

A composite image of Earth from space, showing the planet's curvature and surface details. A bright, multi-colored streak representing a cosmic ray shower enters from the left, branching out into a fan of blue and white lines as it approaches the Earth's surface. The background is a deep blue space filled with numerous stars of varying brightness.

**Rayons cosmiques d'ultra-haute énergie :  
analyse des gerbes atmosphériques  
et de leur signal radio dans le domaine du MHz**

**Benoît Revenu**

le 29 octobre 2012

# 100 Years Cosmic Rays

## Anniversary of Their Discovery by V. F. Hess

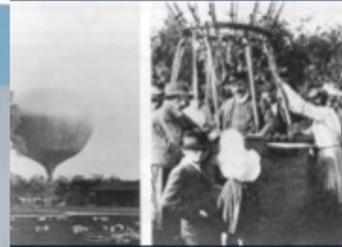
### Conference Topics

- Tribute to Victor Franz Hess
- Research in the early years of the discovery
- From cosmic rays to particle and astroparticle physics: Historical development of the different fields based on cosmic particles



## Centenary Symposium 2012: Discovery of Cosmic Rays

University of Denver, Denver, CO  
June 26-28, 2012



*"The results... appear most likely explainable by the assumption that a radiation of very high penetration power enters our atmosphere from above."*

Viktor Franz Hess



You are here: Home » Pictures » Pictures

### DAY IN PICS

23 Jul, 2012, 11.13PM IST,

## 100th anniversary of the discovery of cosmic rays

Print Save Email Write to Editor



BBC News Sport Weather Travel Future TV Radio More... Search

NEWS SCIENCE & ENVIRONMENT

Home UK Africa Asia Europe Latin America Mid-East US & Canada Business Health Sci/Environment Tech Entertainment Video

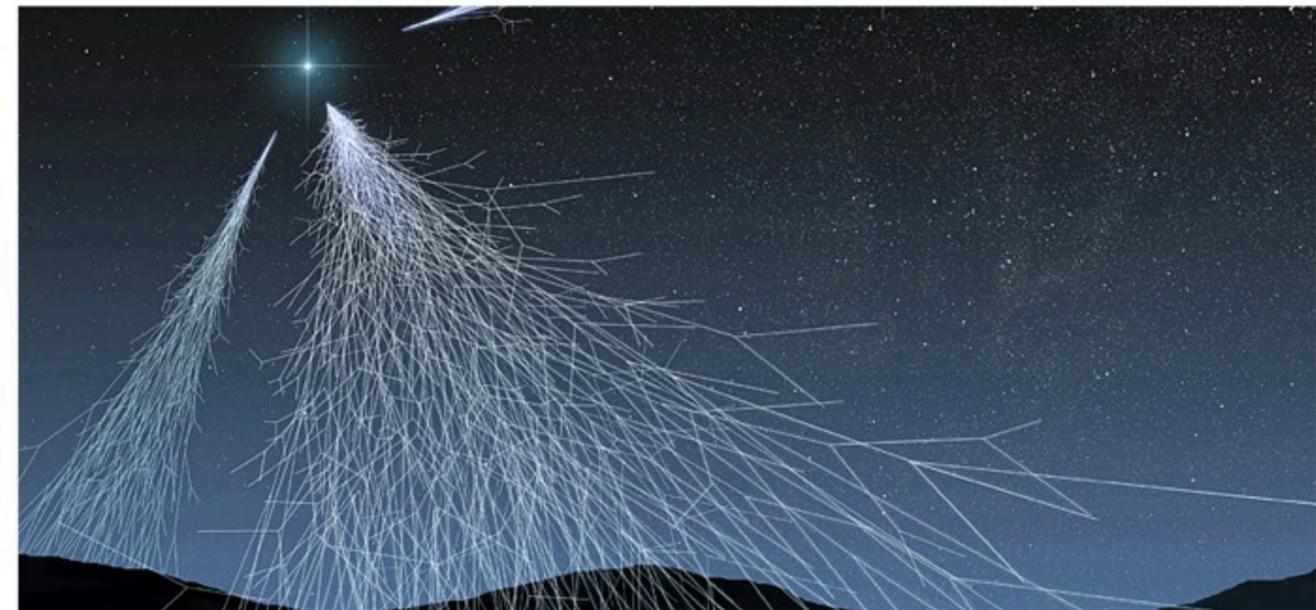
8 August 2012 Last updated at 00:55 GMT

## Cosmic rays - 100 years of discovery

A century ago - as scientists raced to find out where different types of radiation came from - an Austrian physicist took his electroscope in a hot air balloon and made a discovery that was to change thinking for good.

High in the sky, Victor Hess discovered that background radiation came from space - and not, as had been thought, from the ground here on Earth.

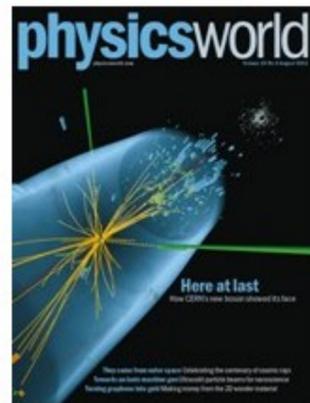
Take a look at how cosmic rays were first understood - and see how far our knowledge has come since then - with Simon Peeters, a senior lecturer in Physics and Astronomy at the University of Sussex.



## 100 years of cosmic rays

1 August 2012

In this month's *Physics World*



As physicists gradually re-discovered the objects and understandings of the universe...

It is now widely known that nuclei of atoms are occurring everywhere for millions of years. However, it proved to be a very difficult task.

Physics World: August 2012

Edition: U.S.

FRONT PAGE POLITICS BUSINESS

Science > Space • Brain • Earth • Talk Nerdy



Galaxy Evolution Discovery Takes Scientists By Surprise



More In Science: New Black Hole Revealed... Homosexuality: A Choice?... IS: Crew Blast Off...

HuffPost Social Reading

## Cosmic Rays Still Mysterious 100 Years After Their Discovery

Posted: 08/02/2012 8:32 am Updated: 08/02/2012 8:32 am



# L'Autriche en ballon, 1912, Victor Hess



# L'Autriche en ballon, 2012, Félix Baumgartner



# Que sont les rayons cosmiques ?

- noyaux chargés (du proton jusqu'au Fe), extension à des photons et neutrinos
- interaction dans l'atmosphère terrestre
- détection au sol, dans l'air (Victor Hess) ou dans l'espace

comment sont-ils produits ? où sont-ils produits ?

restes de supernovae



galaxies actives



# Plan

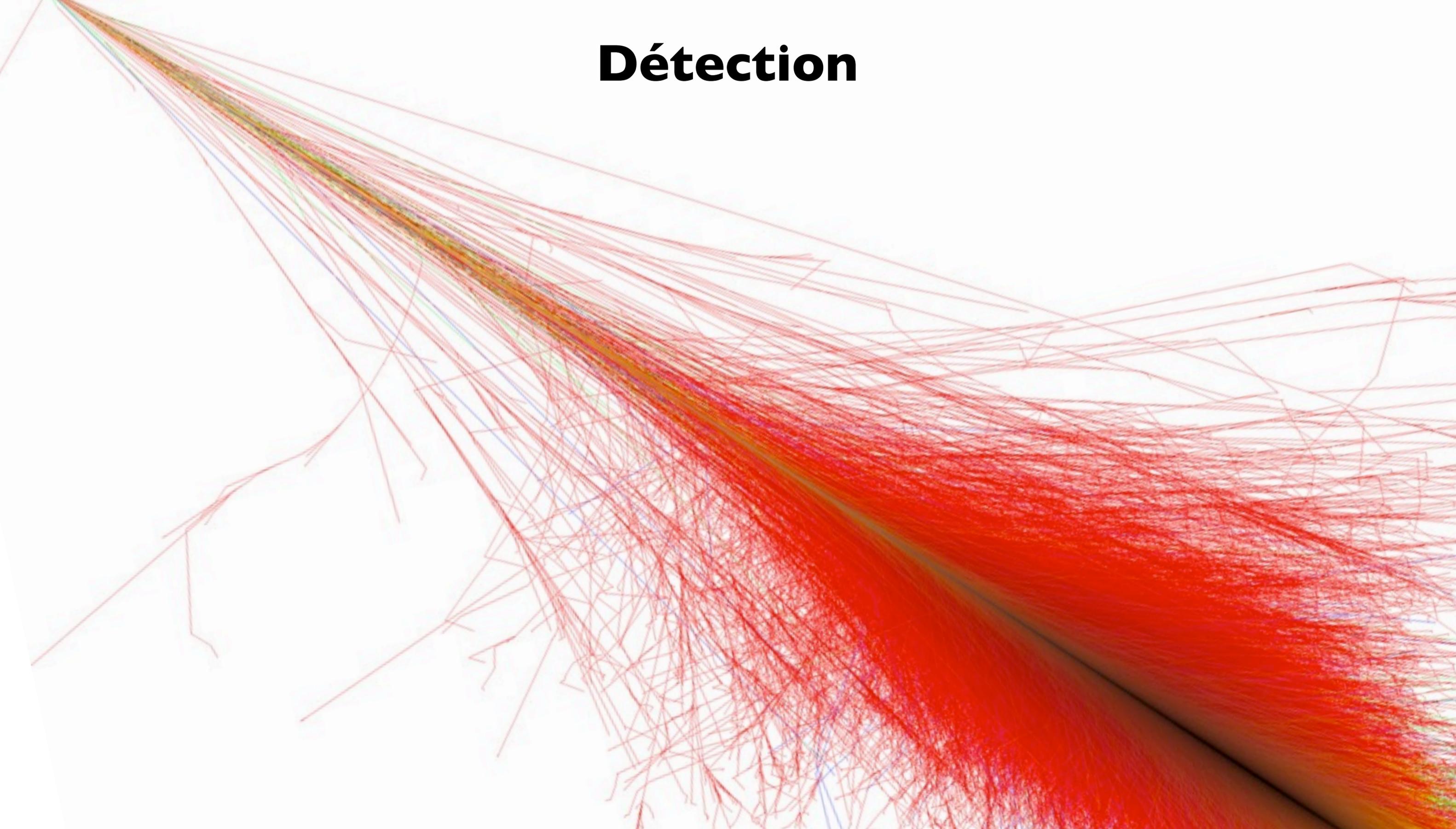
- Mesure et détection
- Nos connaissances actuelles (spectre, sources, composition)
- Sujets de recherche choisis :
  - recherche des sources des rayons cosmiques
  - analyse des données radio (Argentine)
  - simulation du champ électrique : prédiction d'un nouveau signal
- Conclusions et perspectives

