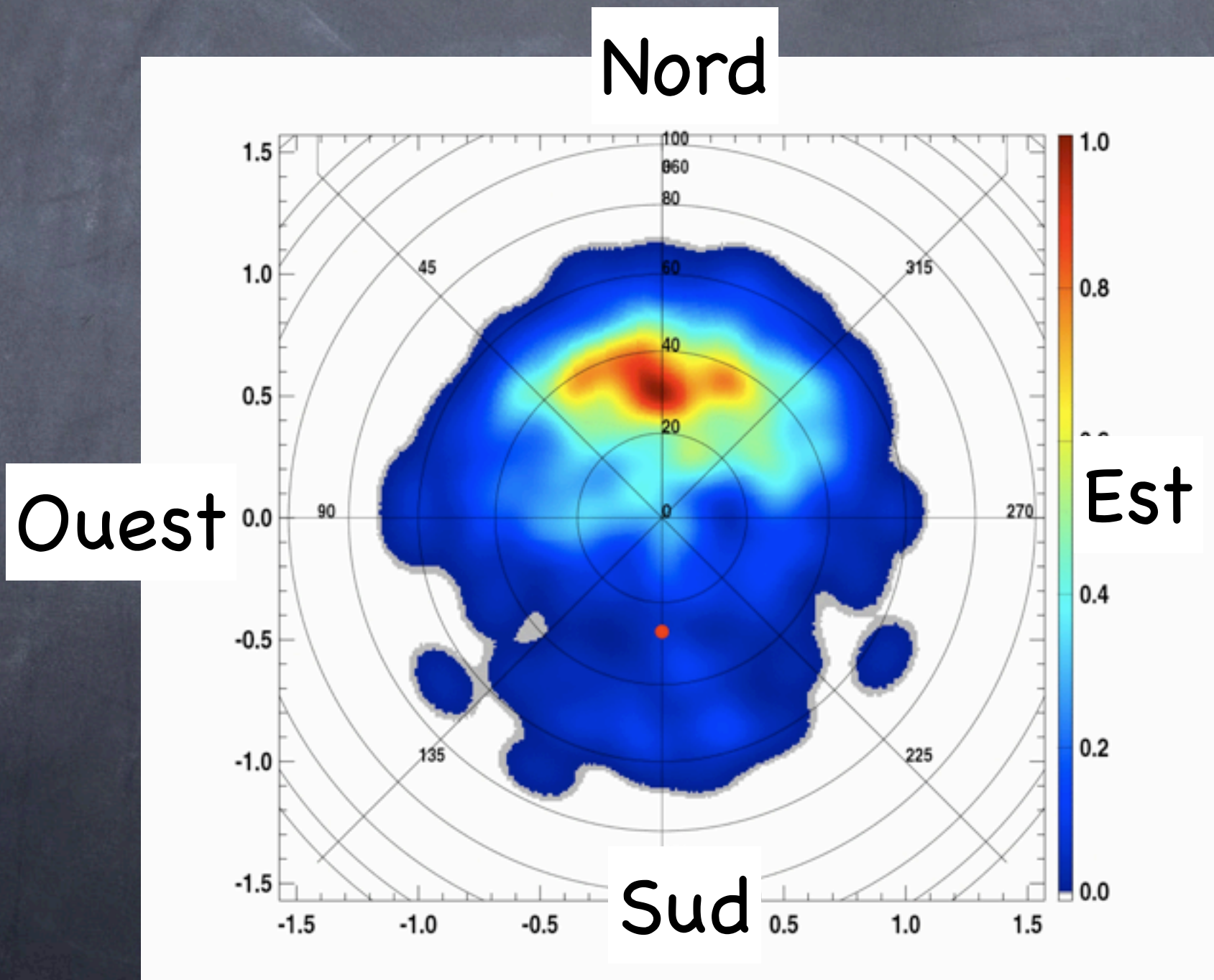
La radio détection : CODALEMA

asymétrie dans les directions d'arrivée, à partir
des internes (énergie, cœur, direction) et des
externes (direction seule)



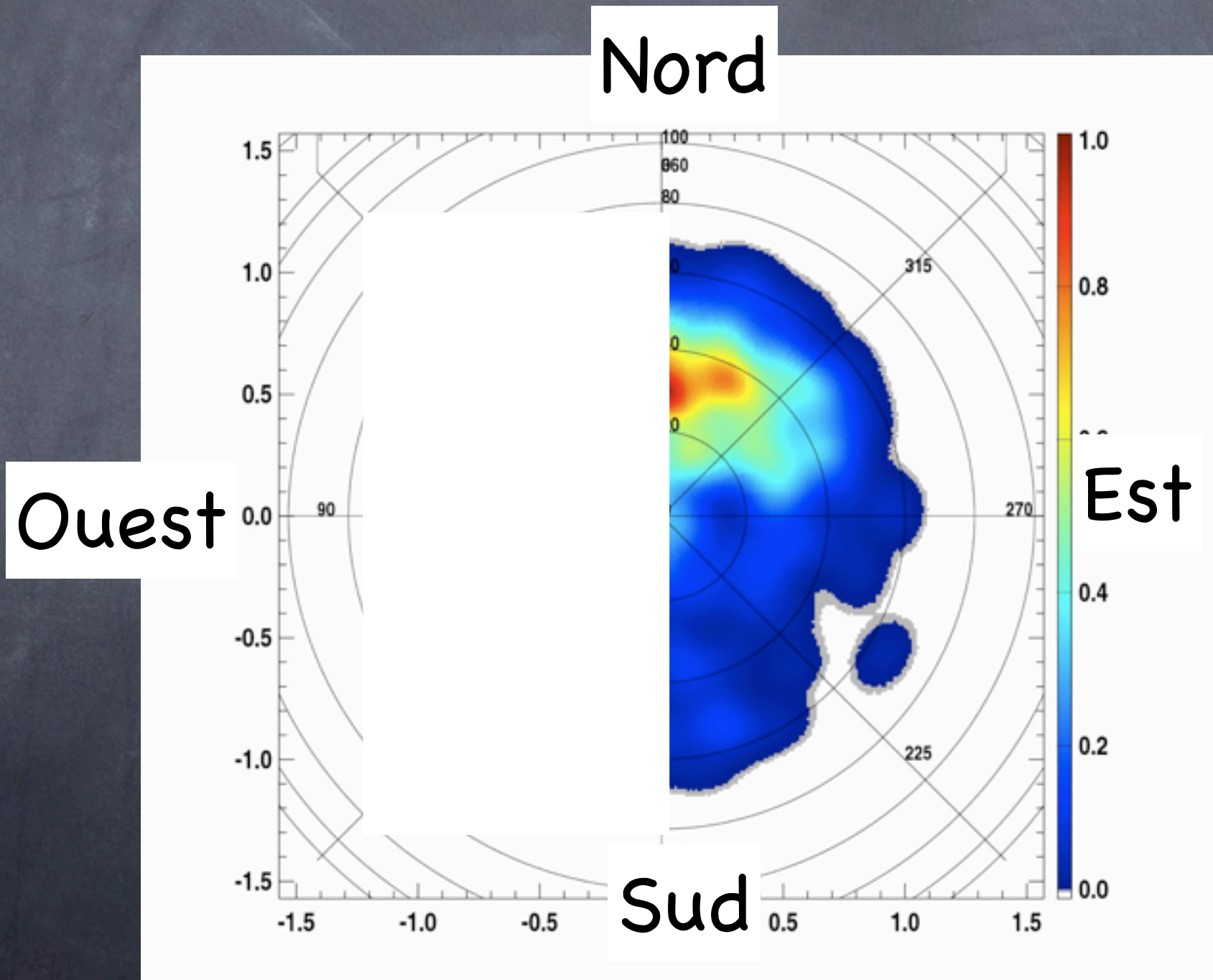
La radio détection : CODALEMA

asymétrie dans les directions d'arrivée, à partir des internes (énergie, cœur, direction) et des externes (direction seule)



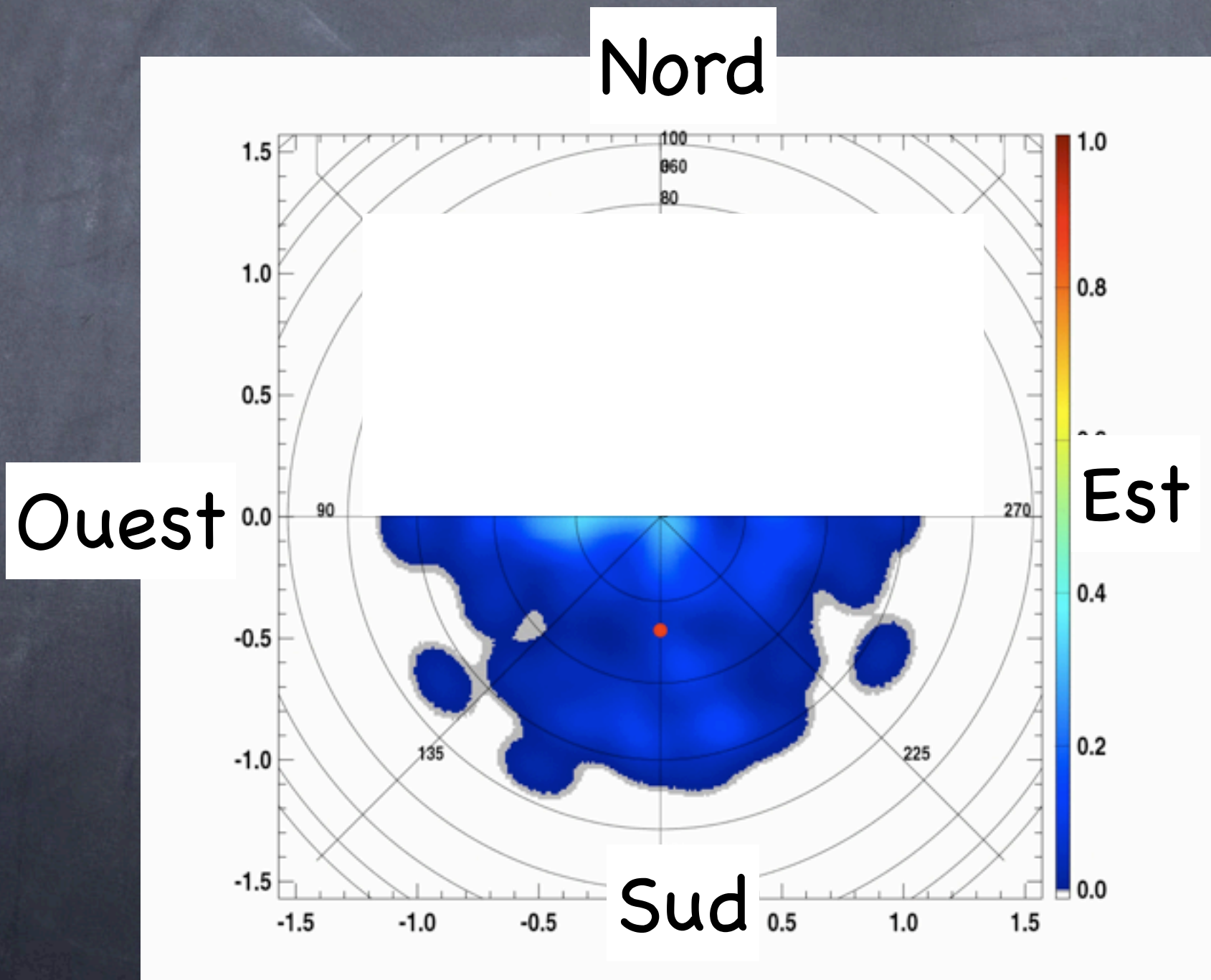
La radio détection : CODALEMA

asymétrie dans les directions d'arrivée, à partir
des internes (énergie, cœur, direction) et des
externes (direction seule)



La radio détection : CODALEMA

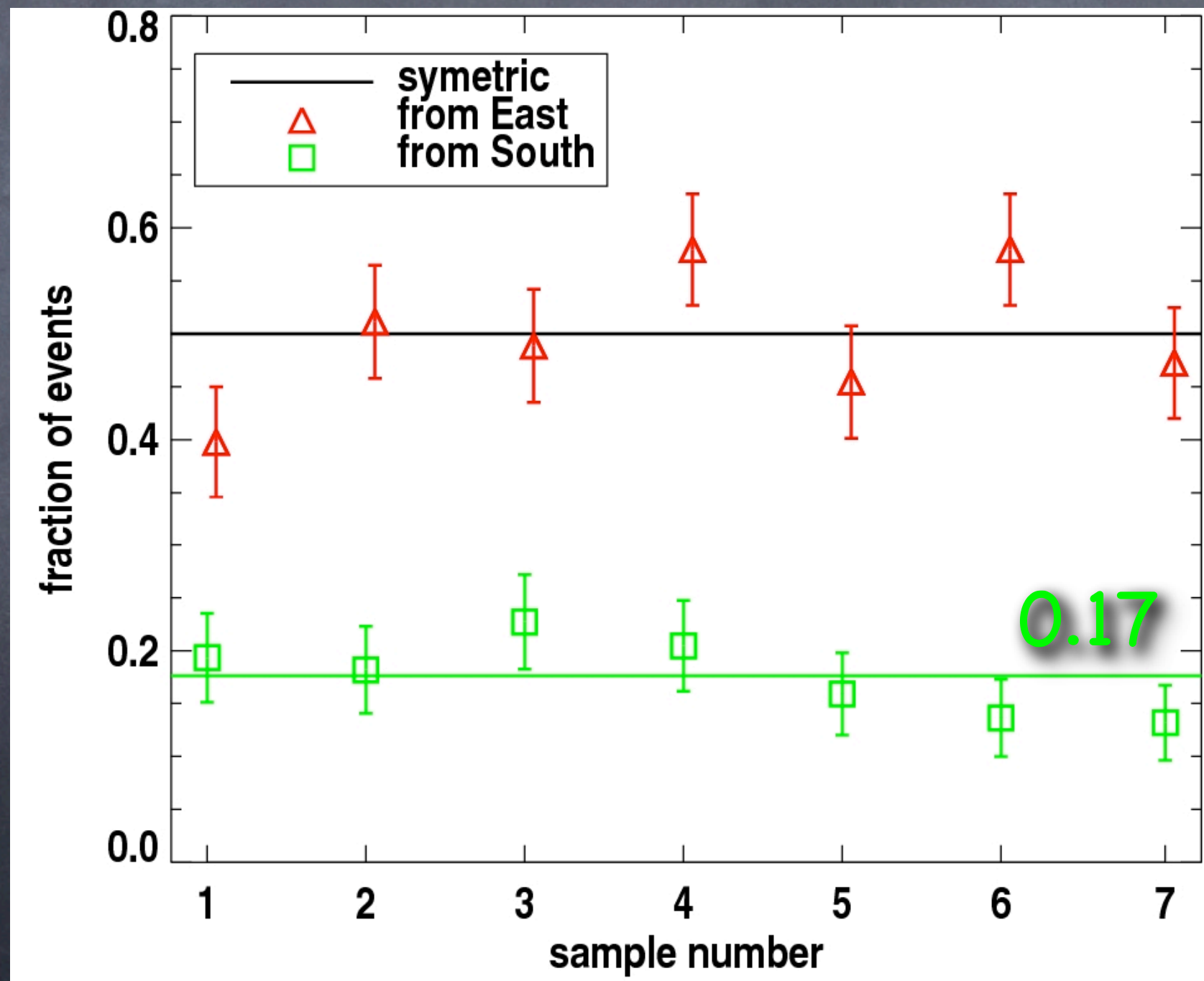
asymétrie dans les directions d'arrivée, à partir des internes (énergie, cœur, direction) et des externes (direction seule)



La radio détection : CODALEMA

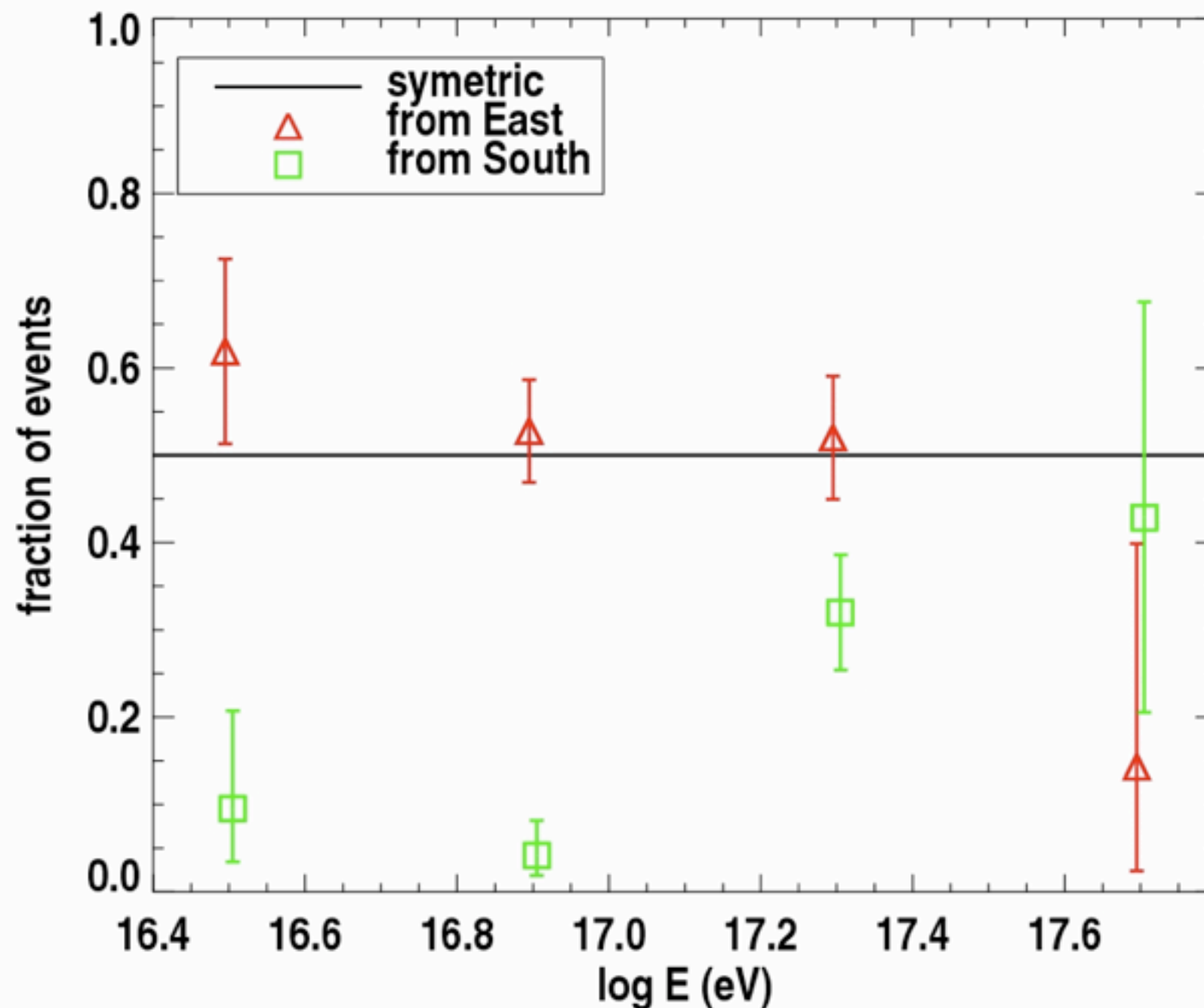
l'asymétrie est stable dans le temps
(7 sous-ensembles d'événements de même population)

4.8 fois plus d'événements venant du Nord



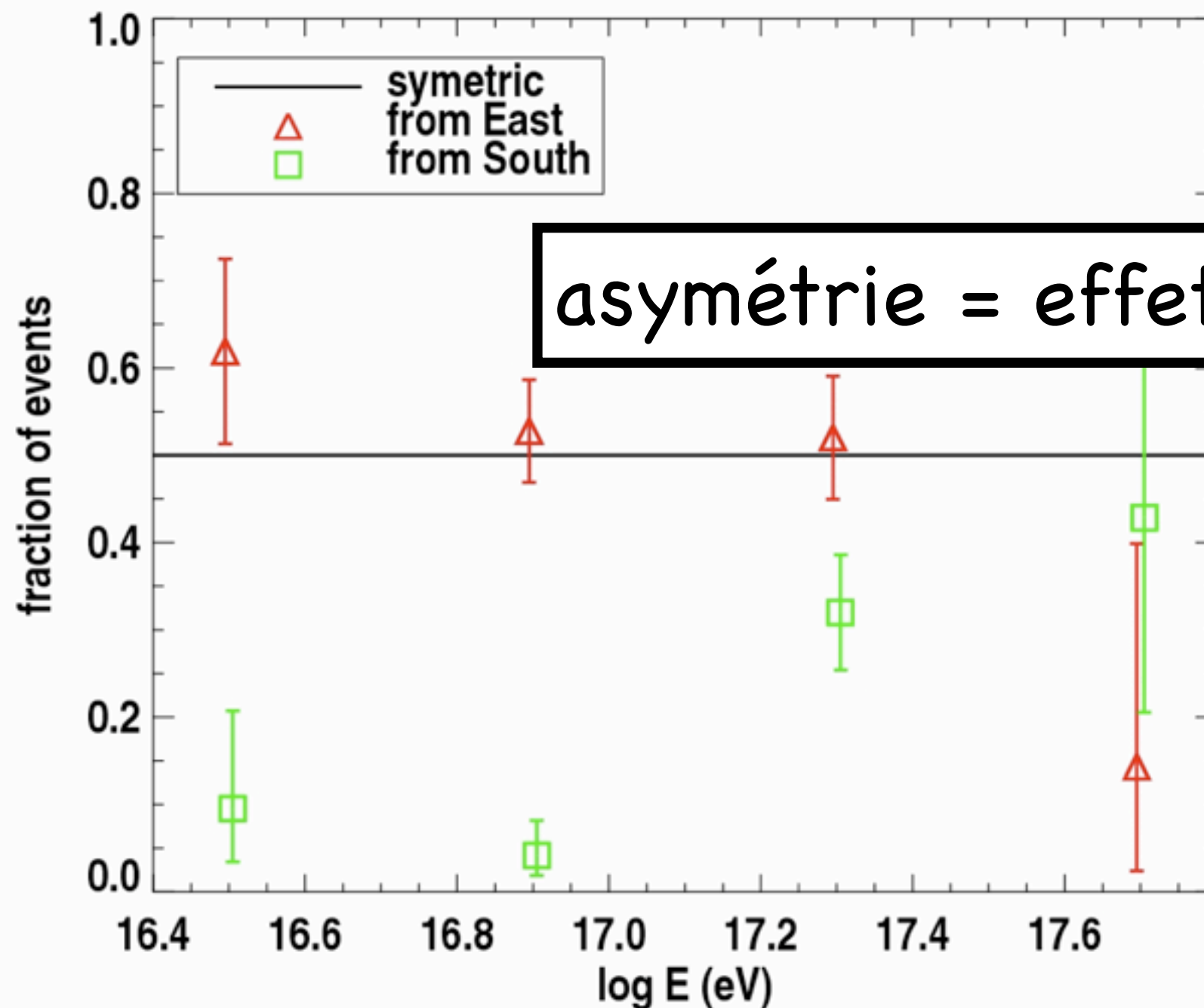
La radio détection : CODALEMA

asymétrie dans les directions d'arrivée, à partir des internes (énergie, cœur, direction) et des externes (direction seule)



La radio détection : CODALEMA

asymétrie dans les directions d'arrivée, à partir des internes (énergie, cœur, direction) et des externes (direction seule)



La radio détection : CODALEMA

MAIS

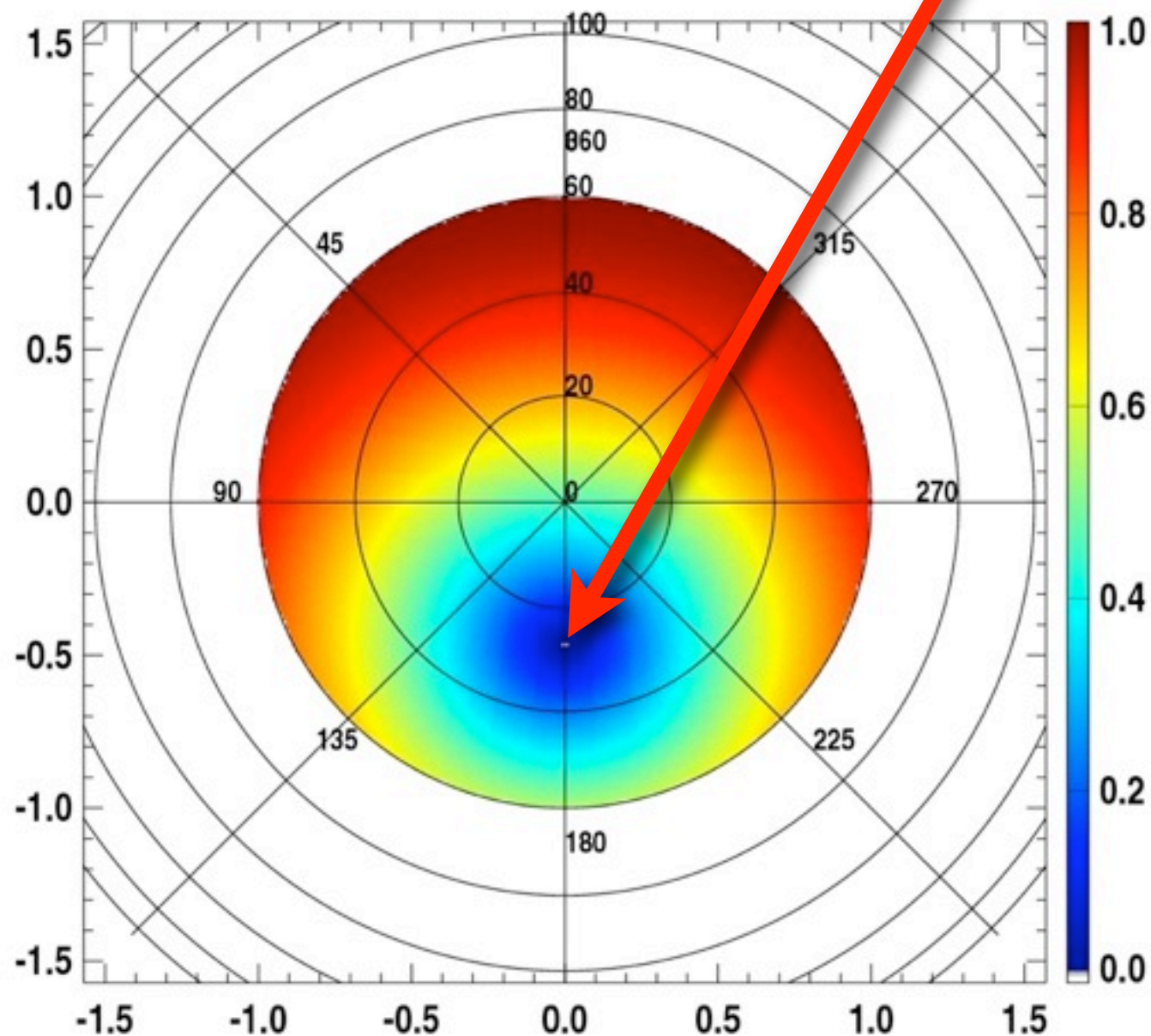
$$\vec{E}_{\text{radiatif}} \propto \vec{\beta} \times \vec{B}$$

hypothèse supplémentaire : la probabilité de trigger est proportionnelle à la norme de \vec{E} , ce qui nous permet de **construire une carte de densité d'événements** selon notre **modèle géomagnétique**

La radio détection : CODALEMA

ingrédients :

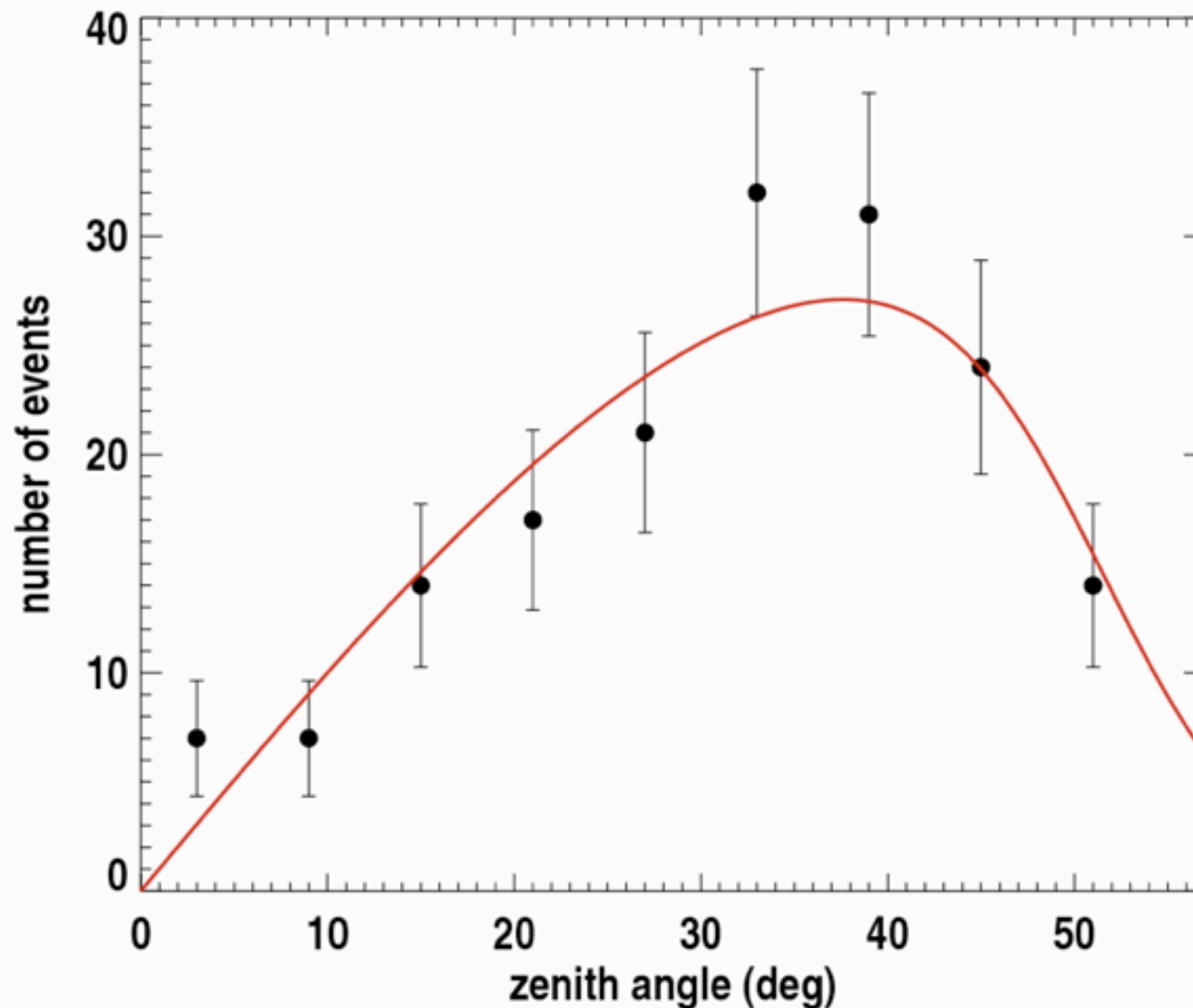
$$\vec{E}_{\text{radiatif}} \propto \vec{\beta} \times \vec{B}$$



La radio détection : CODALEMA

ingrédients :

prendre la distribution zénithale du trigger

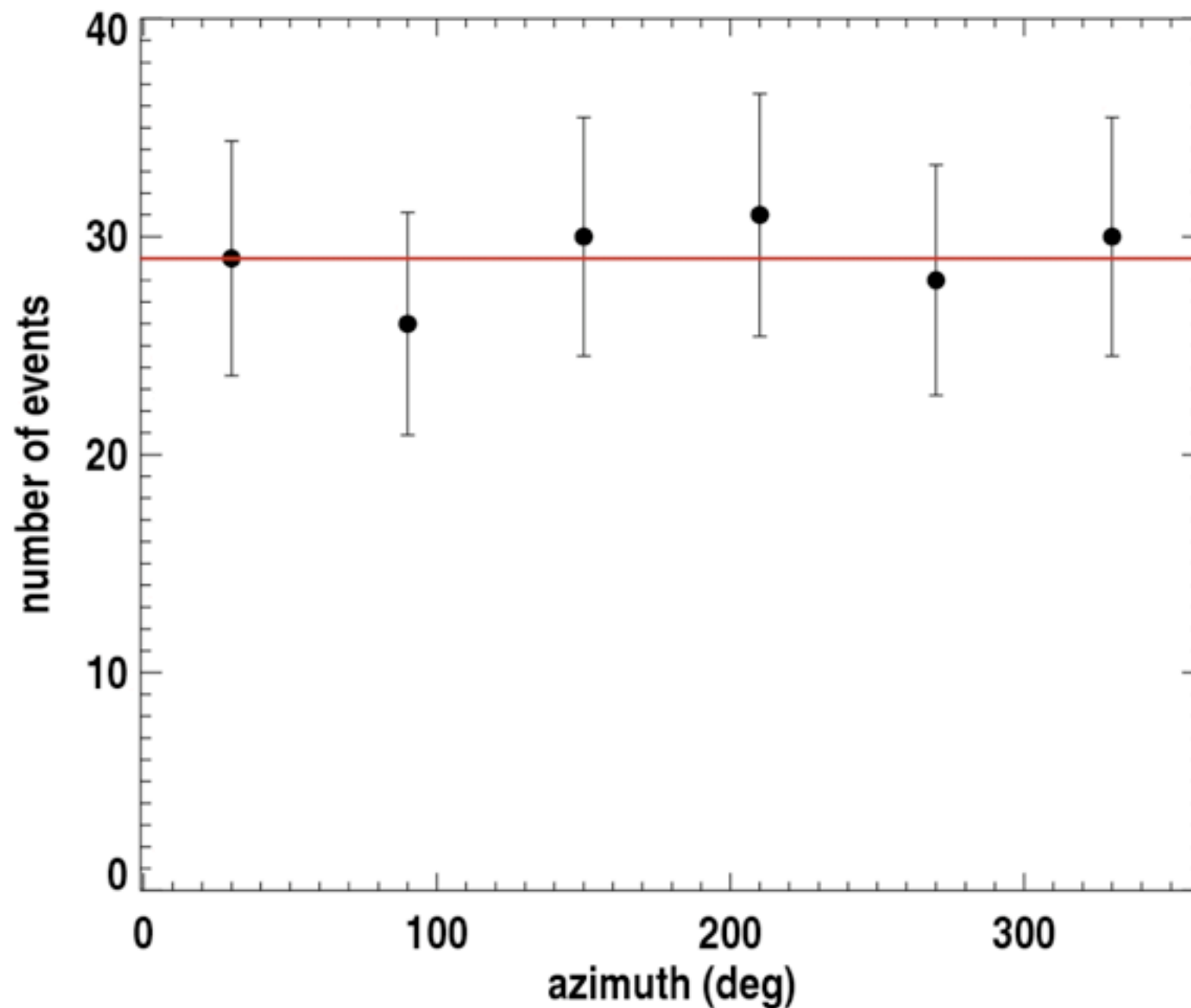


$$\frac{dN}{d\theta}$$

La radio détection : CODALEMA

ingrédients :