# Phénomène observé : la gerbe atmosphérique

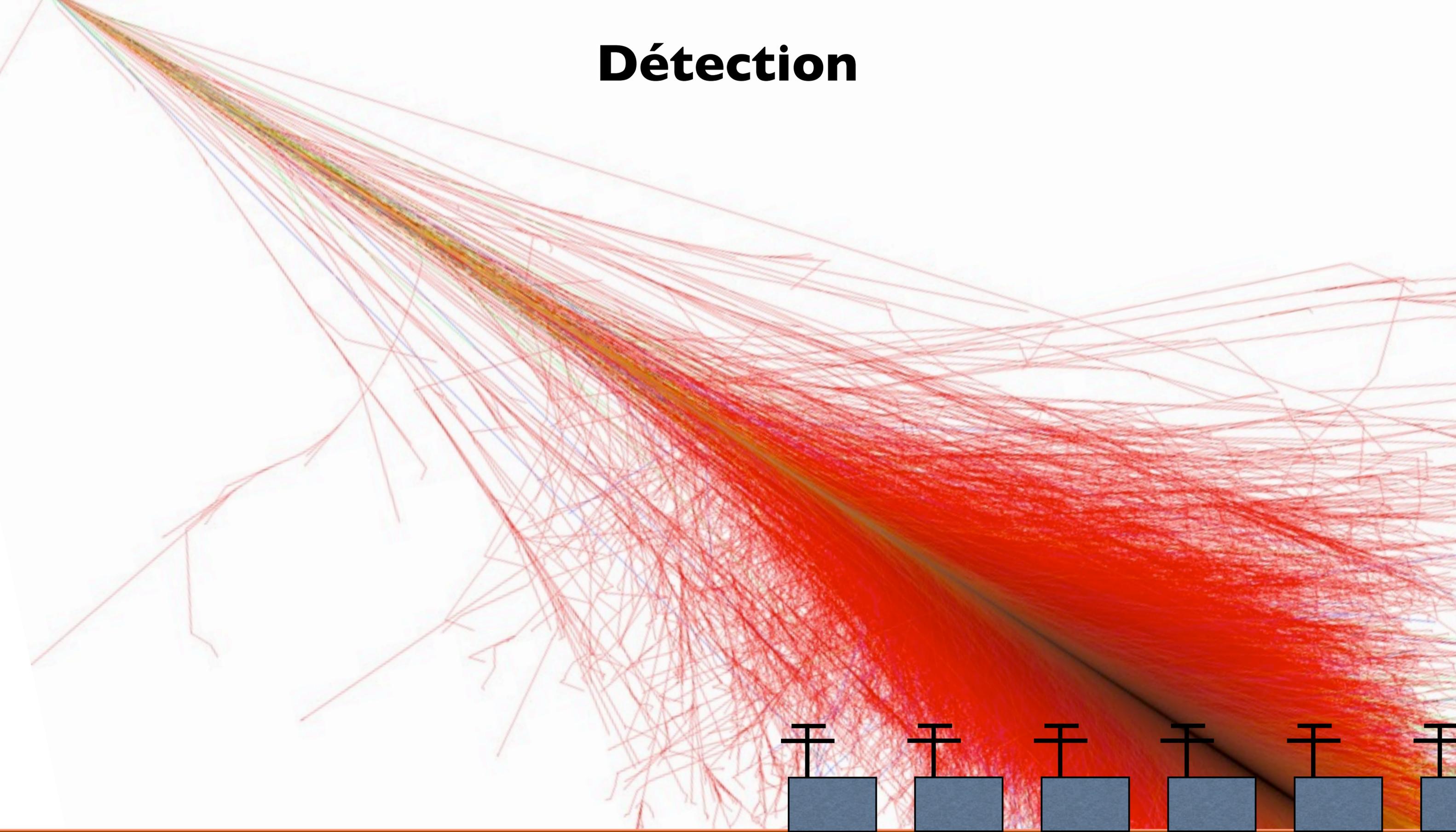
99 % : photons, électrons, positrons, 0.9 % : muons