prendre la distribution azimuthale du trigger

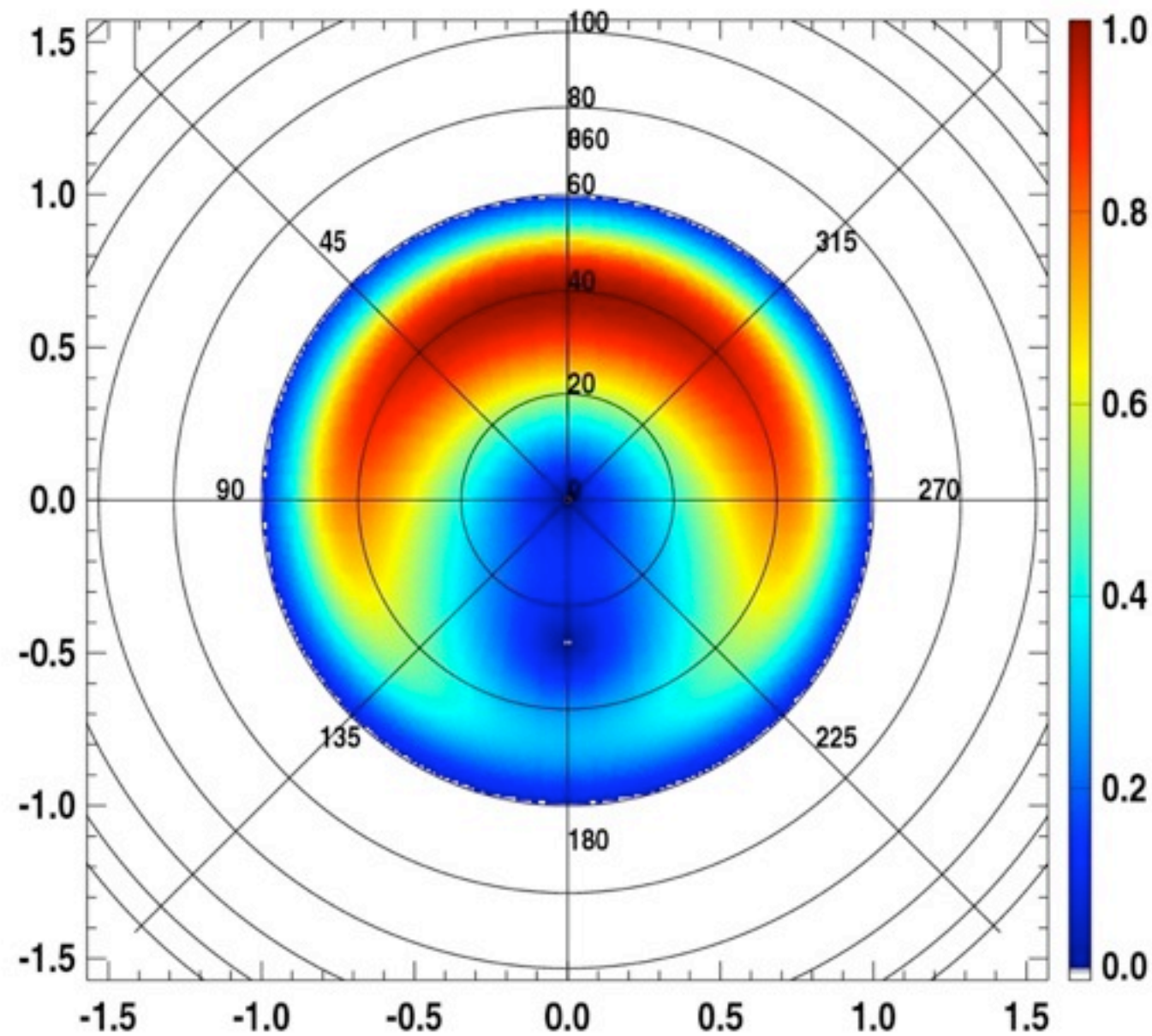


$$\frac{dN}{d\theta}$$

$$\frac{dN}{d\phi}$$

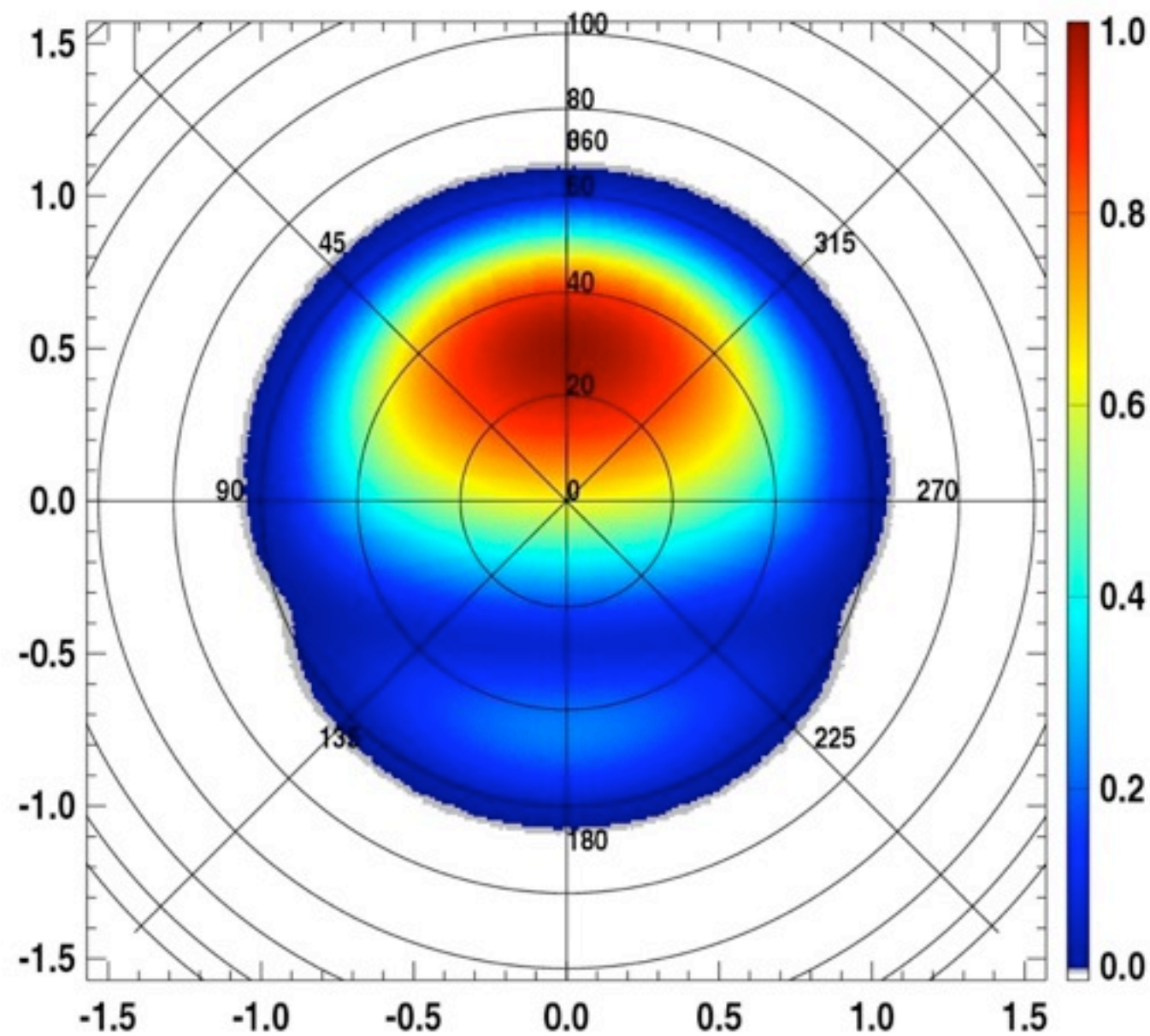
La radio détection : CODALEMA

$$(\vec{\beta} \times \vec{B}) \cdot \frac{dN}{d\theta} \cdot \frac{dN}{d\phi}$$



La radio détection : CODALEMA

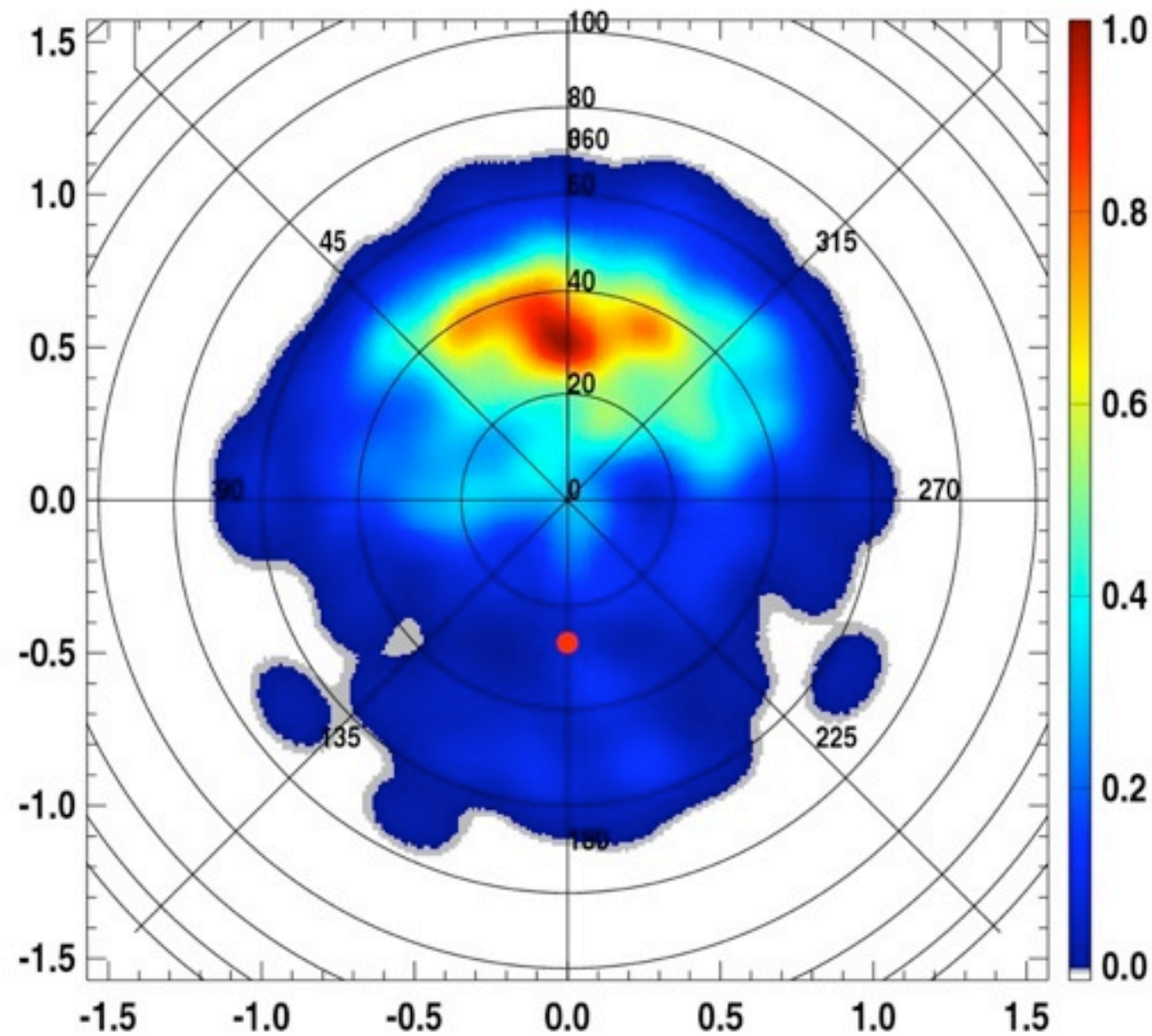
$$(\vec{\beta} \times \vec{B})_{EW} \cdot \frac{dN}{d\theta} \cdot \frac{dN}{d\phi} \cdot \frac{1}{\sin \theta}$$



La radio détection : CODALEMA

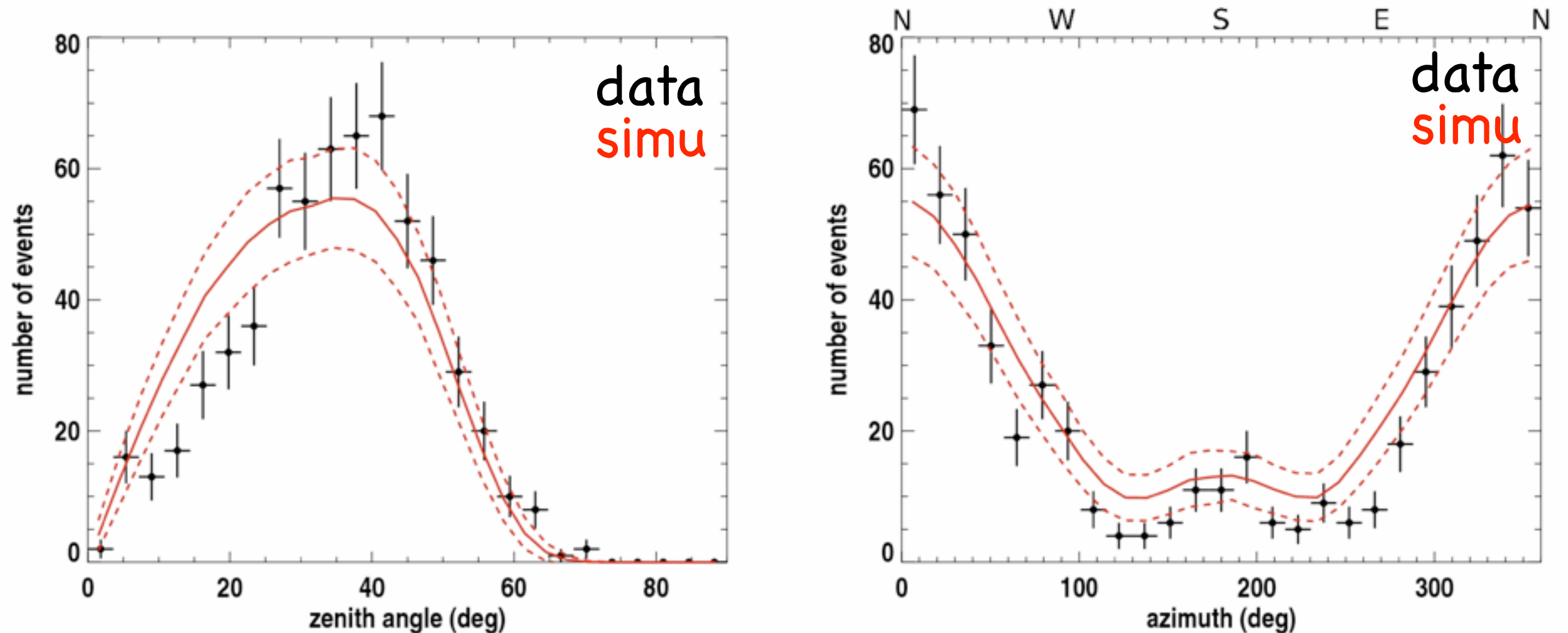
L'accord visuel est bon !

Test avec simulation Monte-Carlo



La radio détection : CODALEMA

Test avec simulation Monte-Carlo :
on génère N tirages de p événements, p étant le
nombre d'événements présents dans le lot de données
puis calcul des distributions angulaires

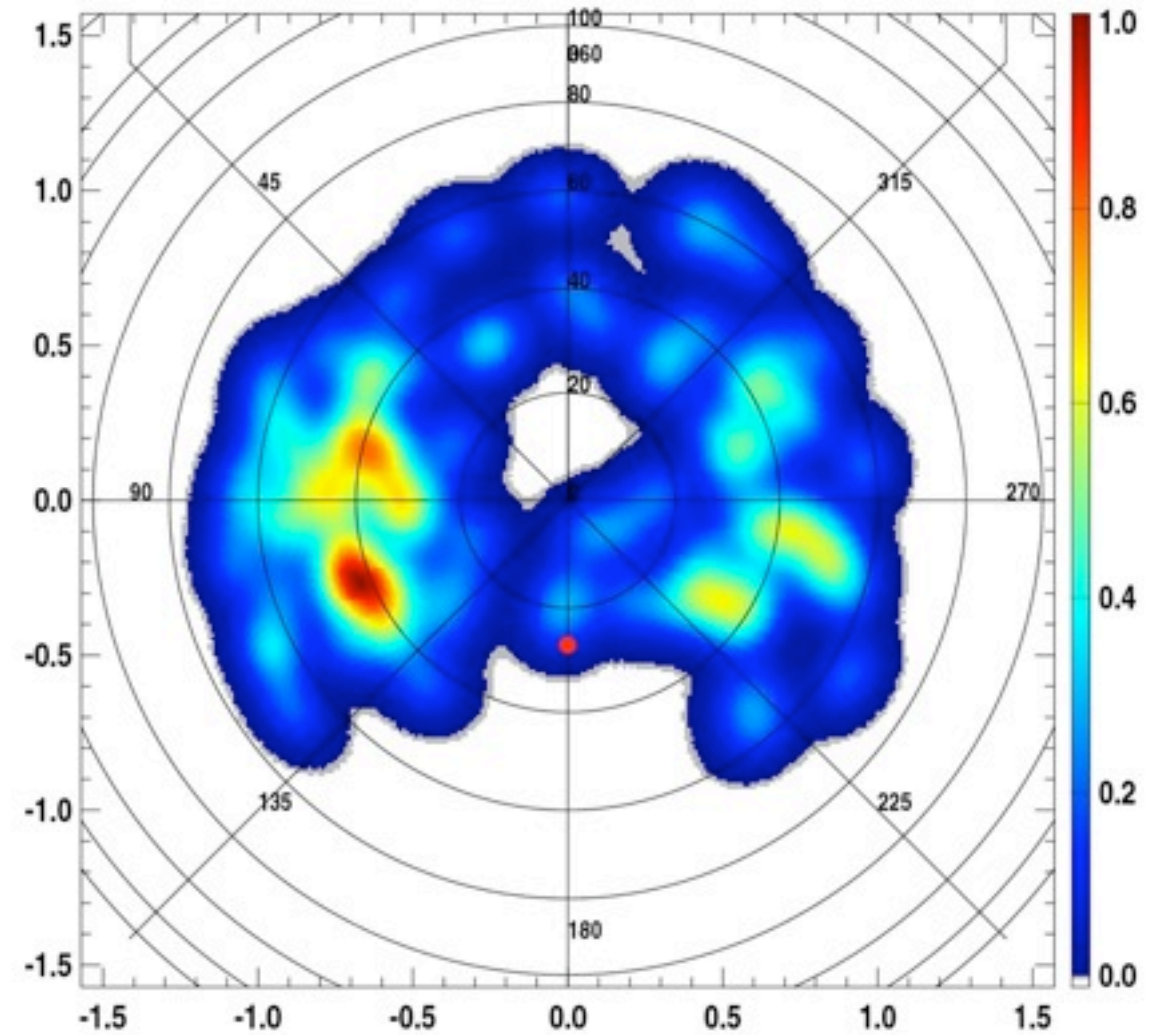
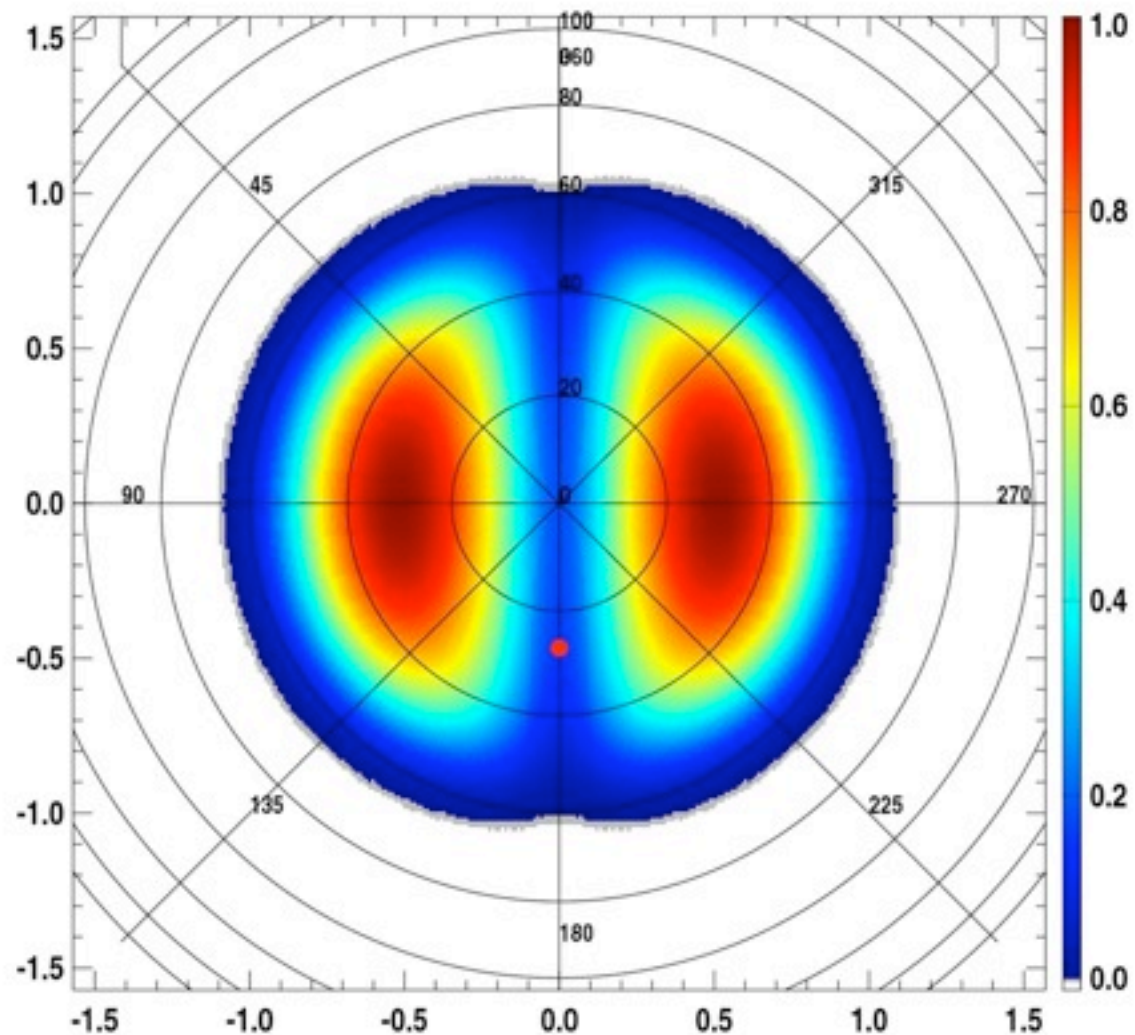