$10^{15}$  eV proton

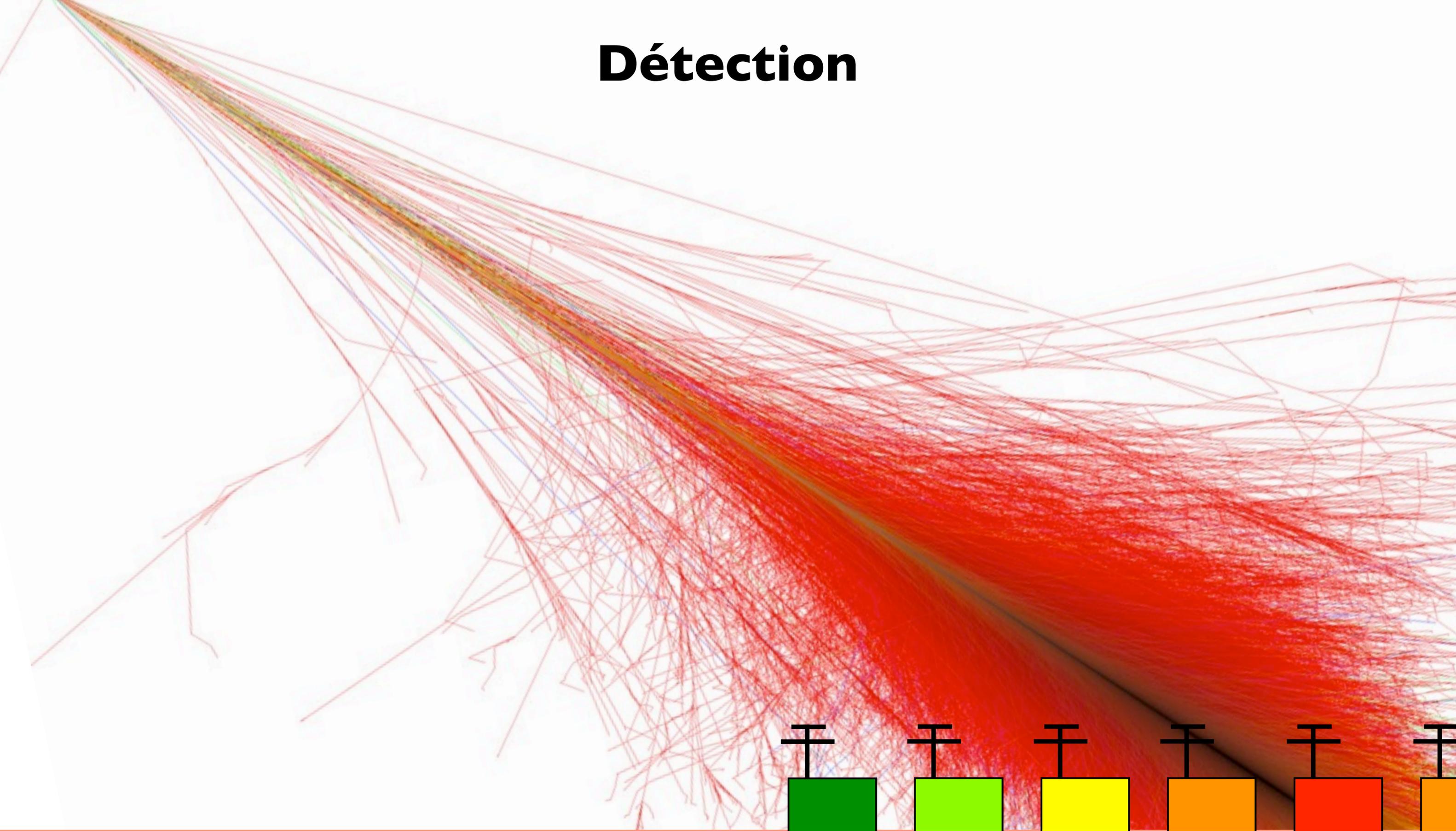
# Détection



# Détection

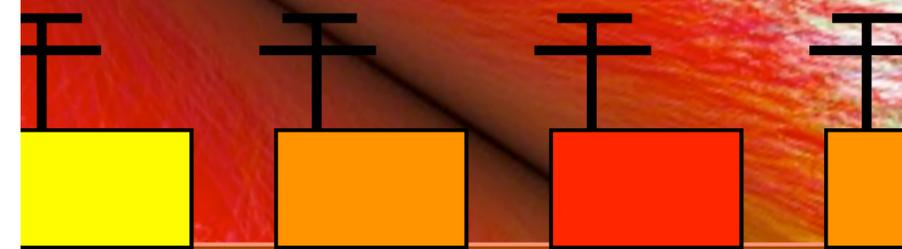
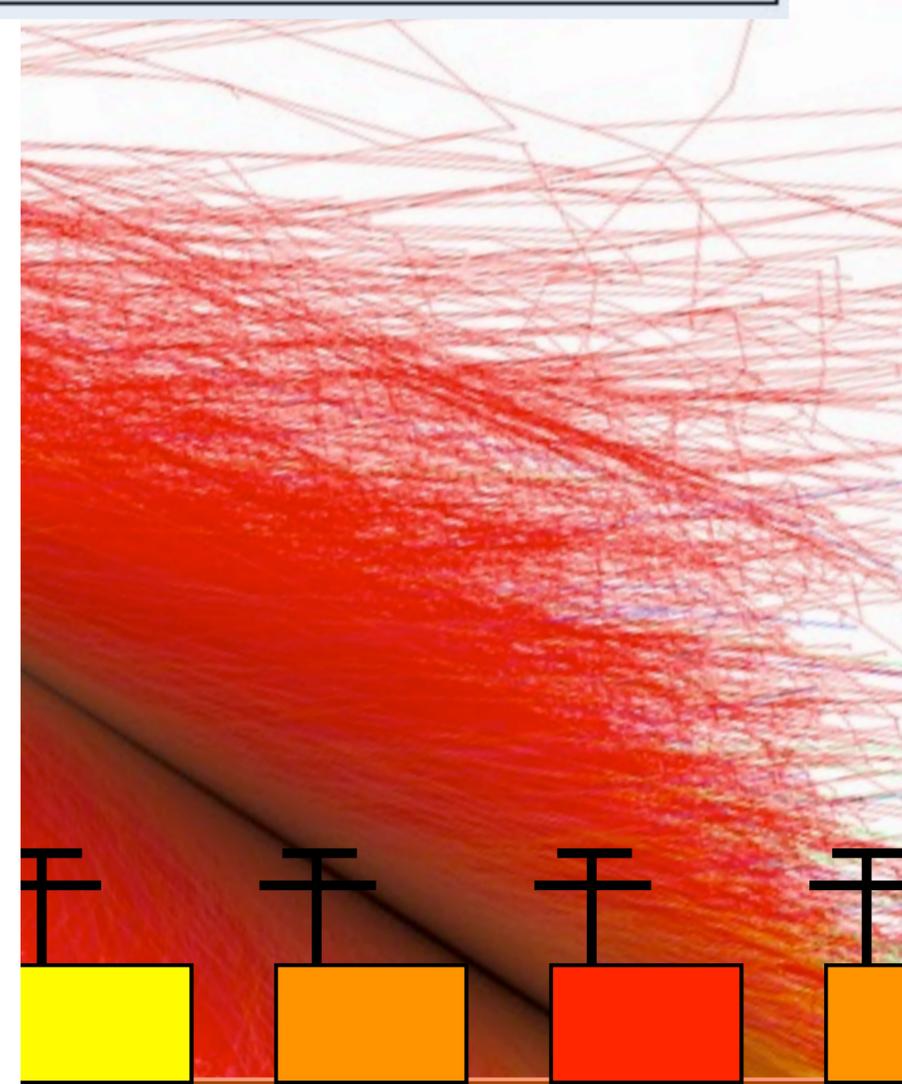
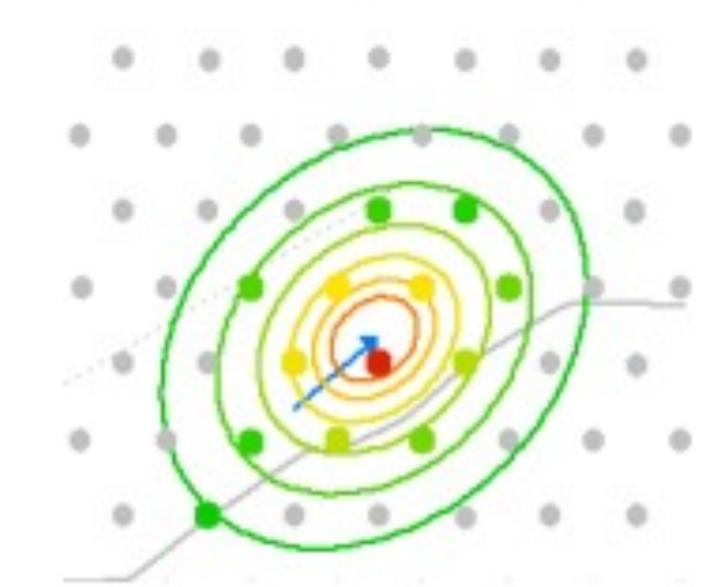
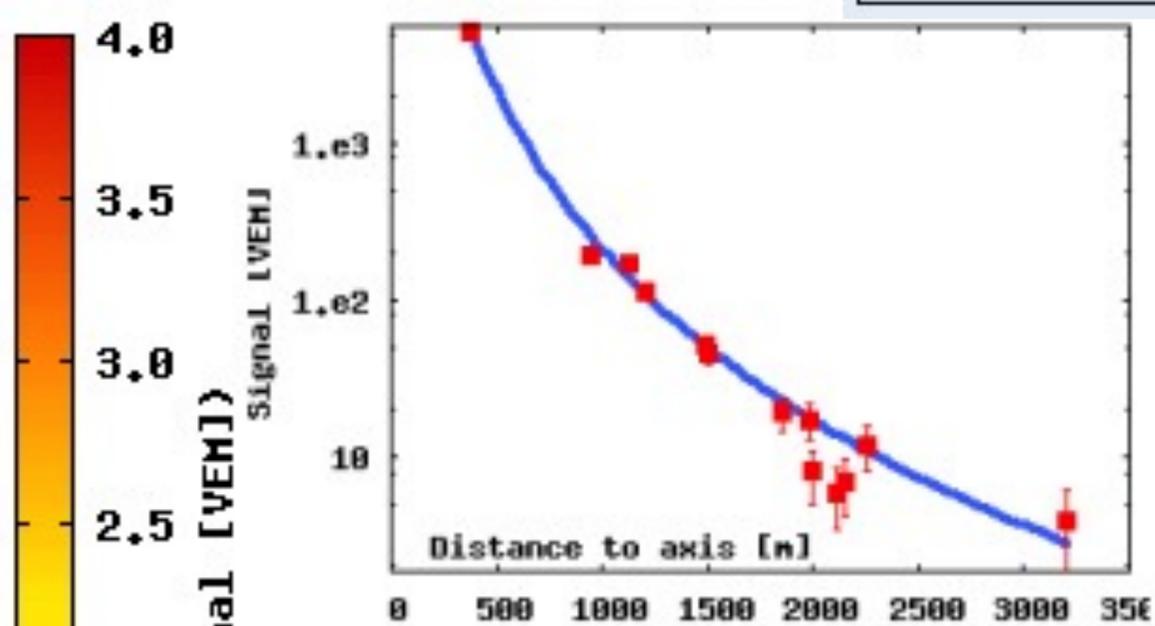
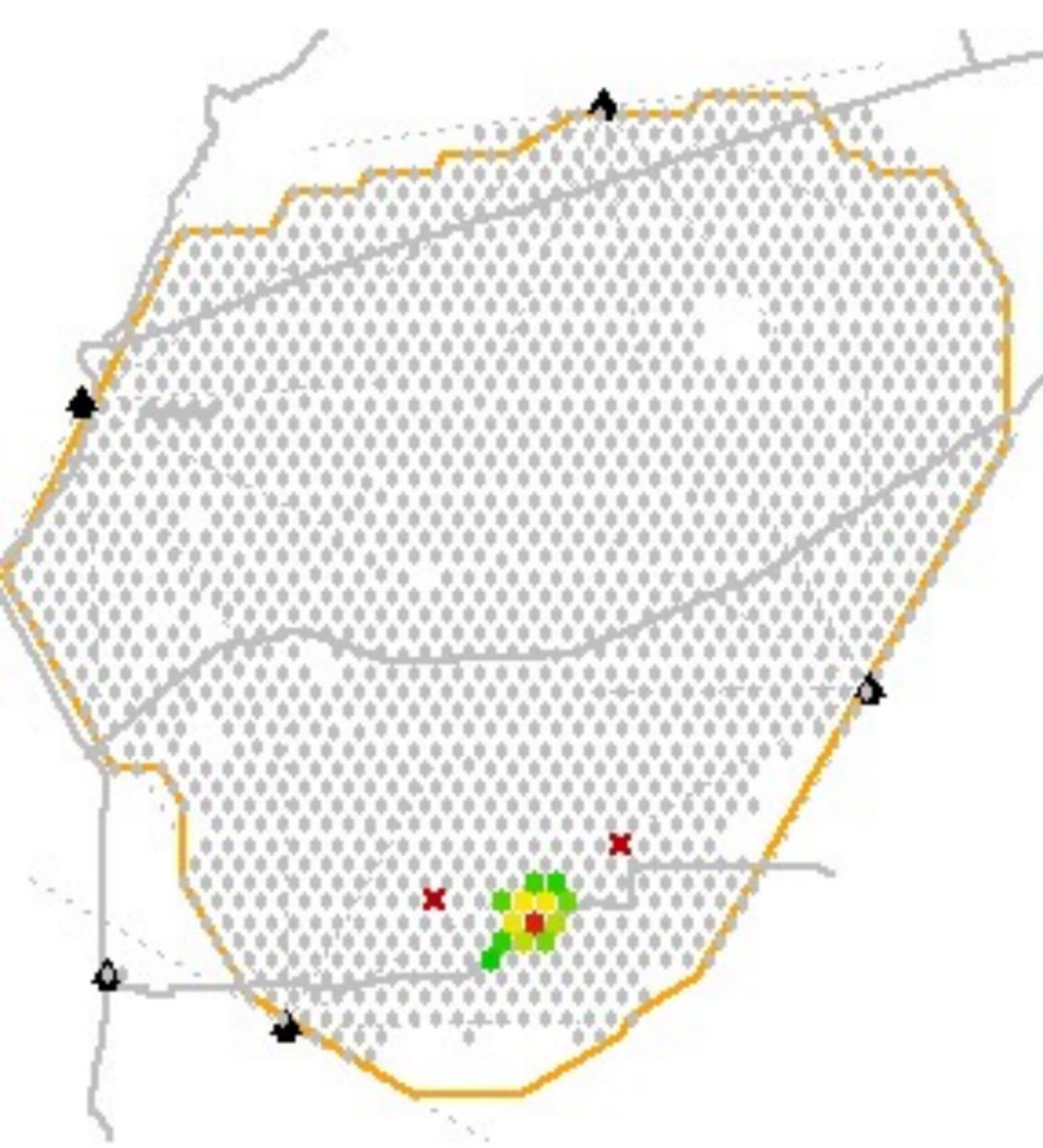