La radio détection : CODALEMA

accord satisfaisant aussi en polarisation NS
(mais seulement 3 antennes et bien moins de données)

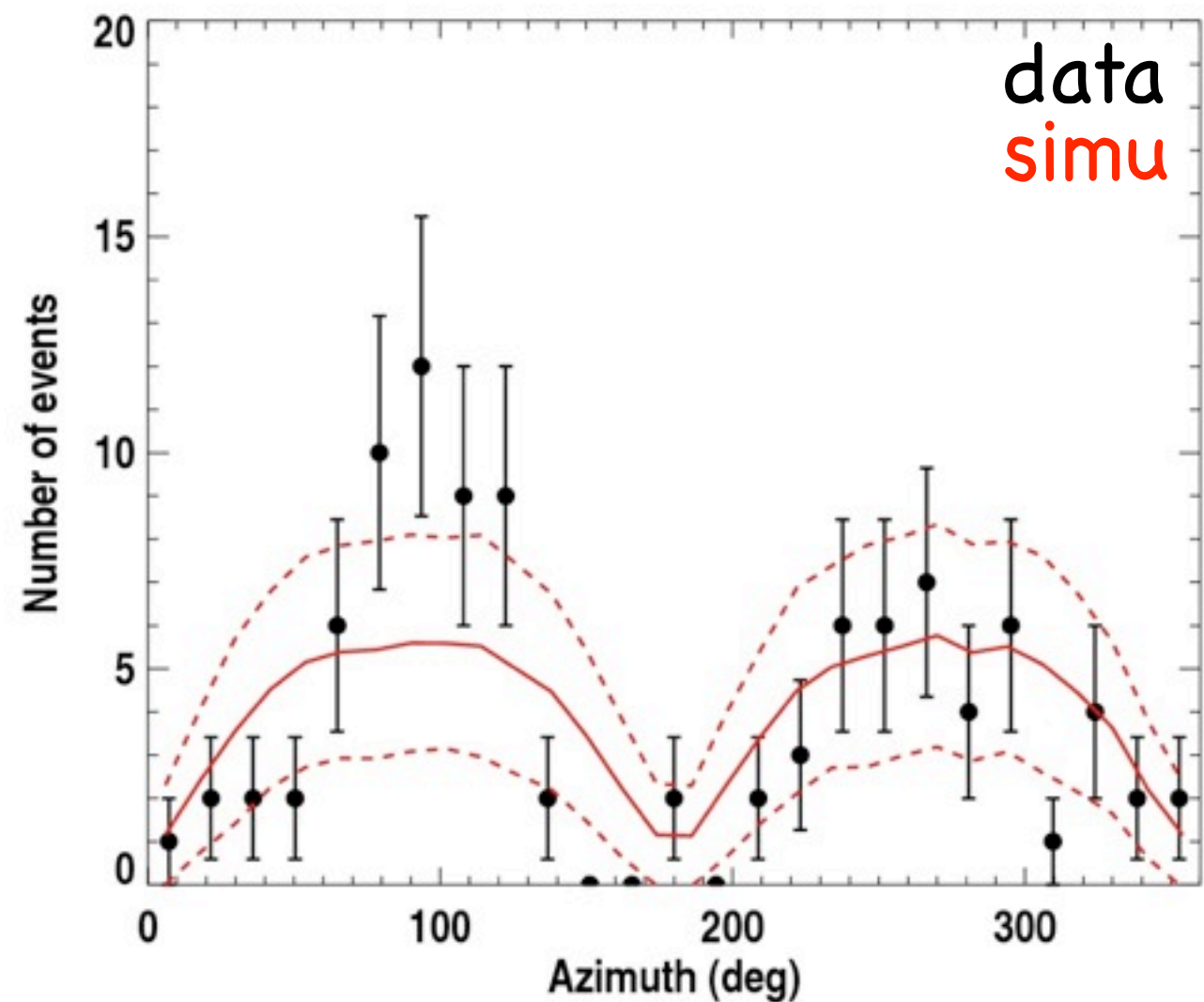
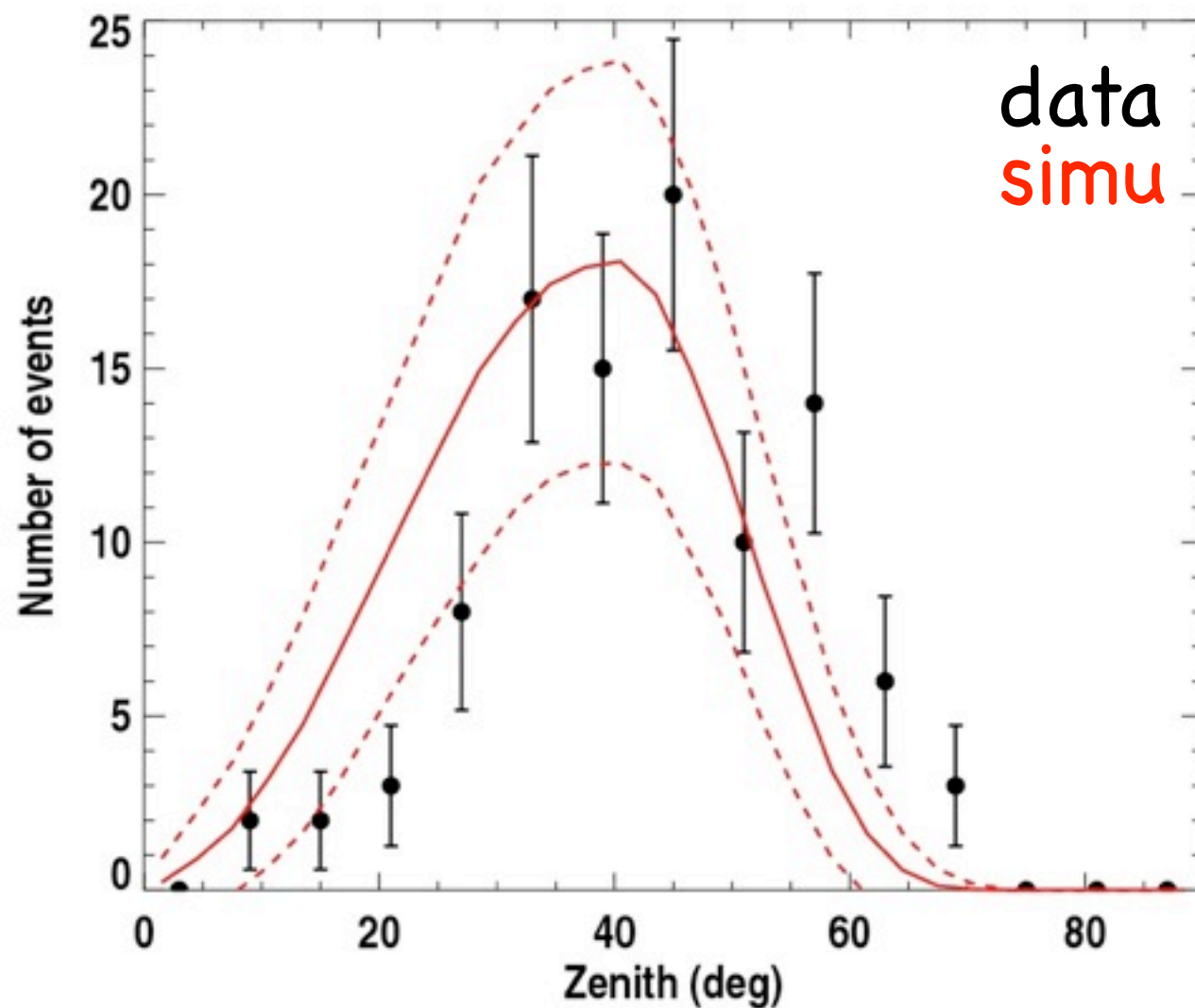
$$(\vec{\beta} \times \vec{B})_{\text{NS}} \cdot \frac{dN}{d\theta} \cdot \frac{dN}{d\phi} \cdot \frac{1}{\sin \theta}$$

données en polarisation NS



La radio détection : CODALEMA

puis comparaison avec des simulations Monte-Carlo

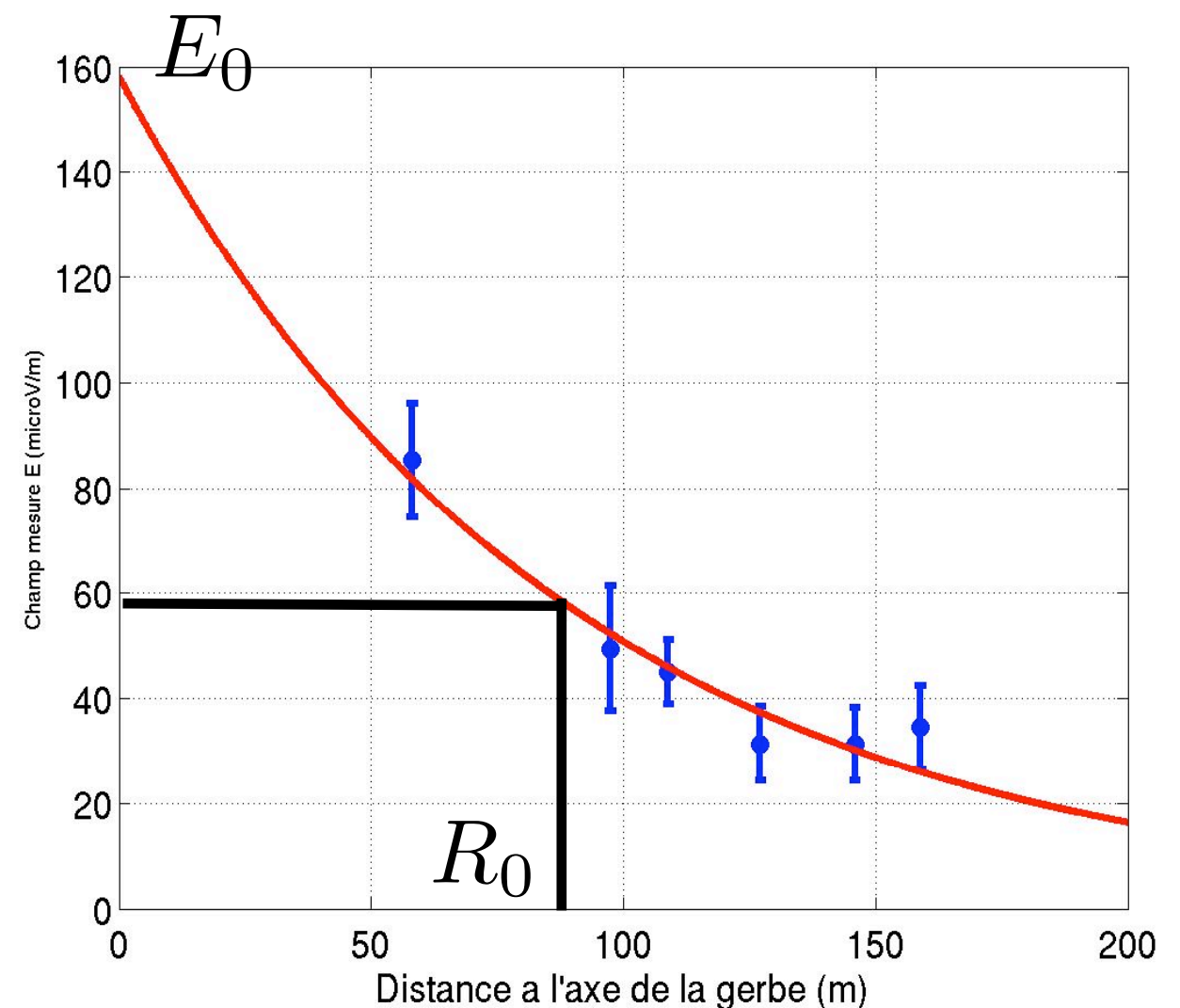
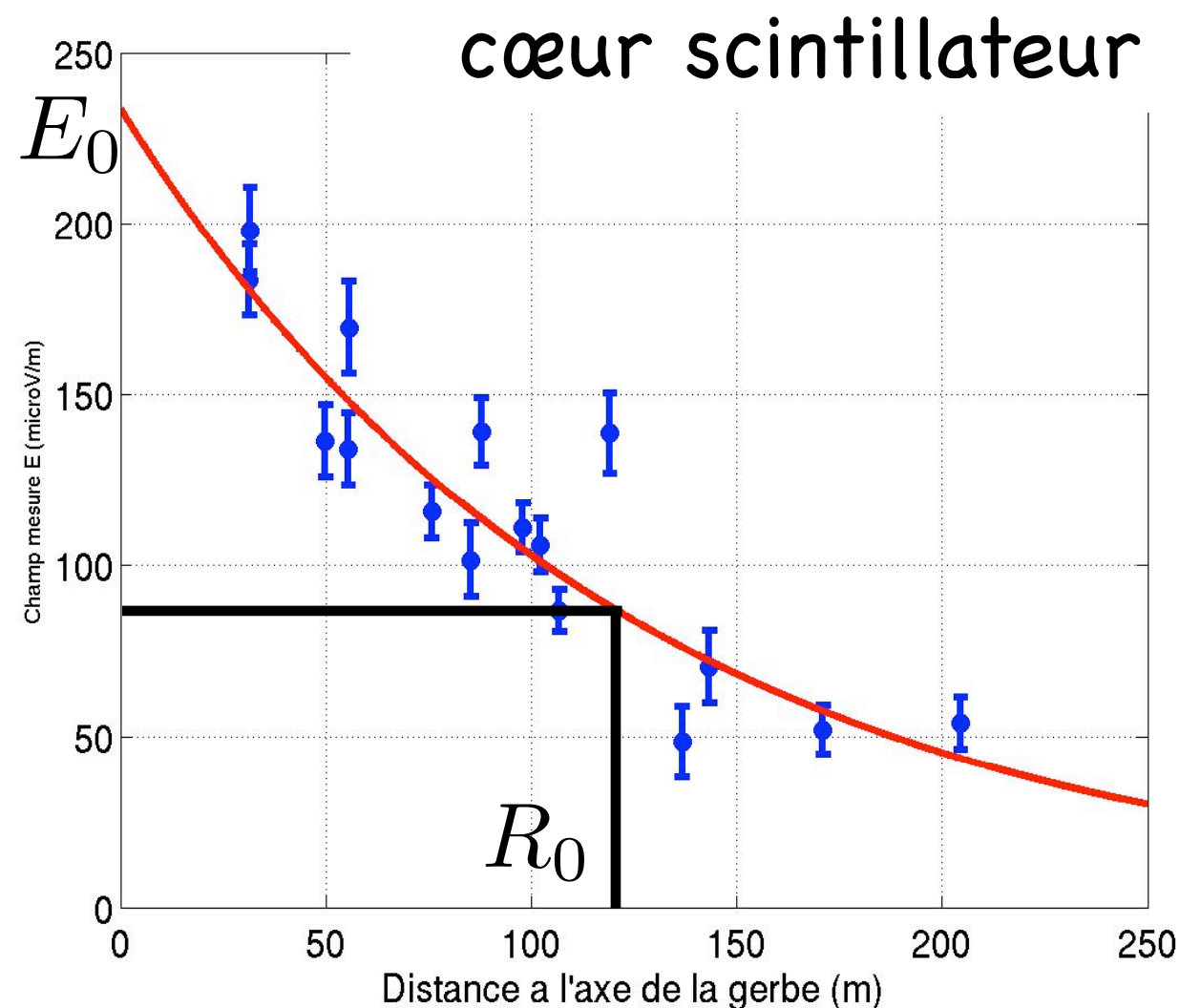