# Détection

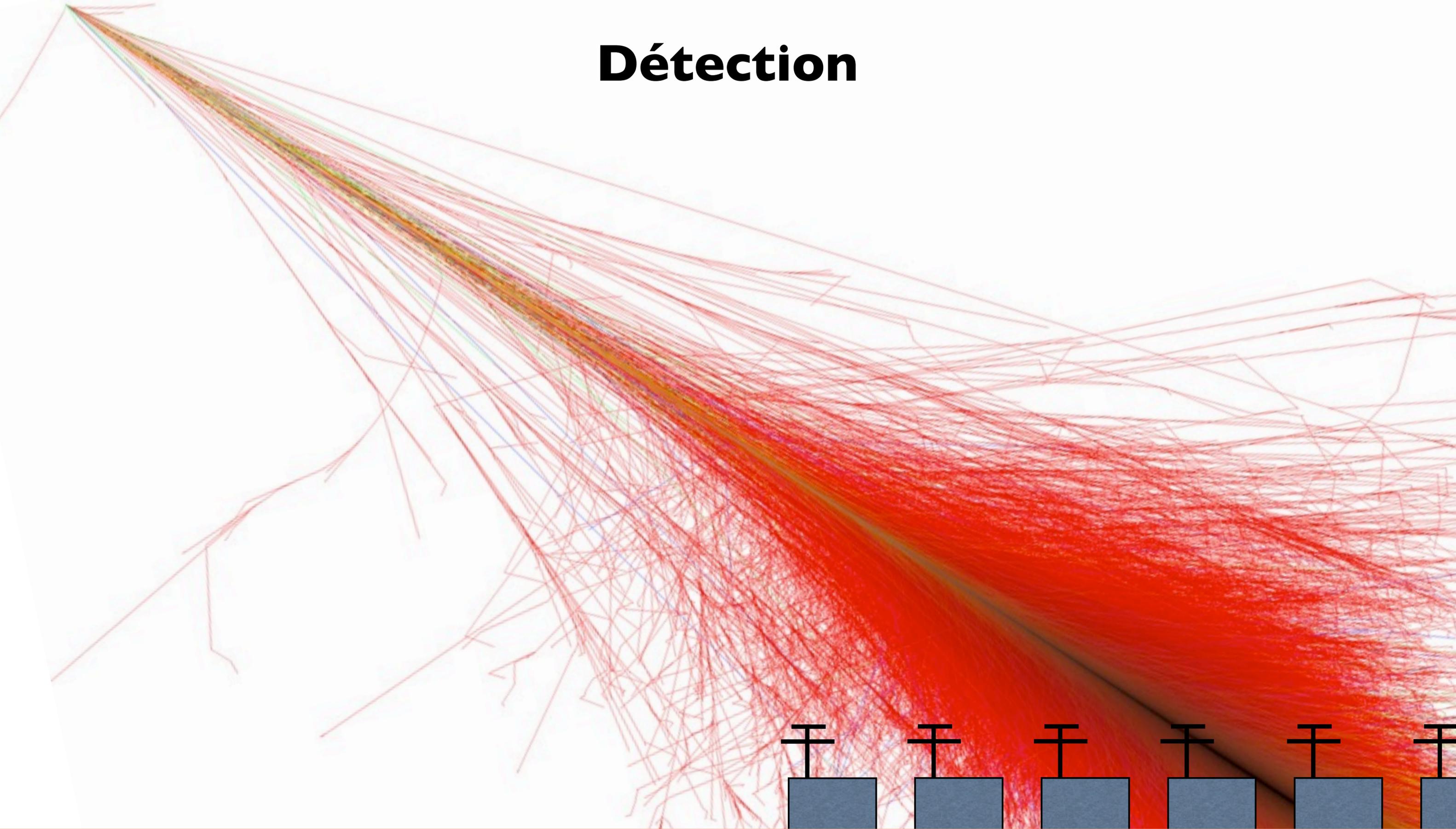


# Détection

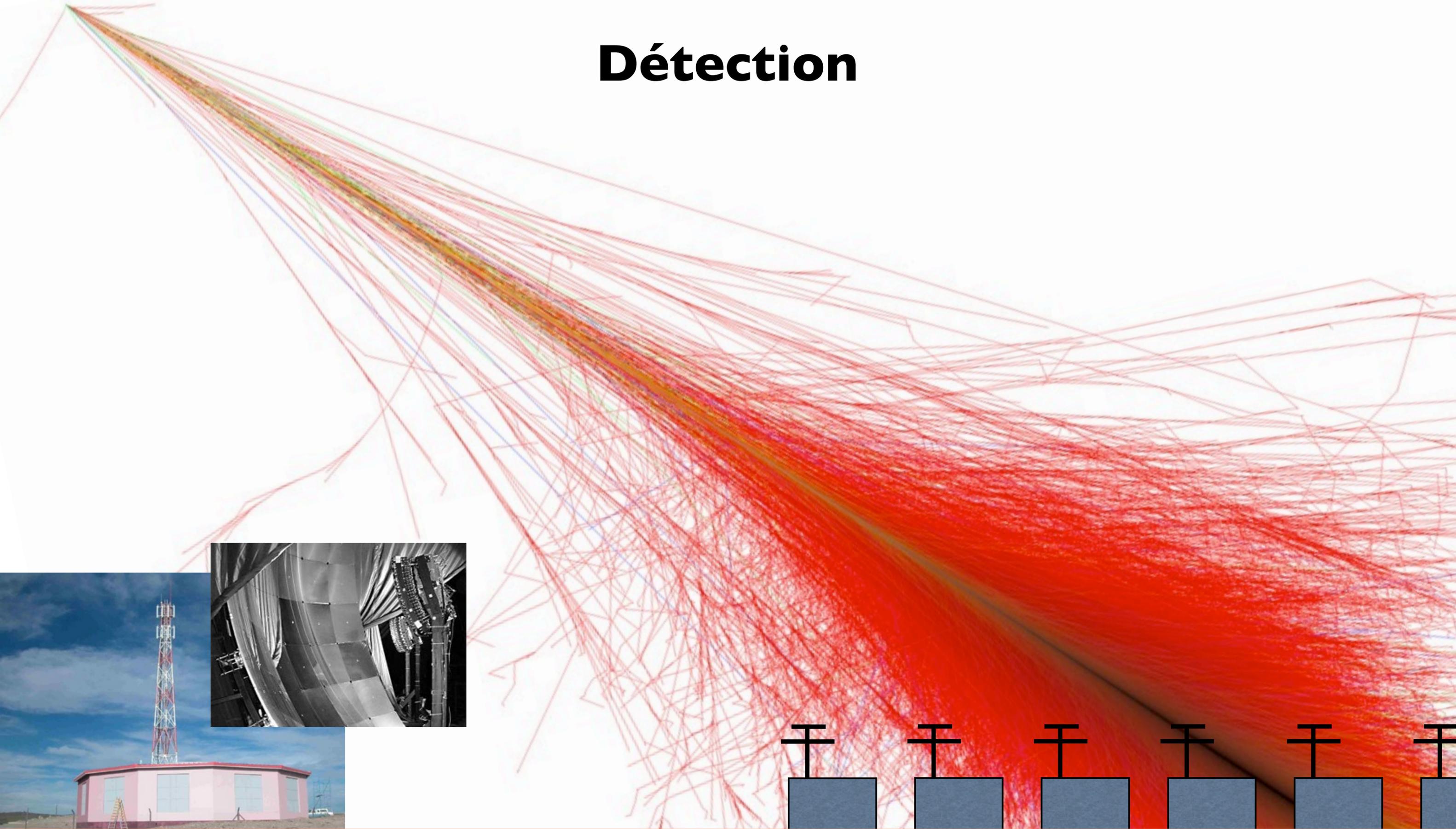
Generic Information	
Id / Date	10485600 / Tue Oct 26 17:39:16 2010
Nb. of stations	13
Energy	$49.9 \pm 1.9$ EeV
<u>Theta</u>	$40.3 \pm 0.1$ deg
<u>Phi</u>	$-139.5 \pm 0.2$ deg
<u>Curvature</u>	$12.2 \pm 0.6$ km
Core <u>Easting</u>	$476051 \pm 19$ m
Core <u>Northing</u>	$6079247 \pm 12$ m
Reduced <u>Chi</u> <sup>2</sup>	3.69



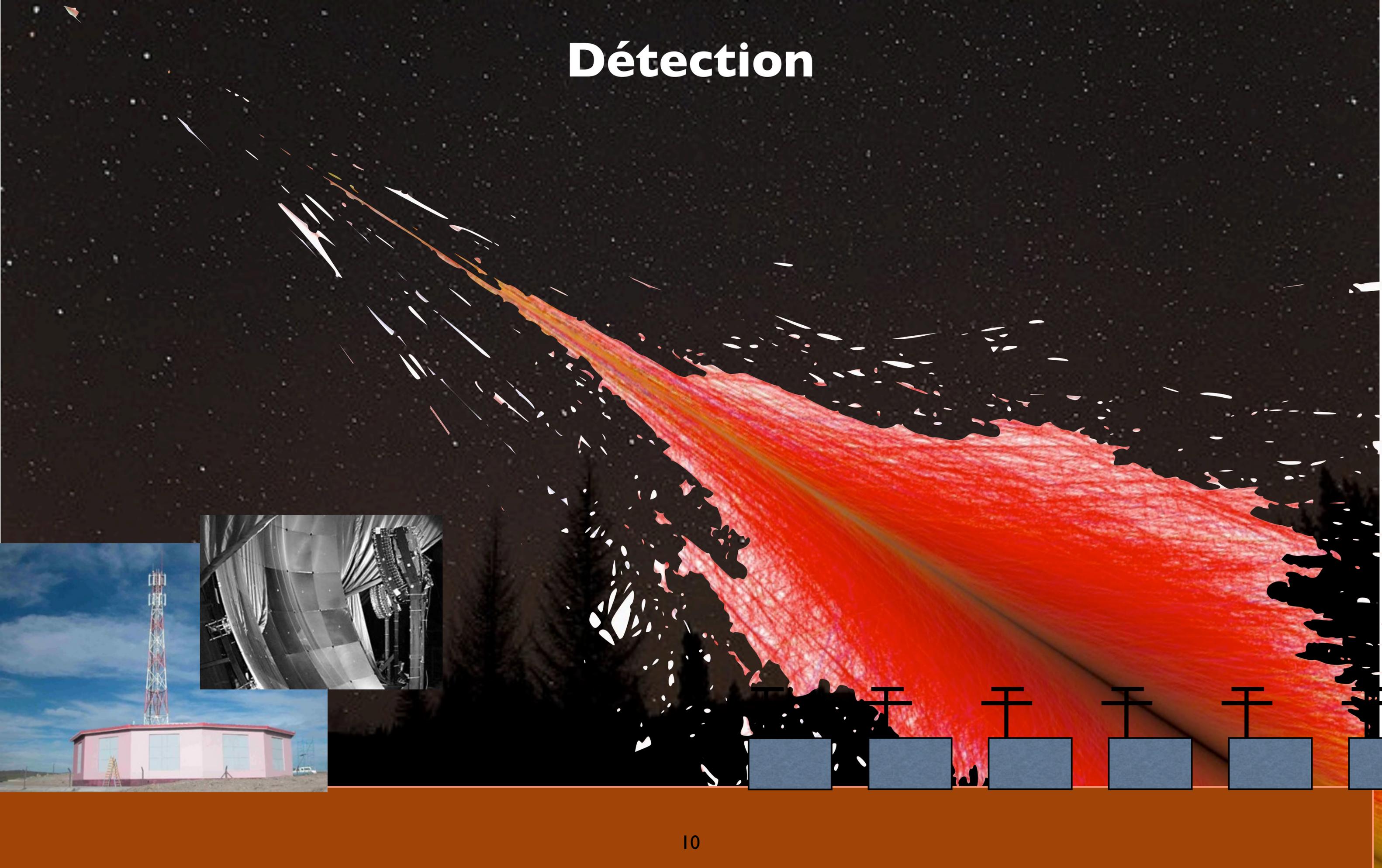
# Détection



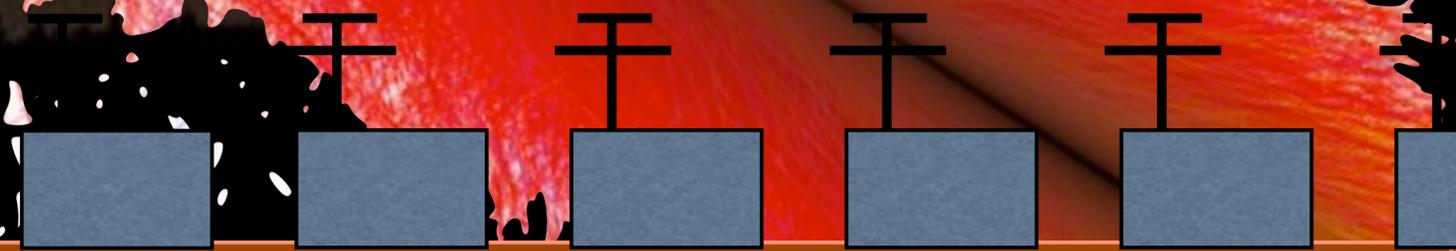
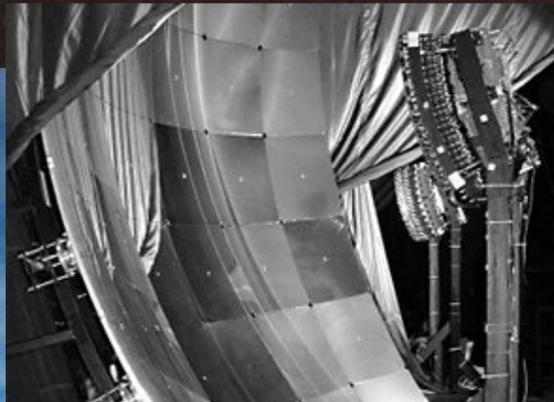
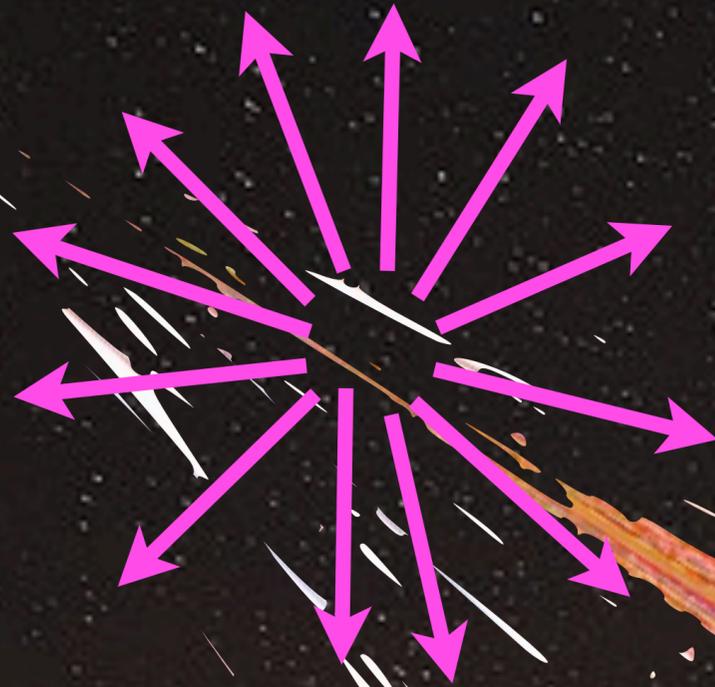
# Détection