La radio détection : CODALEMA

amplitude du champ et lien avec l'énergie du primaire

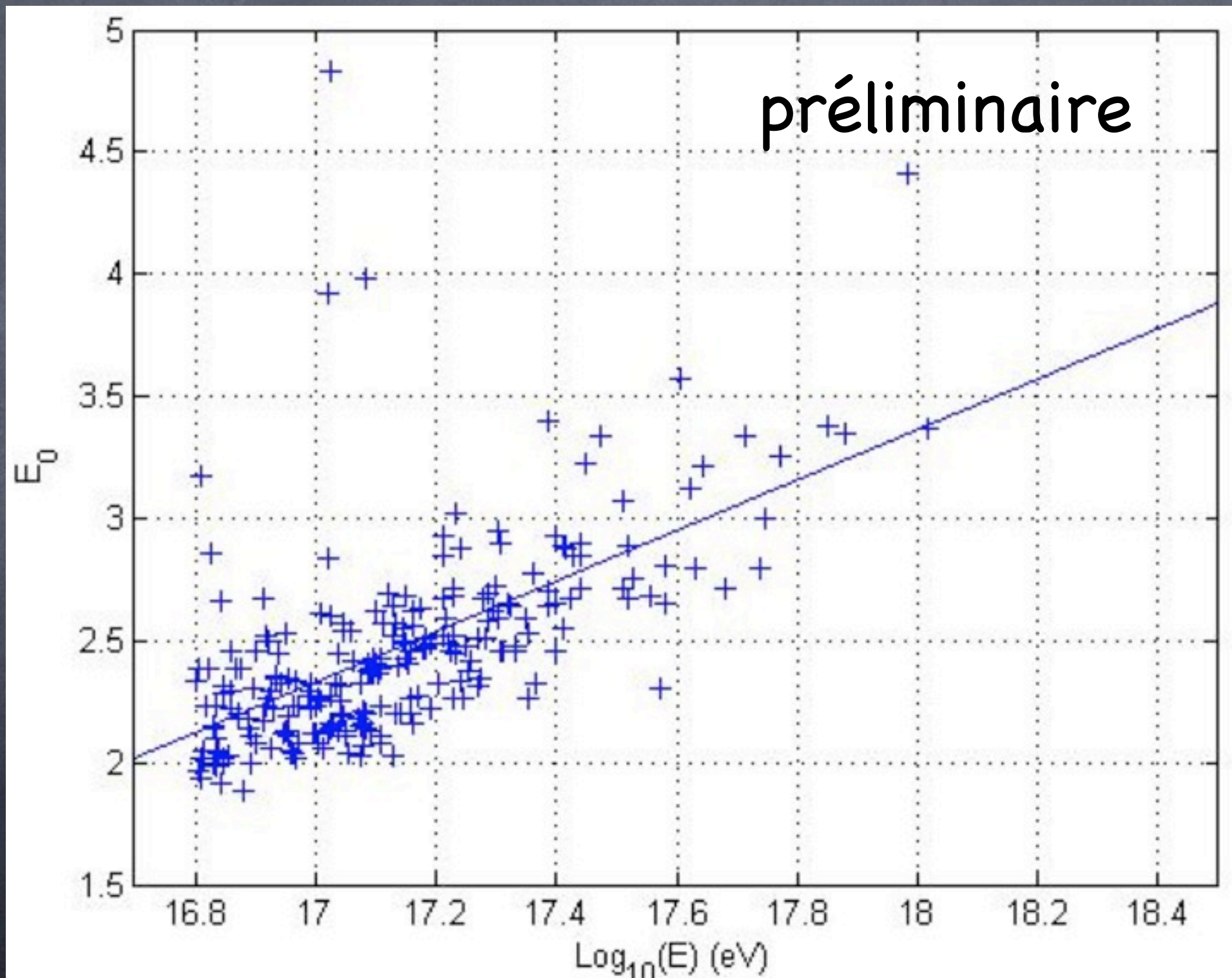
$$\mathcal{E}_\nu = 20 \left(\frac{E_P}{10^{17} \text{ eV}} \right) \sin \alpha \cos \theta \exp \left(-\frac{R}{R_0(\nu, \theta)} \right) .$$

$\varepsilon \propto E_0 \exp(-R/R_0)$ équivalent d'une **LDF**

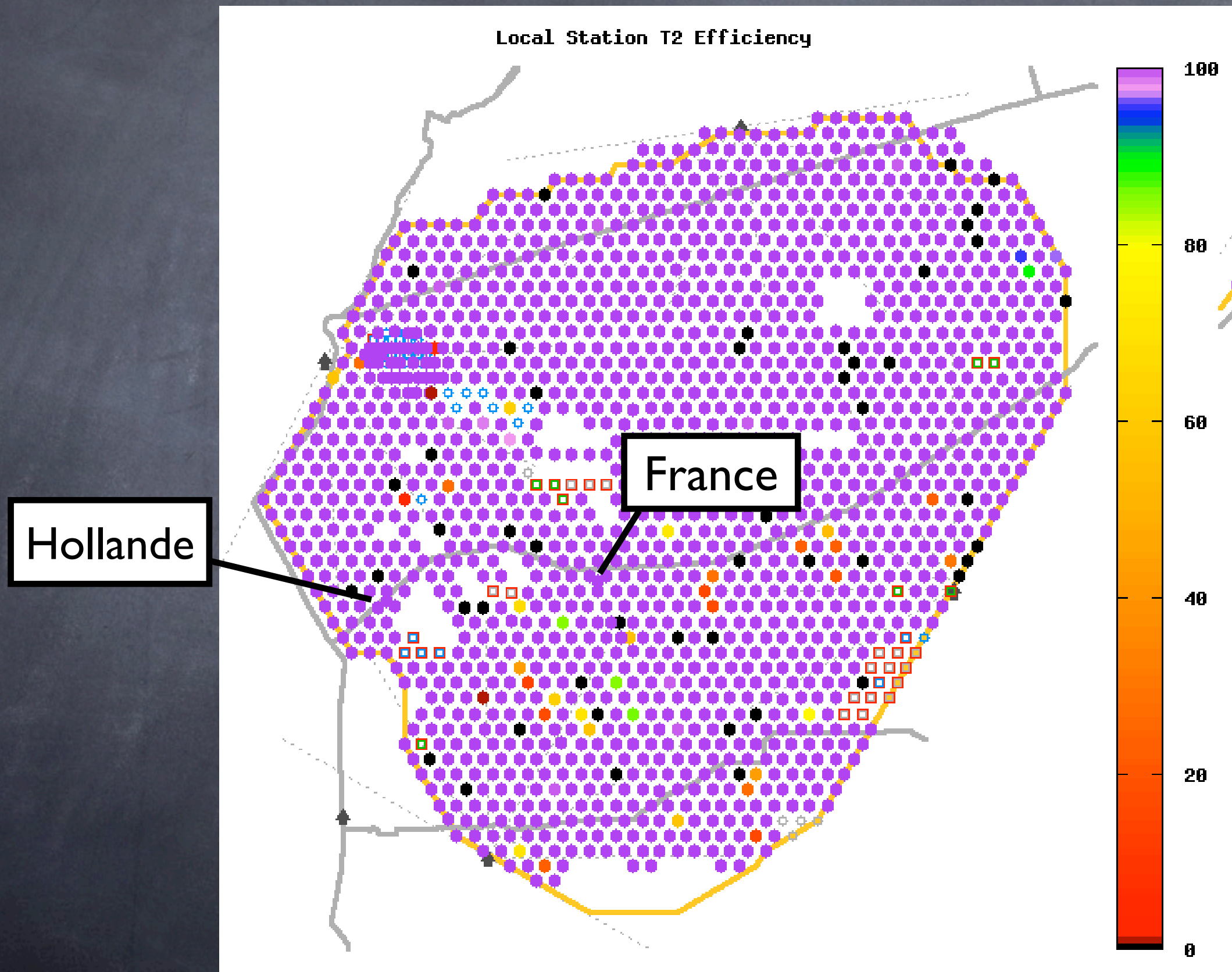


La radio détection : CODALEMA

amplitude du champ et lien avec l'énergie du primaire

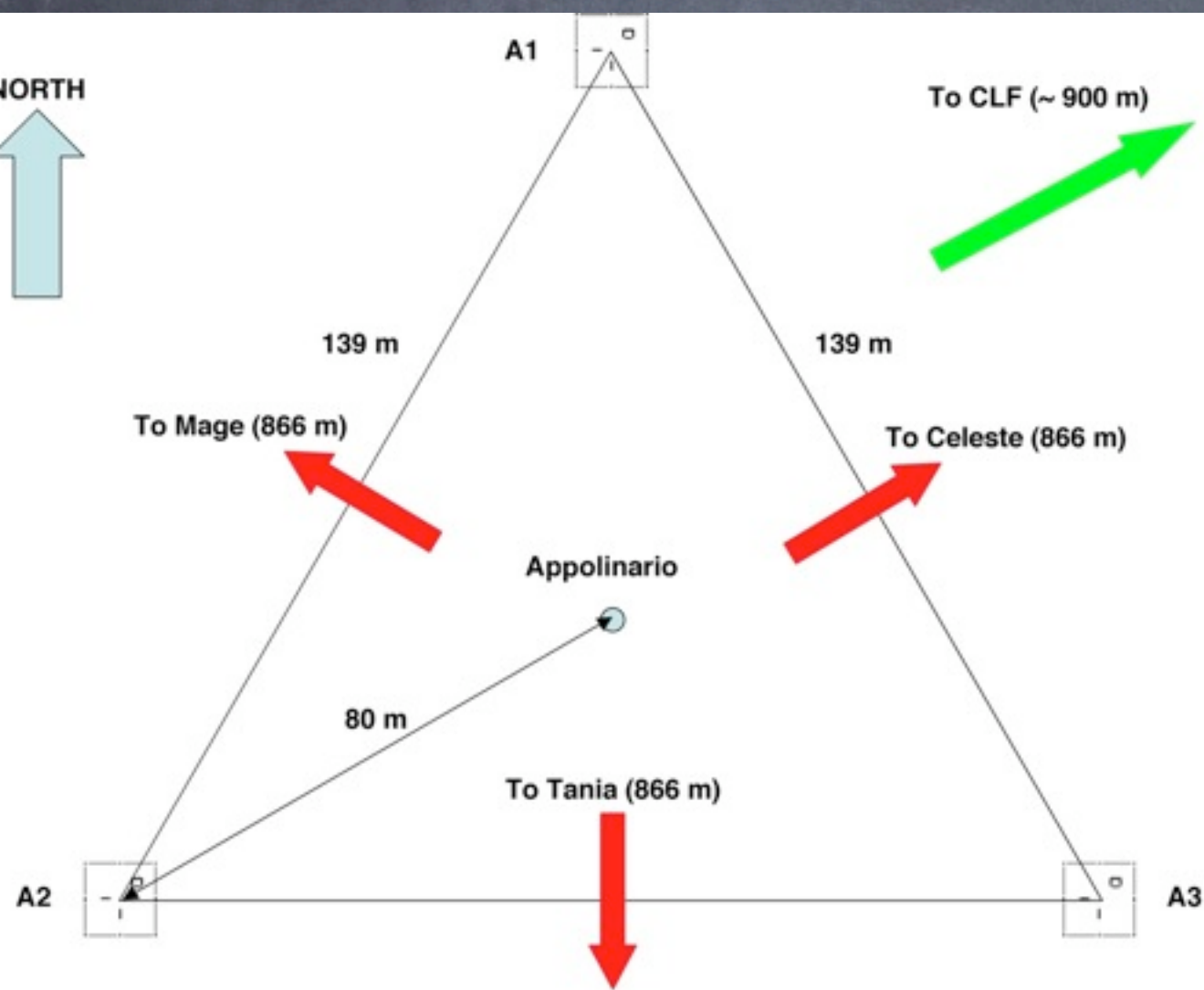


La radio détection : en Argentine

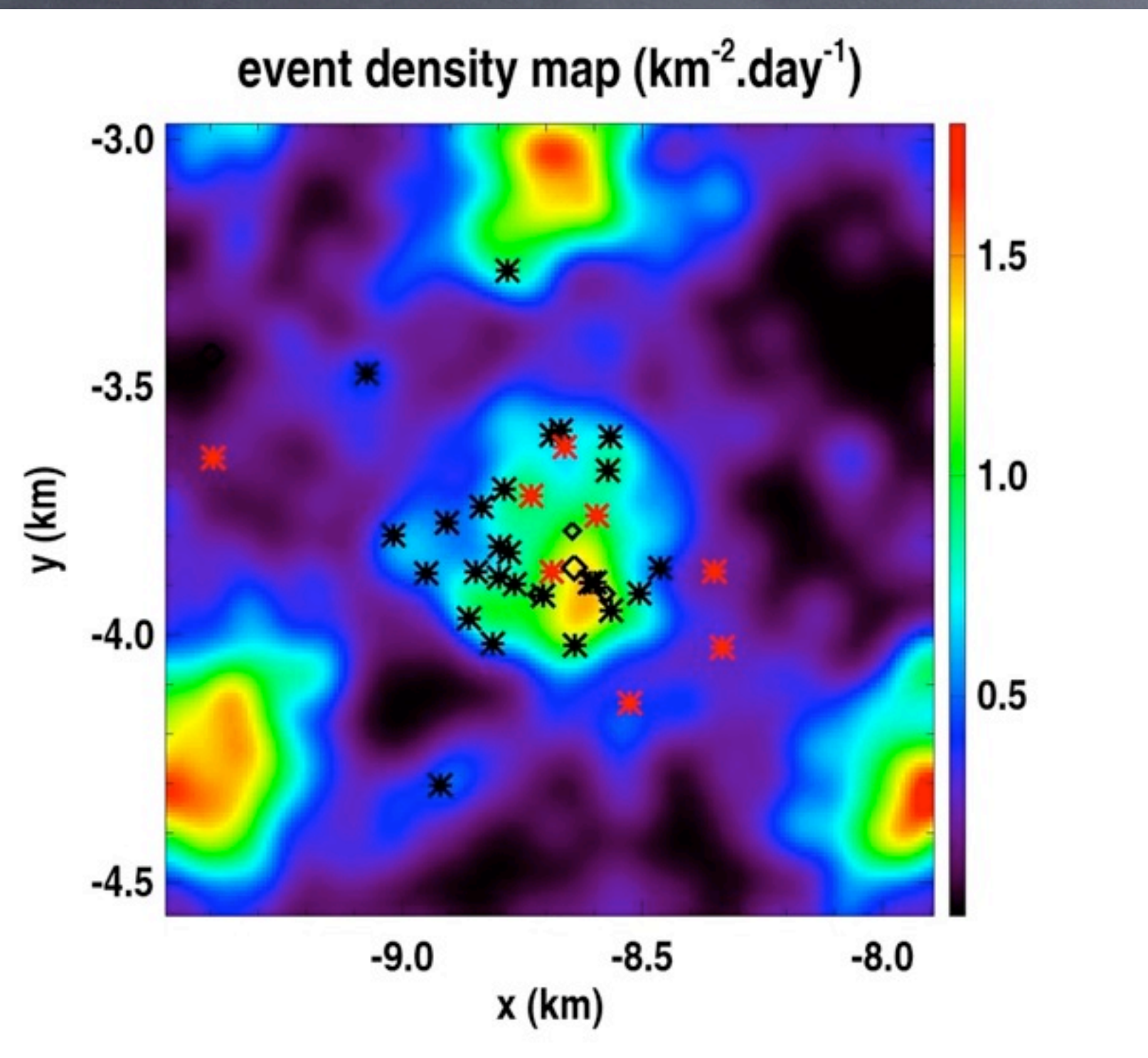


La radio détection : en Argentine

premier prototype 100 % autonome (acquisition, transfert WIFI, panneaux solaires et batteries)
même dipôle qu'à Nançay
2 mesures de polarisation,
recherche de coïncidences offline avec Auger SD



La radio détection : en Argentine



première détection en
juillet 2007

39 événements en
coïncidence avec Auger SD

détection d'événements
d'axe à 1 km des antennes

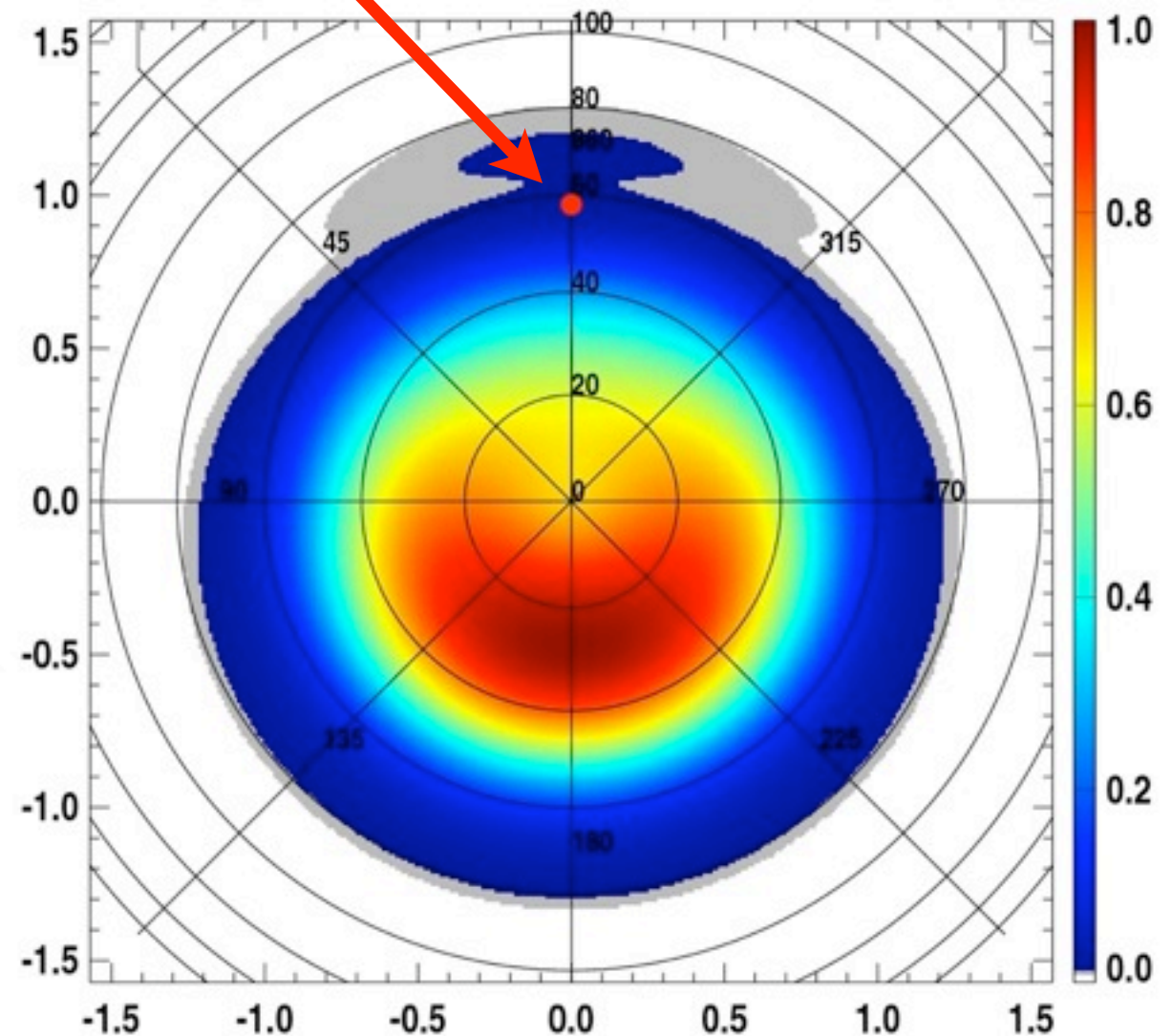
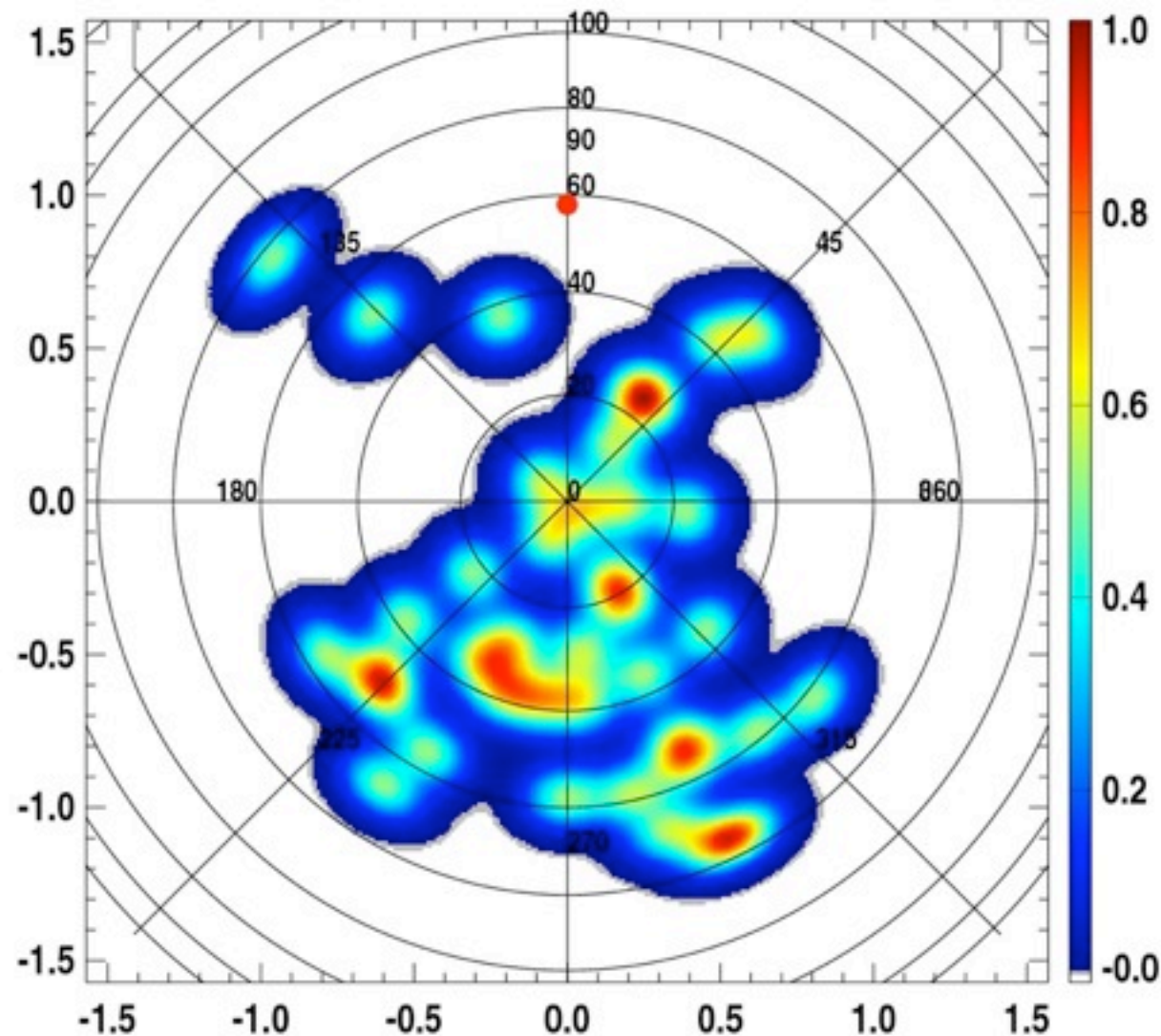
détection d'événements
horizontaux

La radio détection : en Argentine

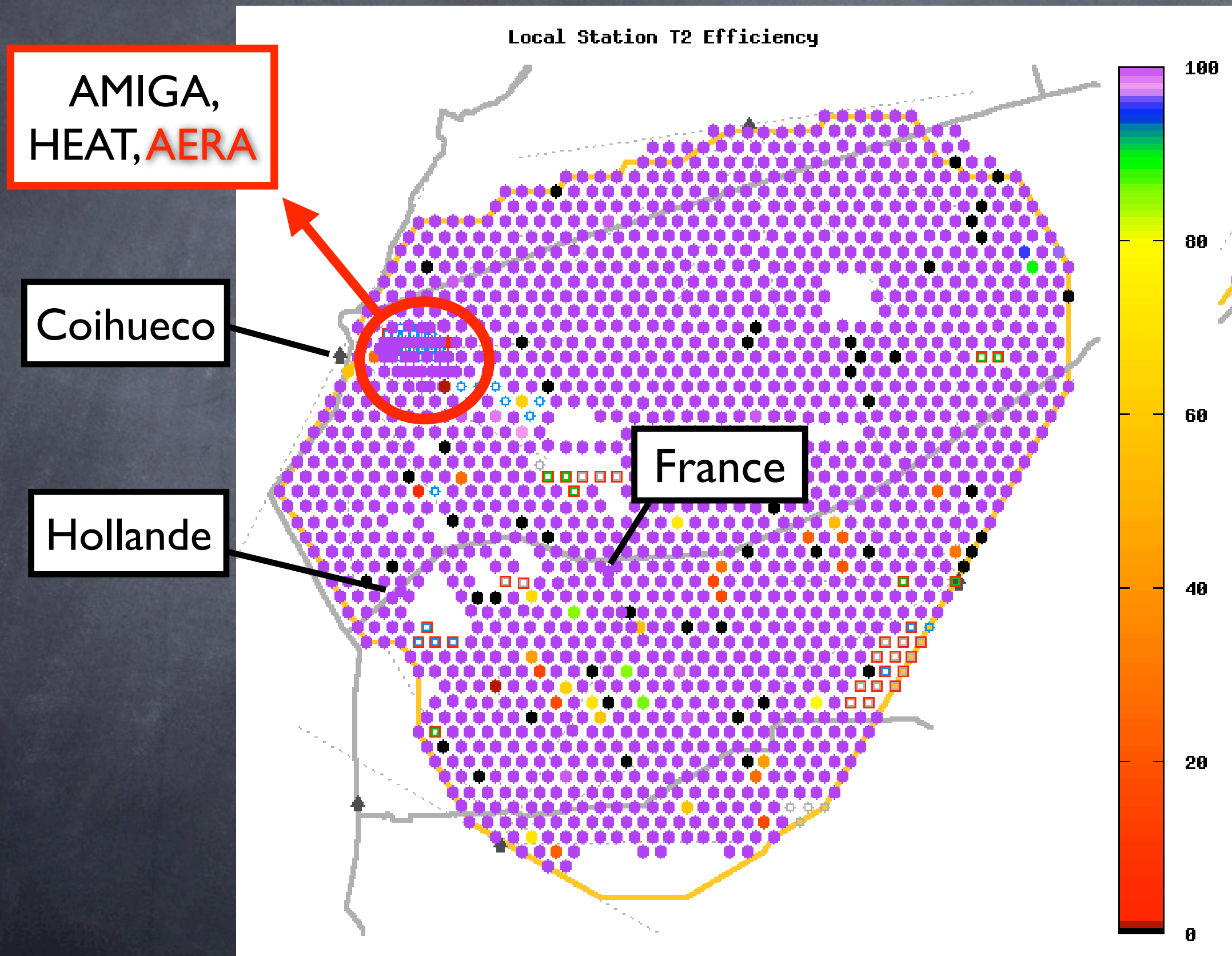
données radio en
coïncidence avec Auger SD

$$(\vec{\beta} \times \vec{B})_{EW} \cdot \frac{dN}{d\theta} \cdot \frac{dN}{d\phi} \cdot \frac{1}{\sin \theta}$$

72% au sud



La radio détection : en Argentine, projet AERA



La radio détection : en Argentine, projet AERA

- **calibration du signal radio** : dépendance avec les paramètres de la gerbe, permettant de comprendre le mécanisme d'émission en détails
- déterminer de façon complète les **capacités de la radiodétection** à bien reconstruire les paramètres du primaire
- mesure de la **composition** des RCs au niveau de la cheville avec des mesures super-hybrides

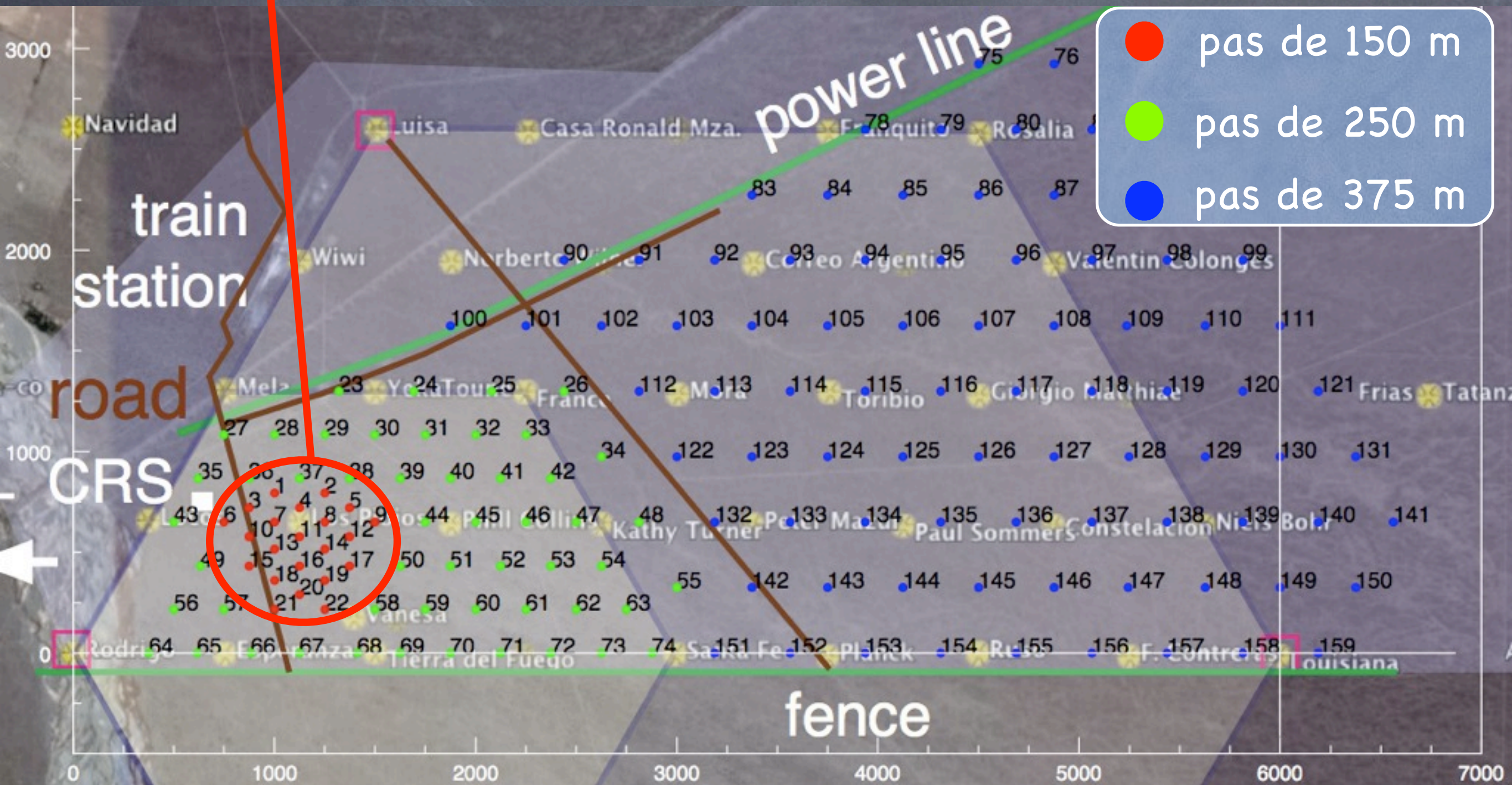
seuil autour de $10^{17.2}$ eV,
on attend 5 000 événements par an
dont 1 000 au-delà de 10^{18} eV

La radio détection : sur Auger, projet AERA

160 radiostations autonomes sur 20 km² sur le site d'AMIGA et HEAT
bande 30-80 MHz

transfert wifi des données

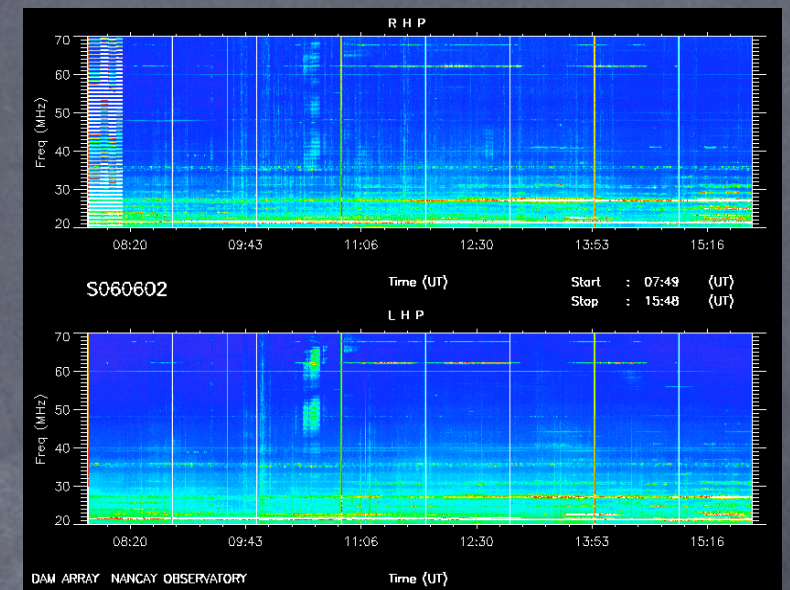
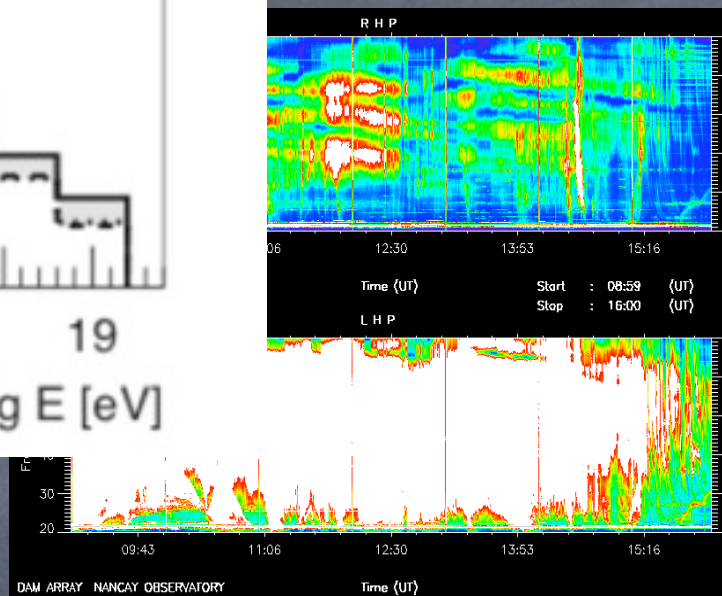
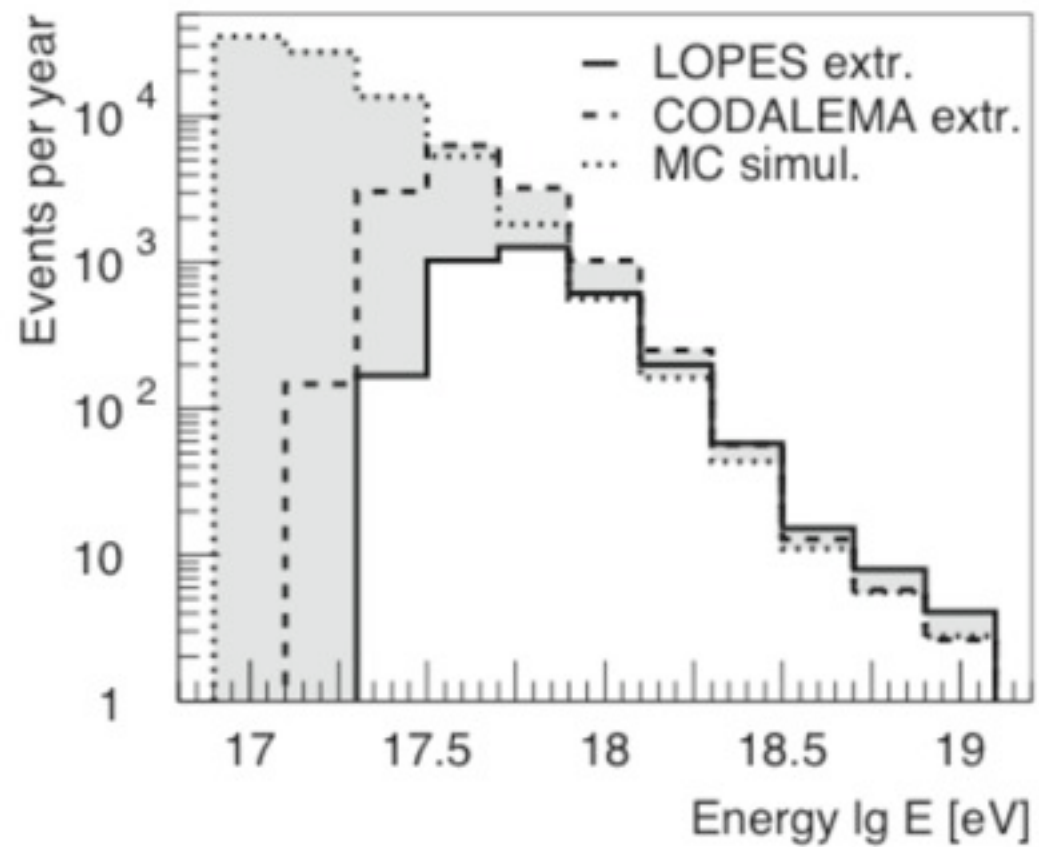
étape 1 : entre 20 et 25 stations, fin 2009