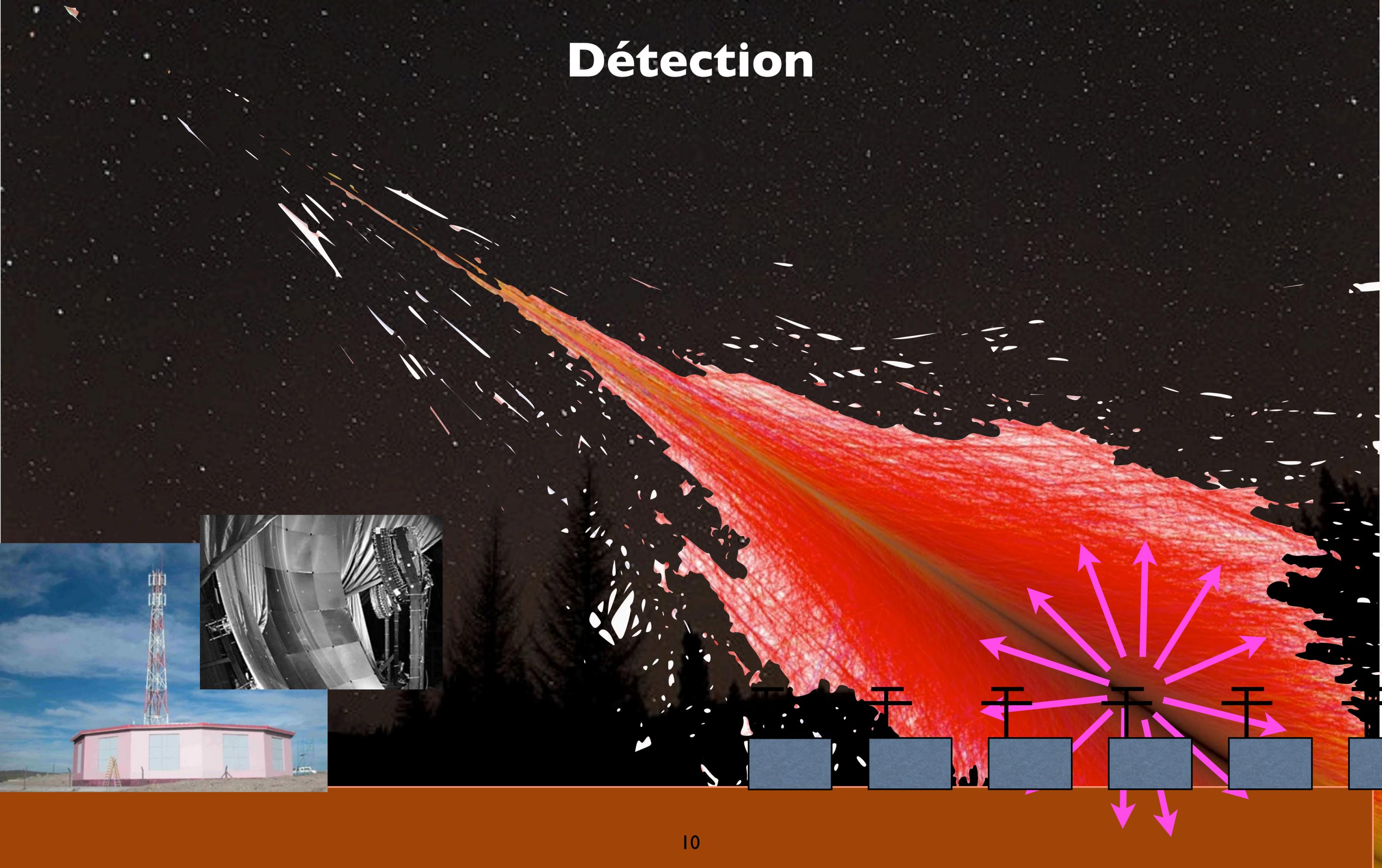
# Détection



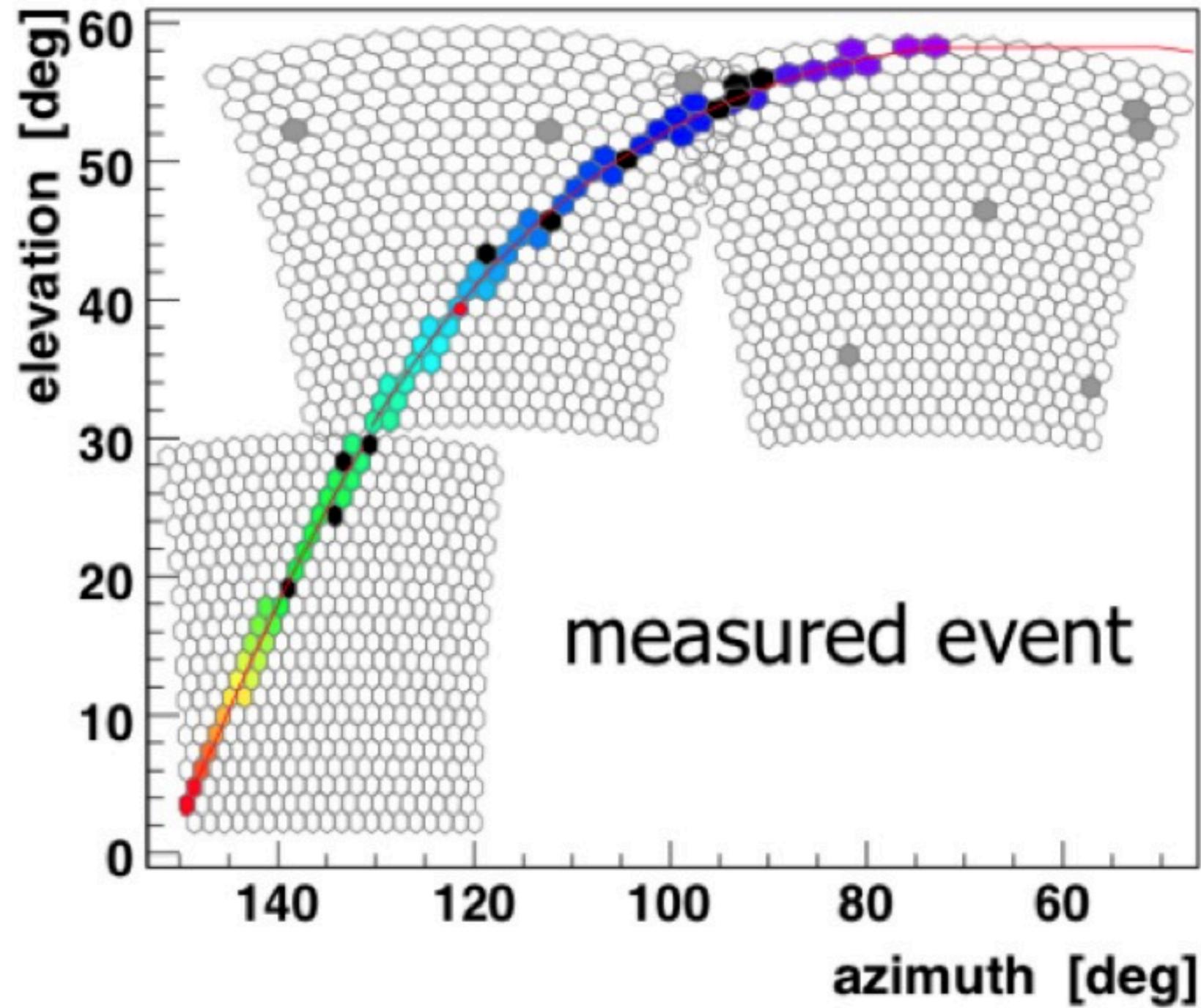
# Détection



# Détection

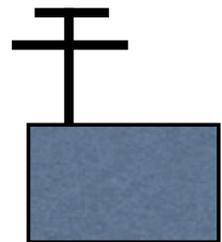
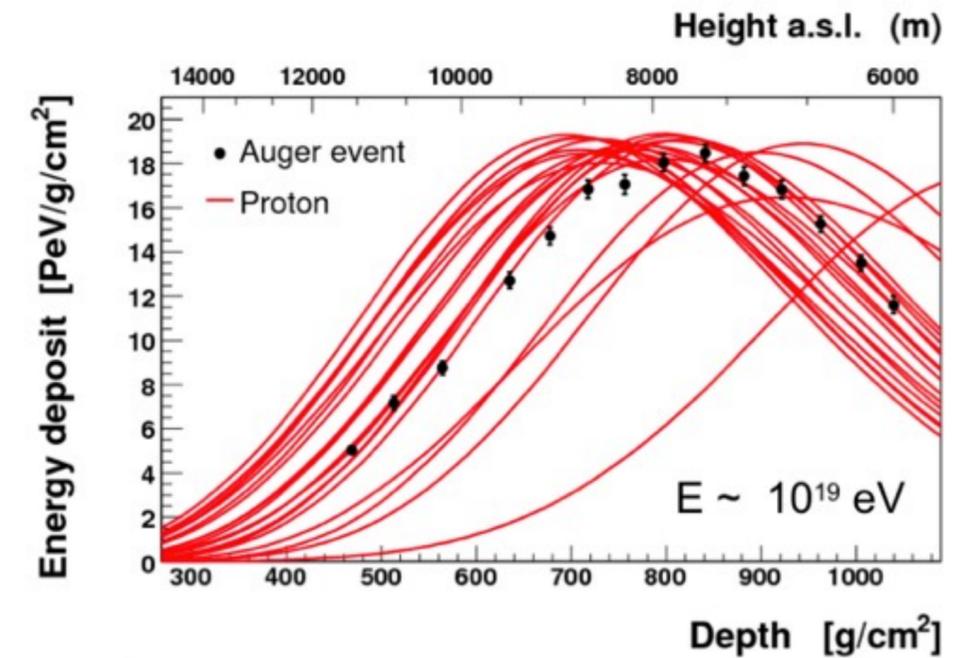
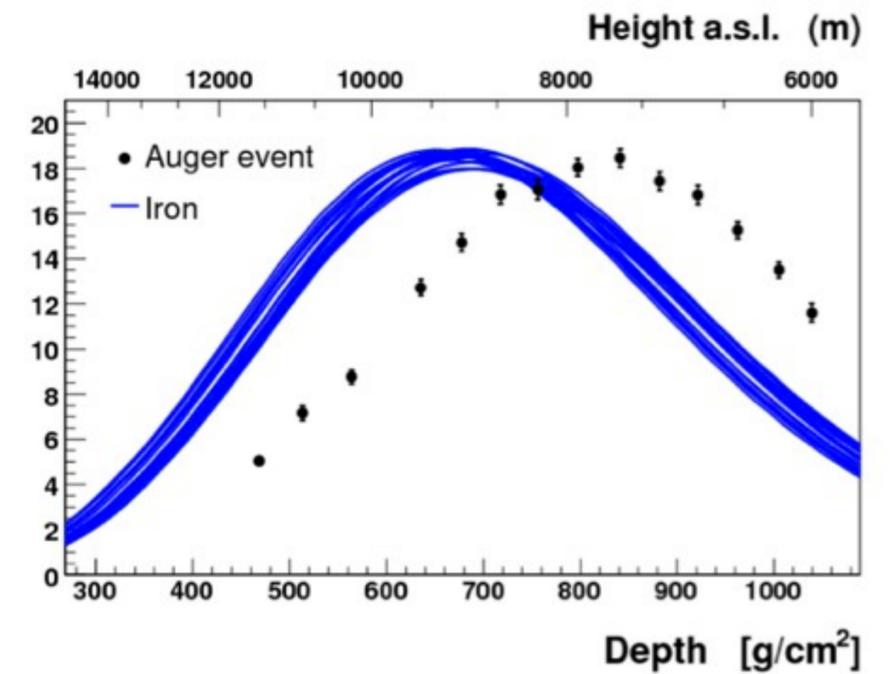
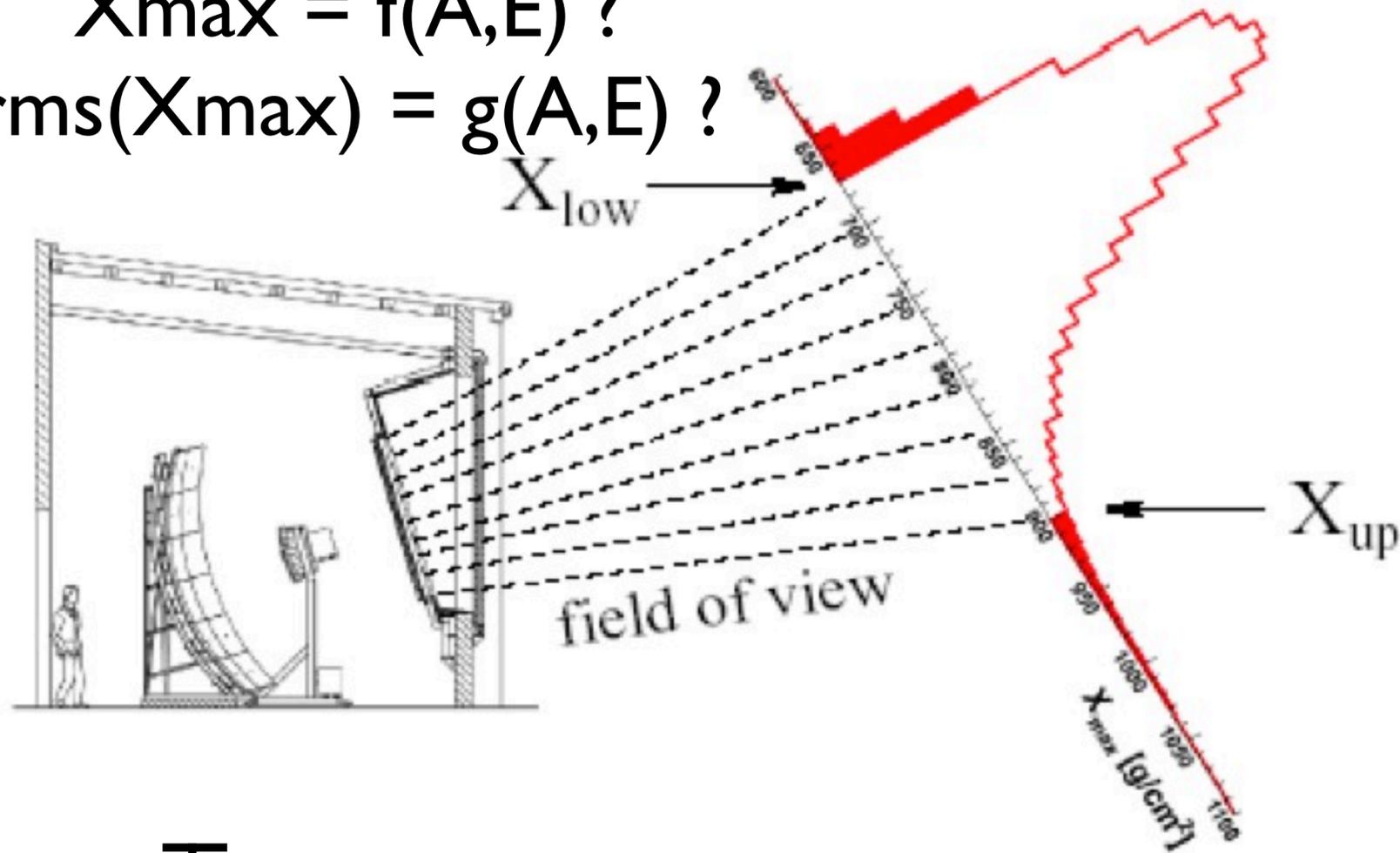


# Détection



# Reconstruction

$X_{max} = f(A, E) ?$   
 $rms(X_{max}) = g(A, E) ?$



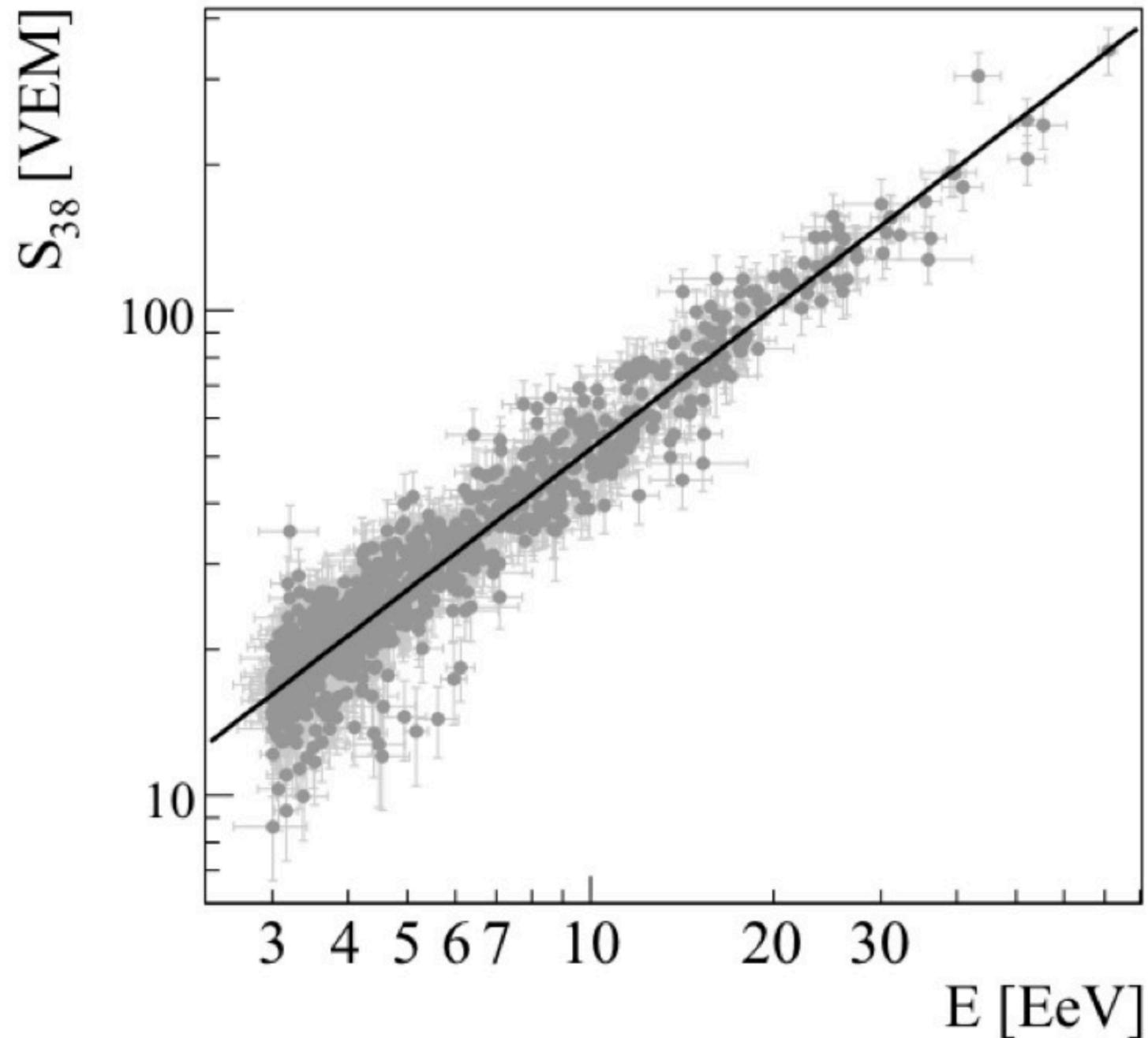
: très bien pour la direction d'arrivée, la position du cœur et la statistique



: très bien pour l'énergie (mesure calorimétrique) et la nature

# Calibration hybride

les avantages de la fluorescence + ceux du détecteur de particules



incertitude systématique totale  
pour le FD : 22%  
ces 22% sont dominés par le  
rendement de fluorescence

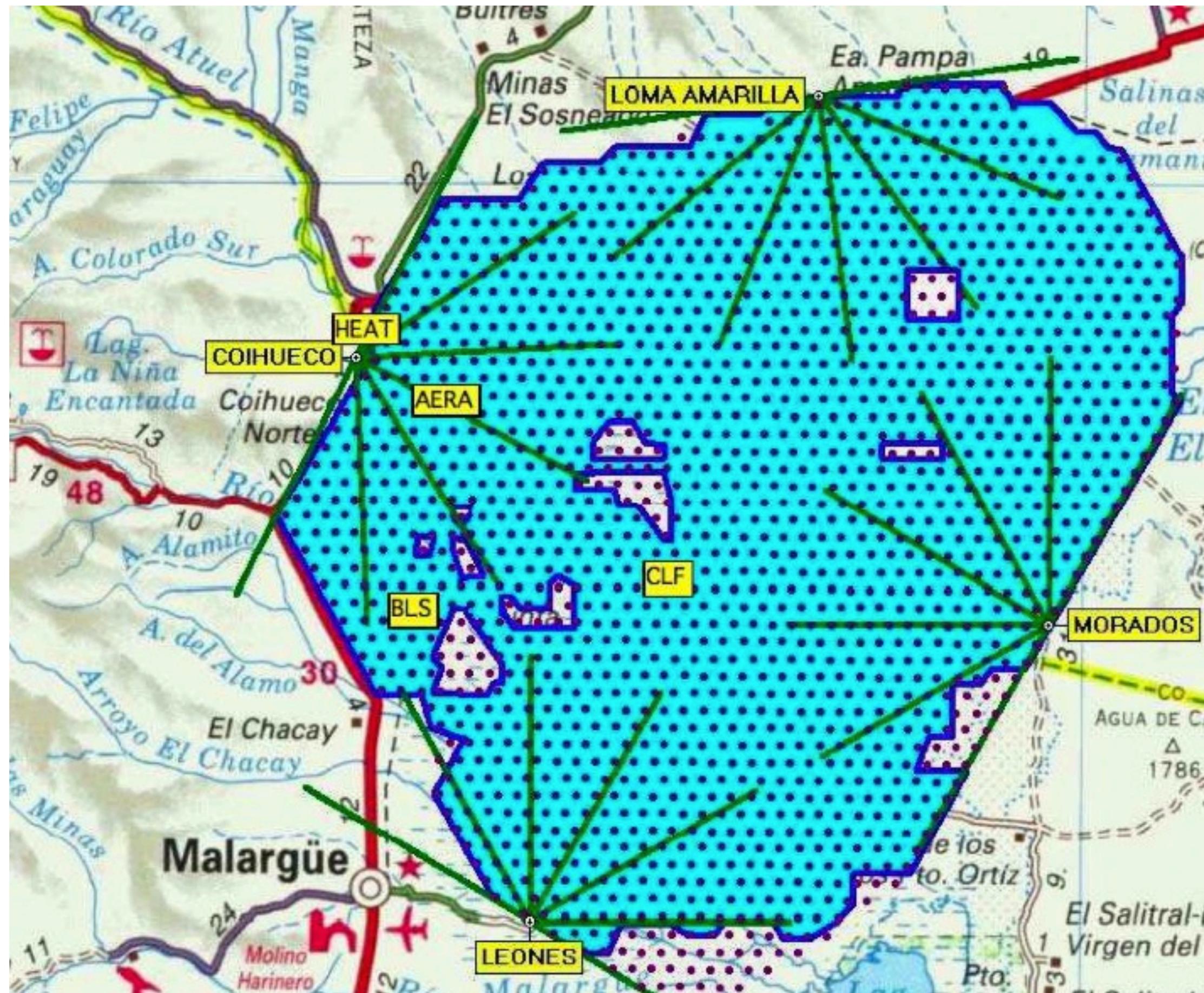
# L'observatoire Pierre Auger

500 personnes  
19 pays

3000 km<sup>2</sup>

1660 détecteurs  
de particules,  
espacés de 1.5 km

27 télescopes de  
fluorescence  
répartis en 4 sites



# L'observatoire Pierre Auger

500 personnes  
19 pays

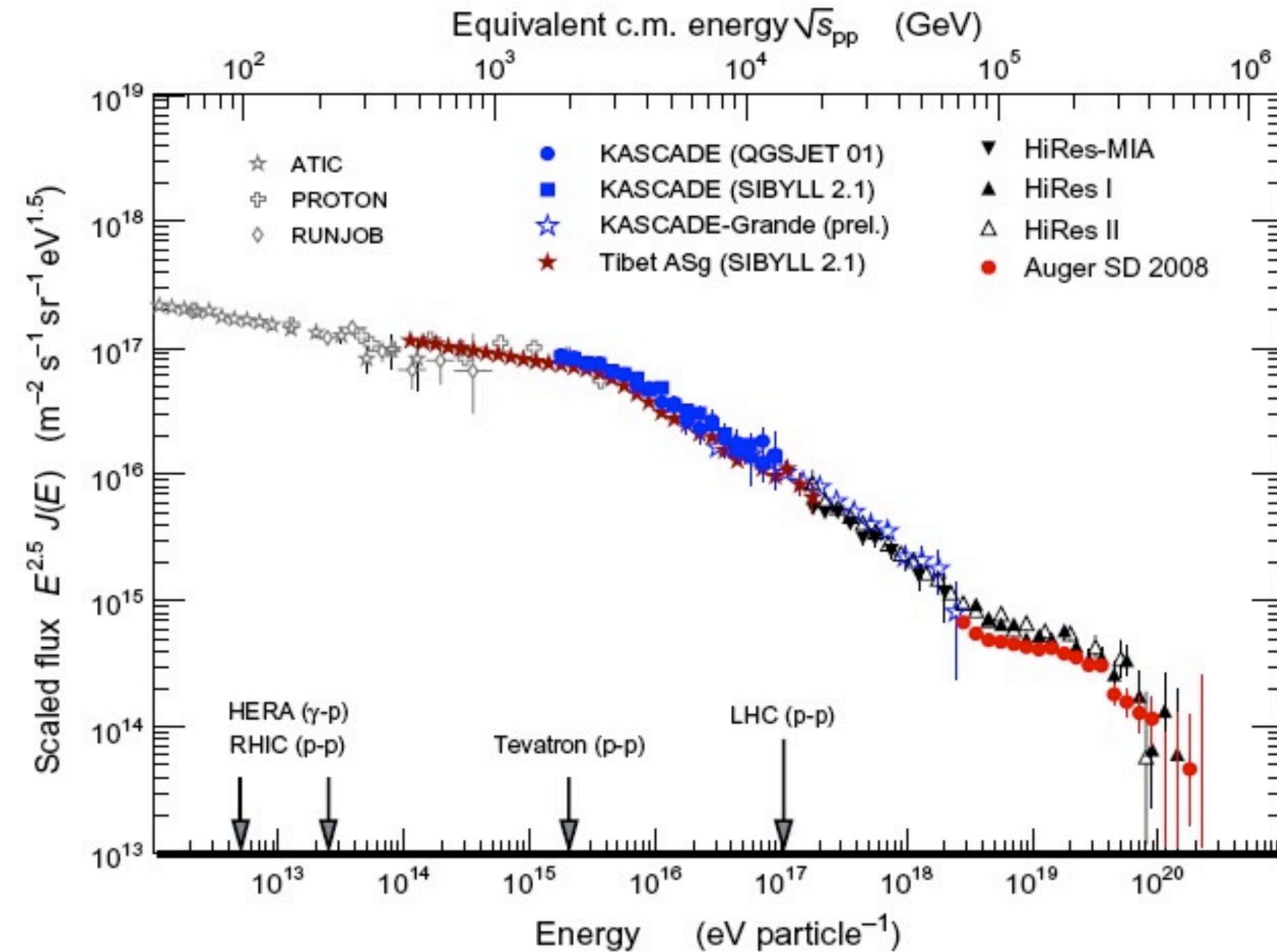
3000 km<sup>2</sup>

1660 détecteurs  
de particules,  
espacés de 1.5 km

27 télescopes de  
fluorescence  
répartis en 4 sites



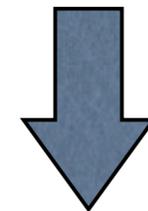
# Le spectre



- origine galactique jusqu'à la cheville
- entre le genou et la cheville :  
échappement des particules ( $R_L > R_{Gal}$ ), du proton au fer
- à partir de la cheville : origine extra-galactique