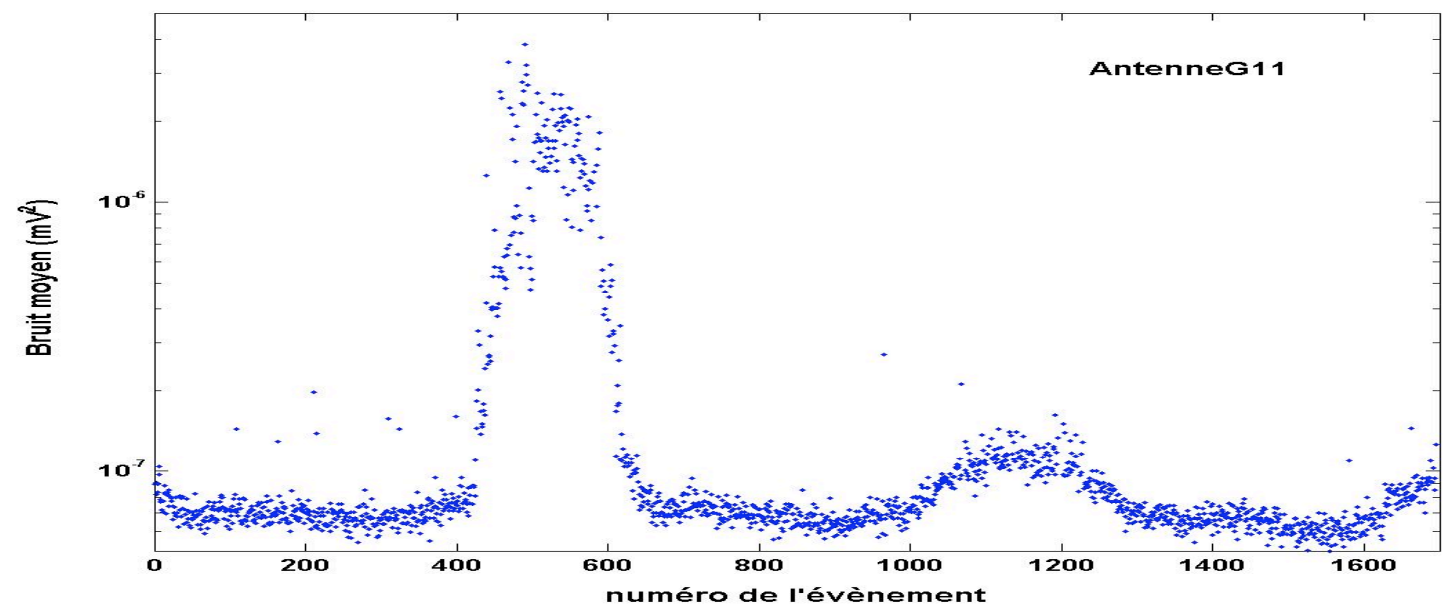
Radio-émission et radio-détection des gerbes atmosphériques



IIème École de Physique des Astroparticules, 7-12 septembre 2009
OHP, Saint Michel l'Observatoire, Avancées en Physique des Astroparticules



solar flare in active region
 AR10720 on 2005 Jan. 15



$$\sin(\alpha)EW*\theta_{\text{tadist}}$$

Antennas: "+" of 600 m x 500 m

: "□" of 350 m x 350 m

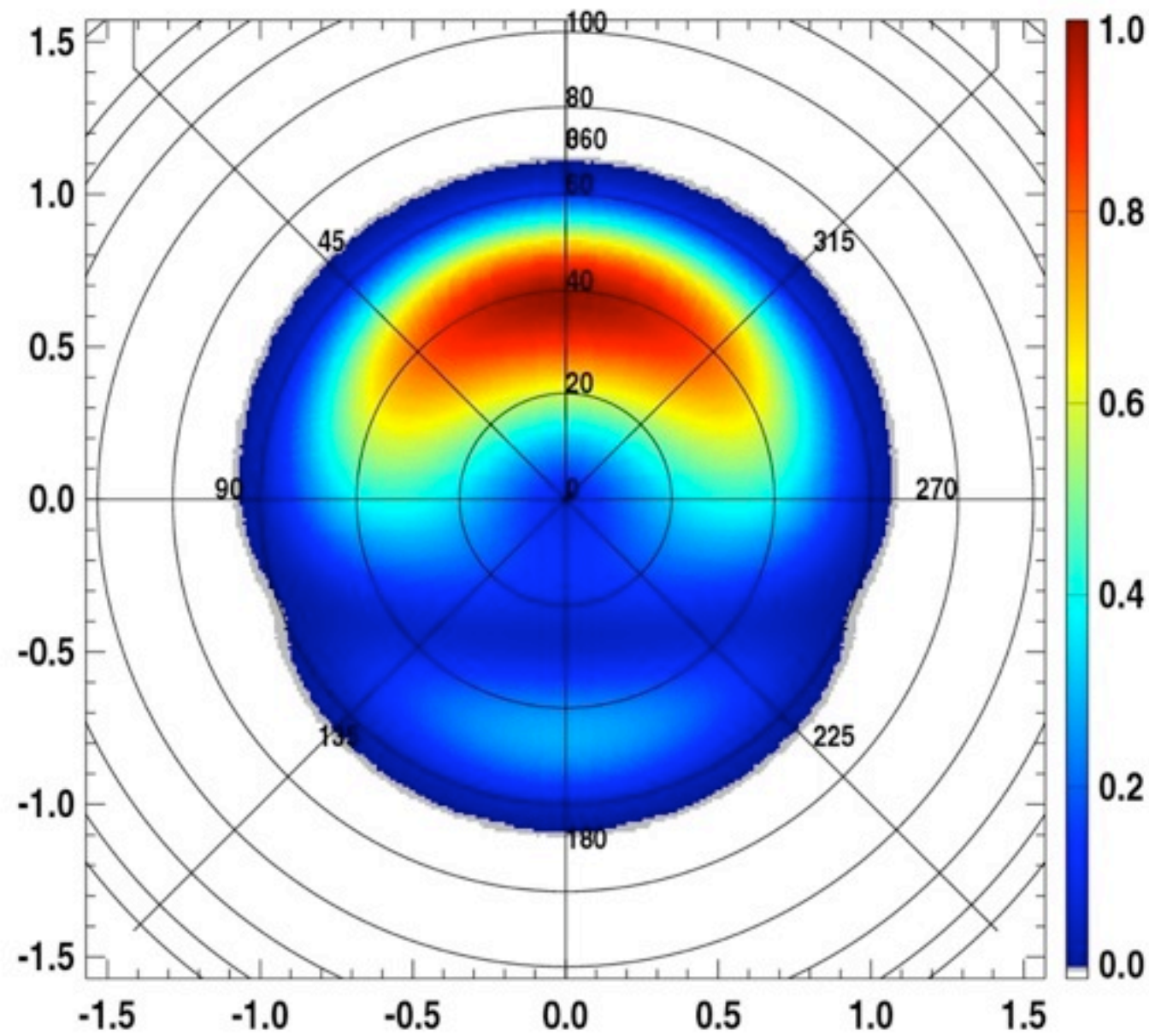
21 dipole antennas in
EW polarization

3 dipole antennas in
NS polarization

Data Acquisition:

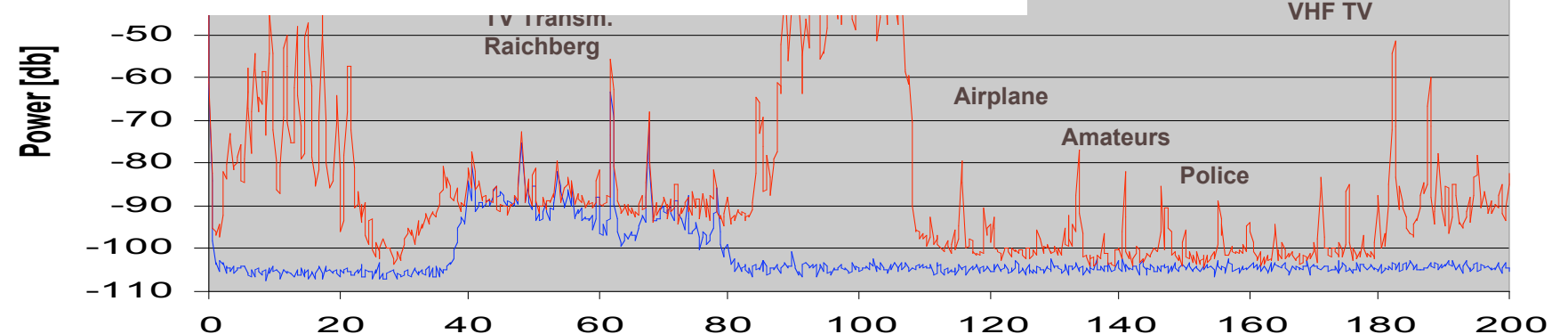
- 12 bits ADC

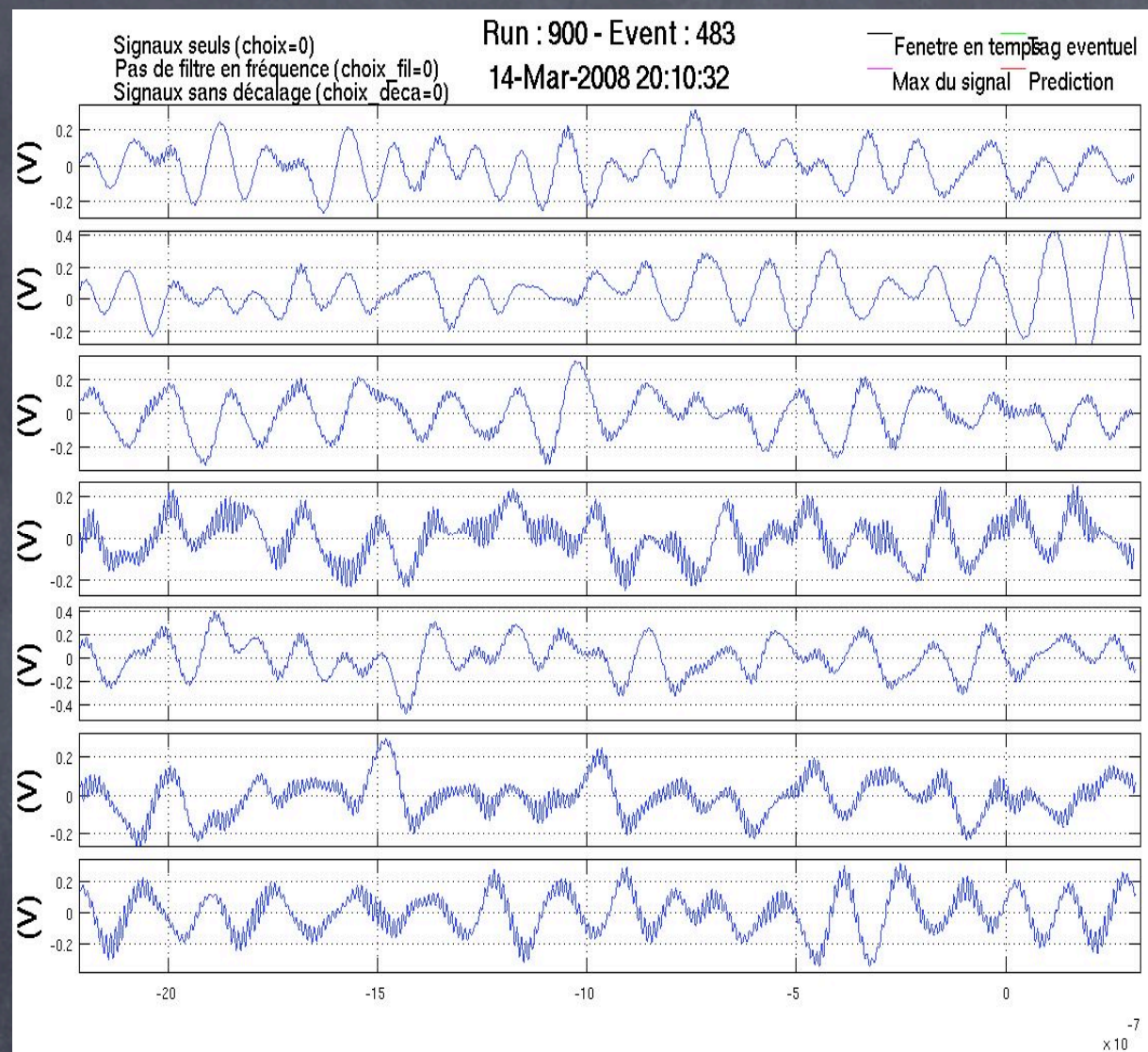
- Sampling: 1 GHz



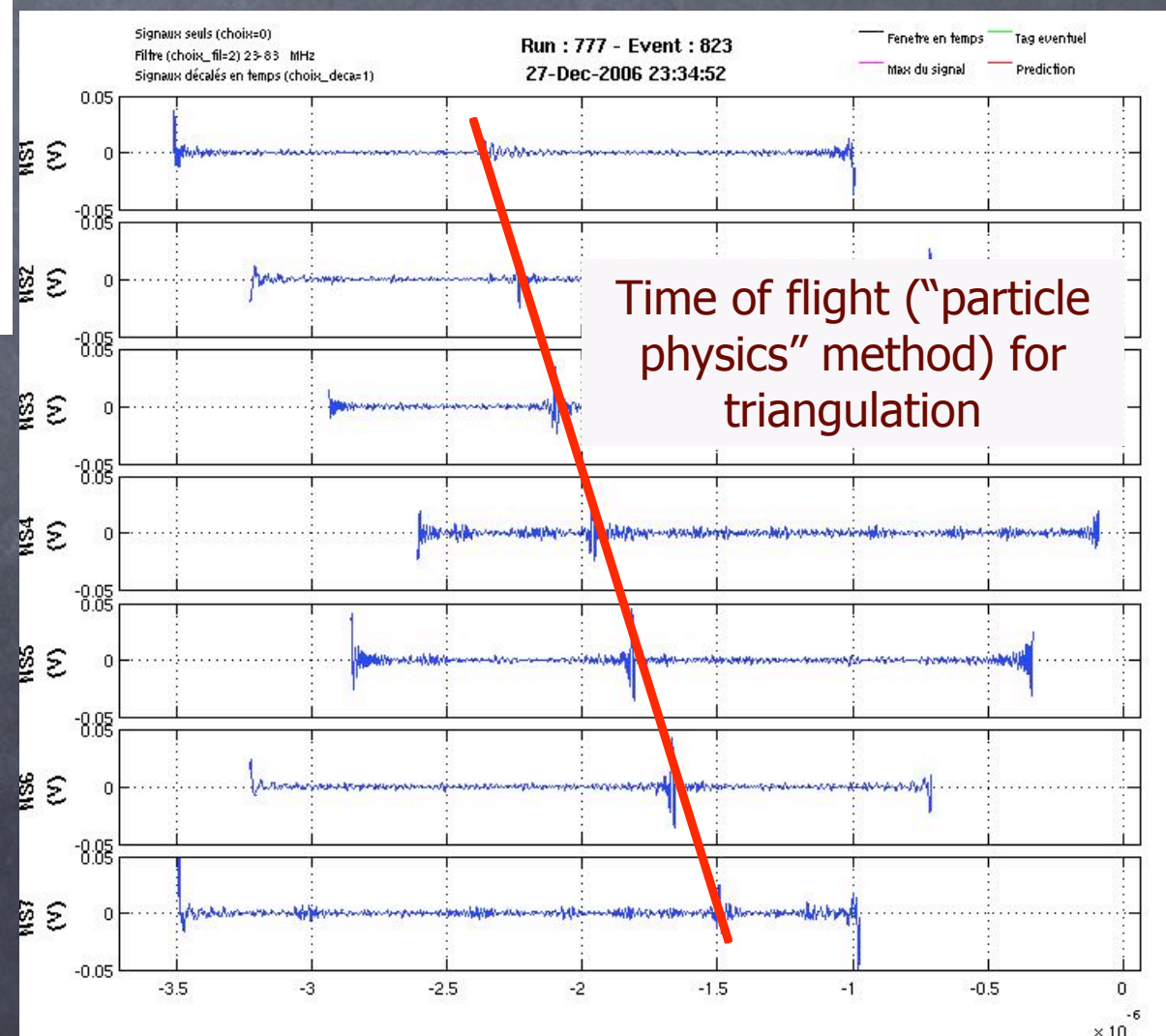
γ filtering

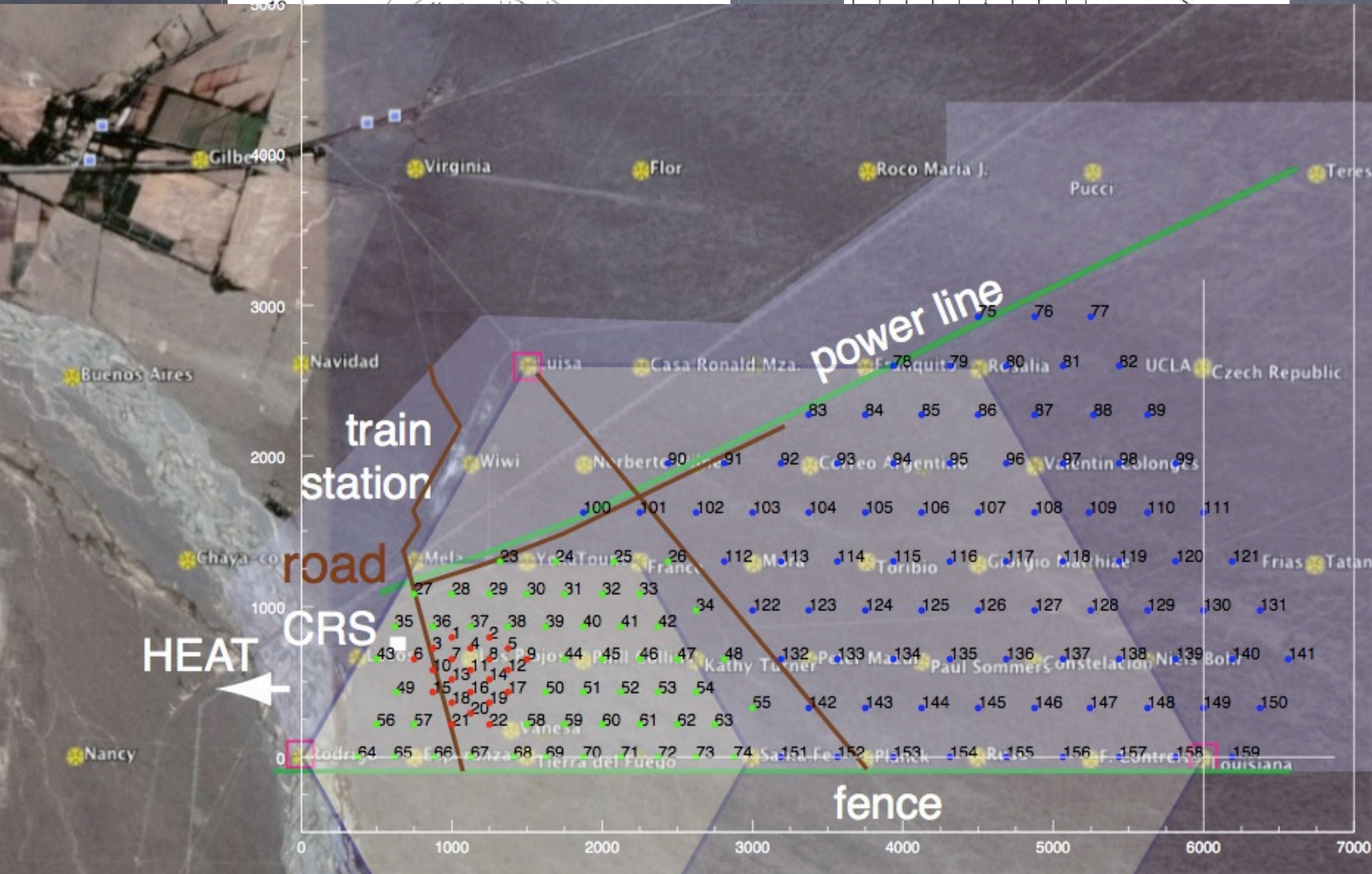
tered





Narrow band filtering
(here 23-83 MHz)





Radio-émission : caractéristiques du signal

Simulations disponibles :

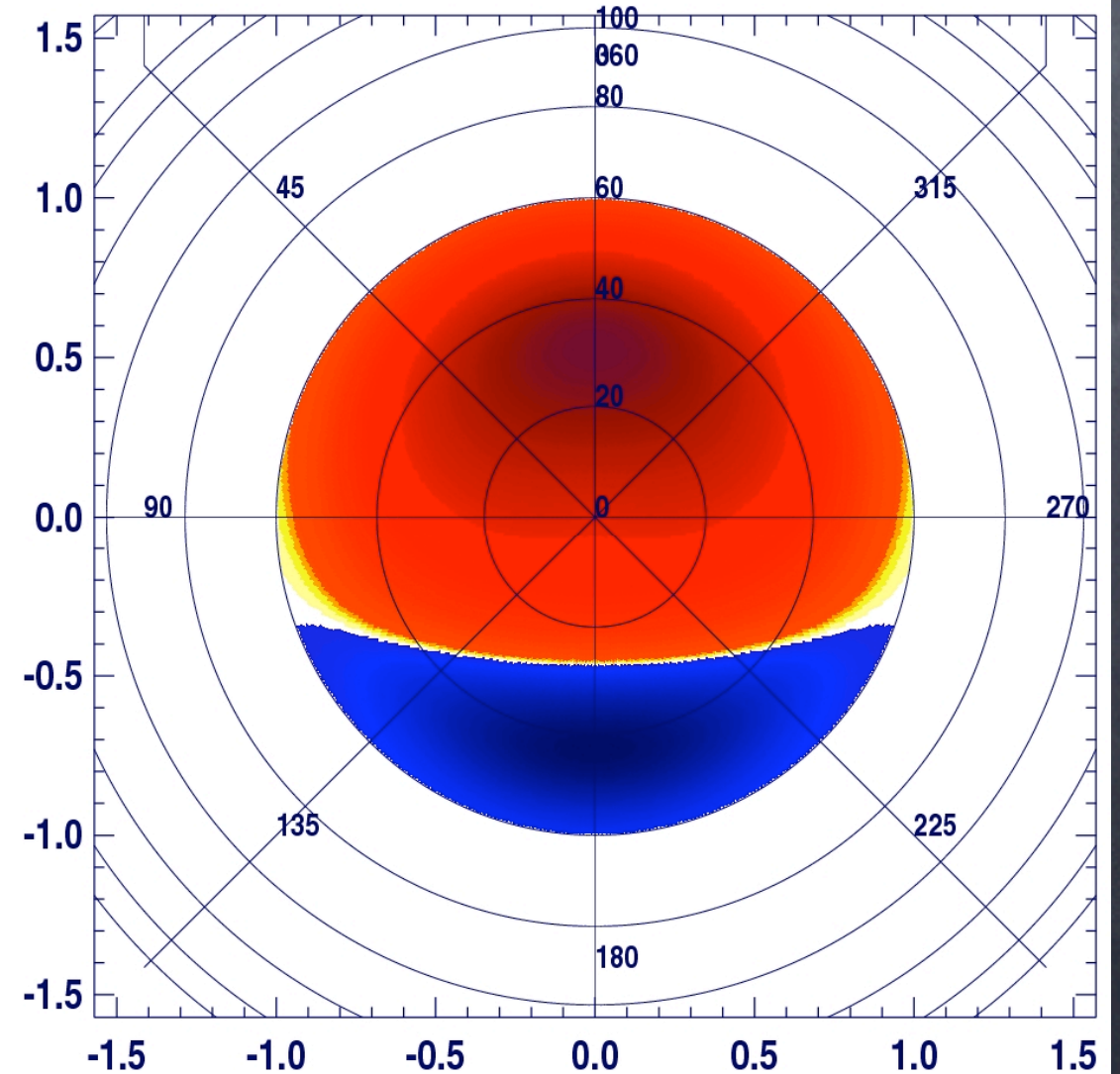
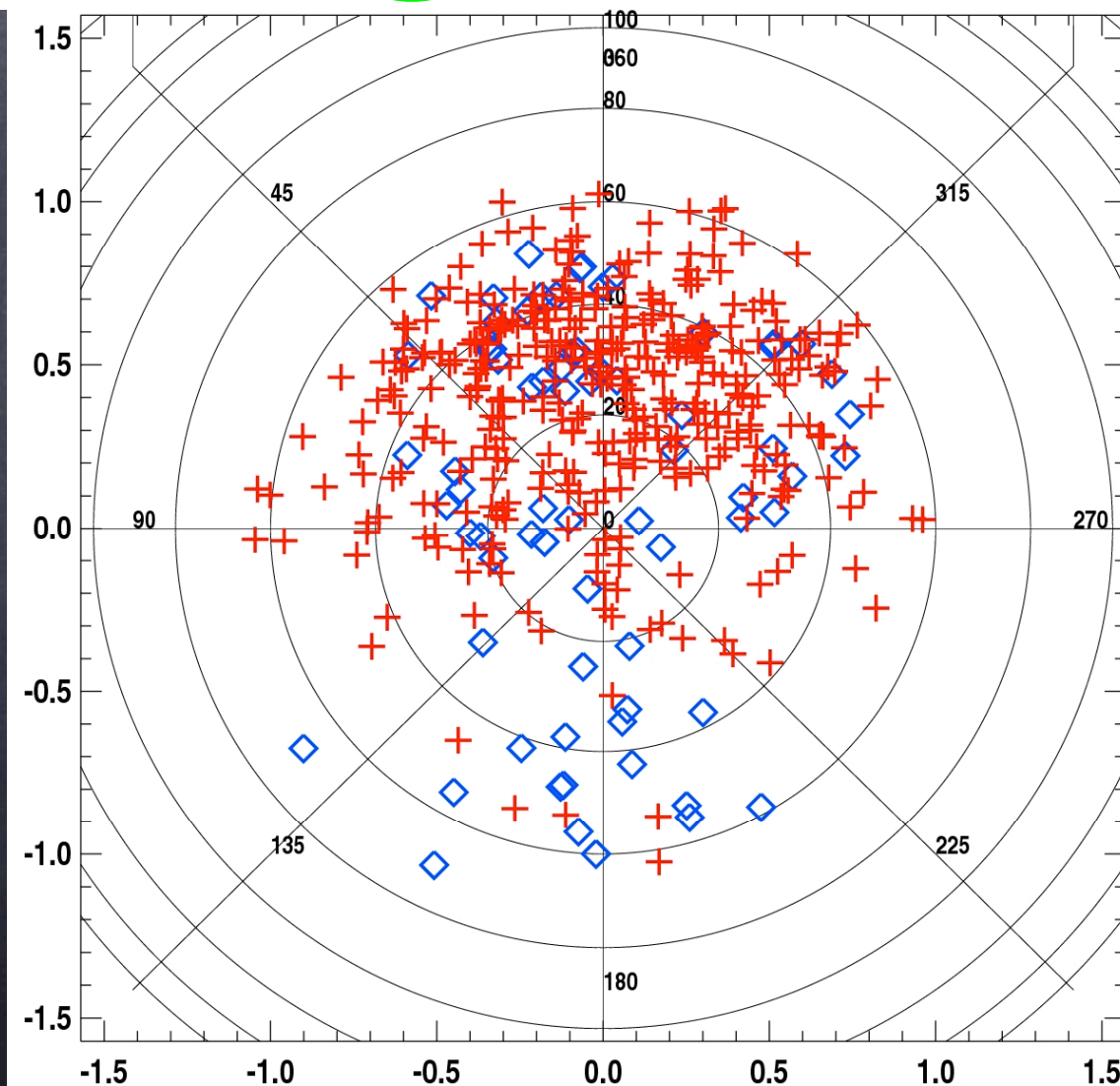
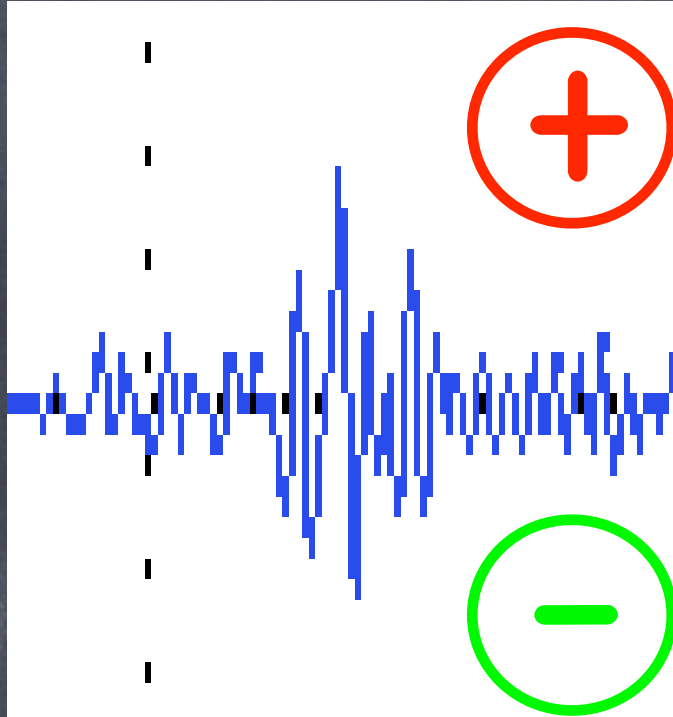
- **REAS2** : calcul de l'émission cohérente synchrotron, basée sur CORSIKA
- **ReAIRES** : calcul du champ radiatif des e^+ et e^- , ainsi que le terme Coulombien (négligeable), basé sur AIRES

plan

- etude des UHECR : sources, champs magnetiques
- rappeler les taux observes dans Auger au-dela de 50 EeV et les taux prevus dans EUSO avec calendrier previsionnel, ainsi que TA
- futur : acceptance encore plus grande -> couvrir plus de surface avec un detecteur moins cher
- physique de la gerbe
- detecteurs usuels : SD, FD, avantages et inconvenients
- quelle autre observable ?
- particules secondaires chargees en mouvement dans B -> signal electrique
- les differents modeles d'emission radio
 - phenomenes microscopiques : interaction Coulombienne, rayonnement de freinage, geosynchrotron
 - formule du jackson, partie Coulomb, partie rayonnee
 - probleme a N corps -> formulation macroscopique moyenne
 - geosynchrotron (Huege, Falcke)
 - Scholten-Werner, courant transverse
- historique de la radiodetection
- renouveau moderne de la radiodetection
- question restant en suspend : la radio peut-elle mesurer E, (theta,phi), nature ?
 - > tests avec detecteur hybride : CODALEMA, LOPES
 - > en vue d'un detecteur unique, test en trigger autonome (RAuger)
- experience CODALEMA, setup, instrumentation, transitoires...
- LDF
- effet geomagnetique
- le futur : AERA
- recherche de post doc :)

La radio détection : CODALEMA

polarité du champ : là aussi, accord satisfaisant



La radio détection : CODALEMA

Effective data taking time

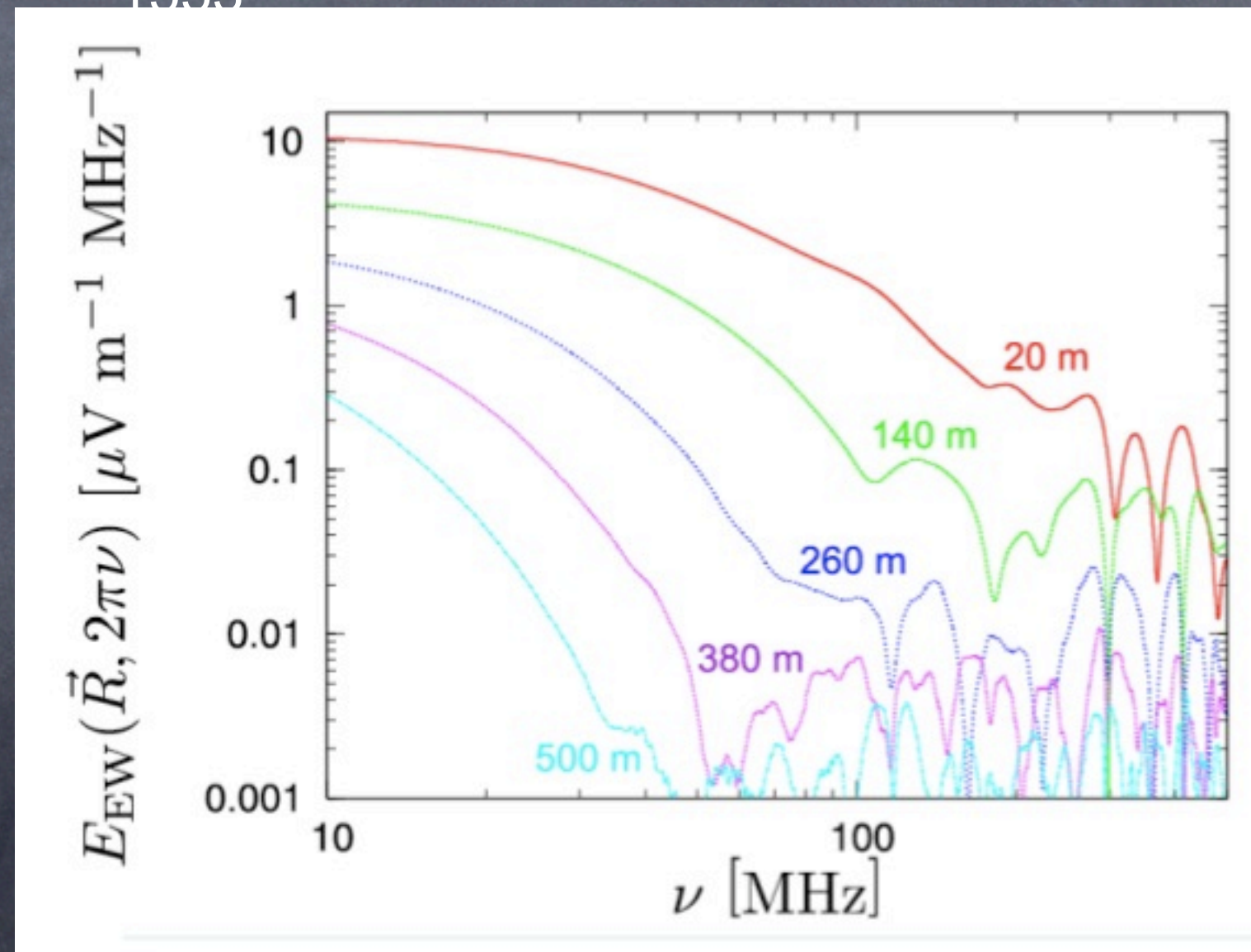
659 days

Trigger

143795

Coincidences (SD and antennas)

1553



La radio détection : choix de l'antenne

notre dipole est sensible au bruit galactique