mais si l'origine est bien extra-galactique, alors :

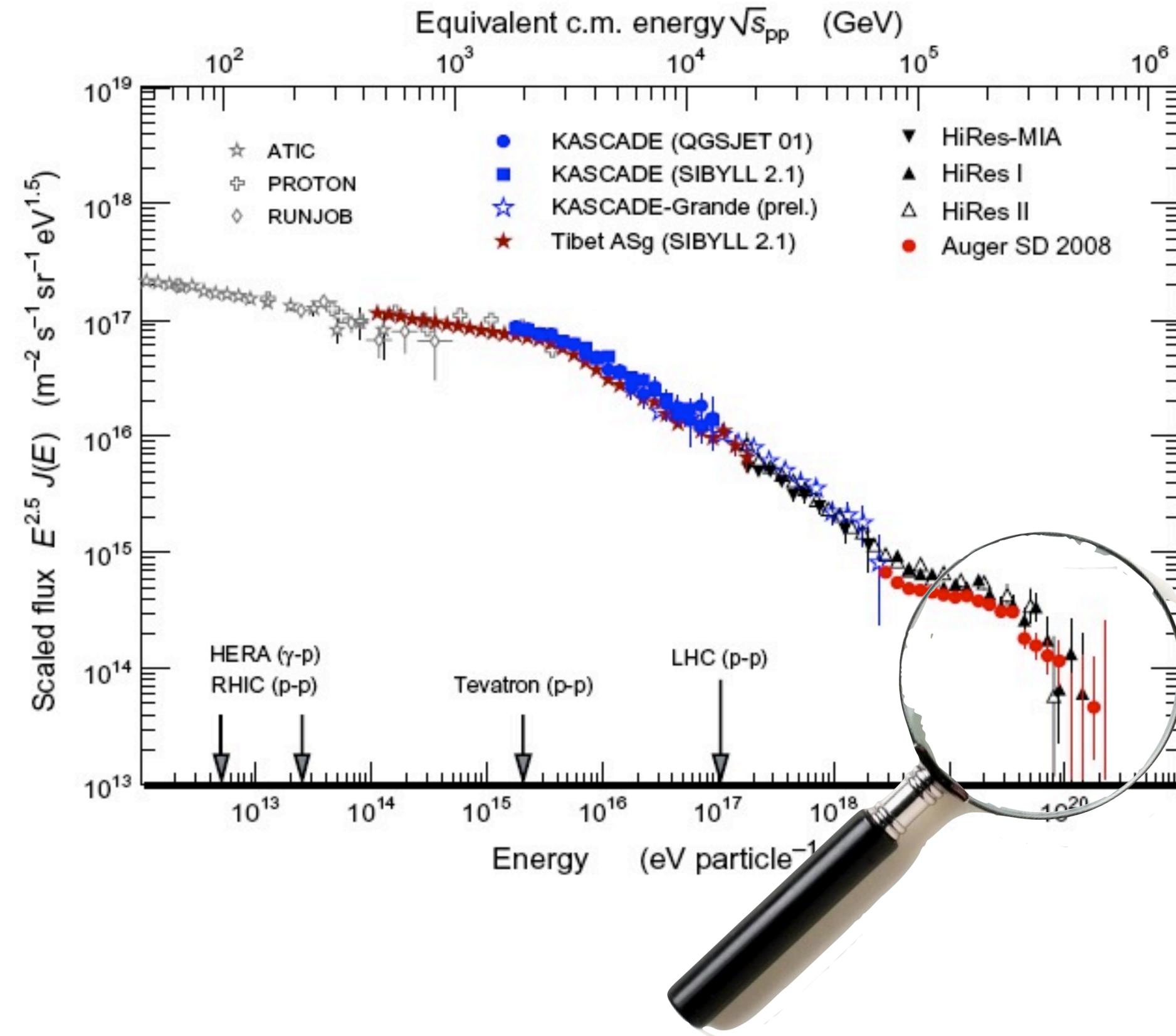
- coupure GZK (interaction avec le CMB)
- sources proches



compréhension des phénomènes les plus violents de l'univers  
physique des particules 3 ordres de grandeur au-dessus du LHC

**énergie, sources, nature ?**

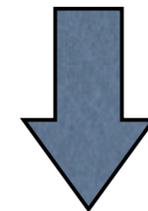
# Le spectre



- origine galactique jusqu'à la cheville
- entre le genou et la cheville :  
échappement des particules ( $R_L > R_{Gal}$ ), du proton au fer
- à partir de la cheville : origine extra-galactique

mais si l'origine est bien extra-galactique, alors :

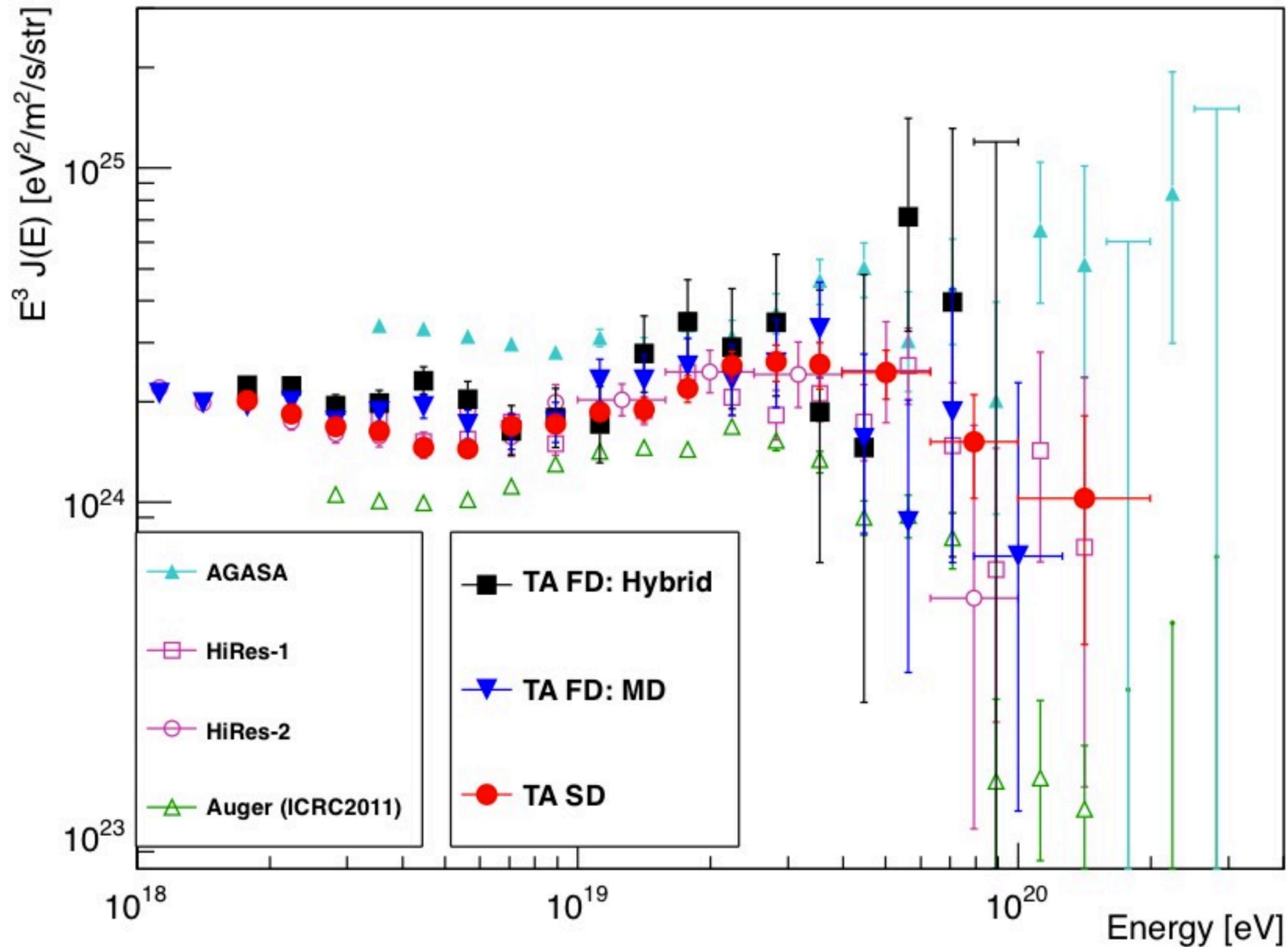
- coupure GZK (interaction avec le CMB)
- sources proches



compréhension des phénomènes les plus violents de l'univers  
physique des particules 3 ordres de grandeur au-dessus du LHC

**énergie, sources, nature ?**

# Le spectre aux énergies les plus hautes



HiRes  
coupure  $\sim 5\sigma$

TA  
coupure =  $3.9\sigma$

Pierre Auger Observatory  
coupure  $> 20\sigma$

**Une coupure dans le spectre est observée de façon non-ambigüe**

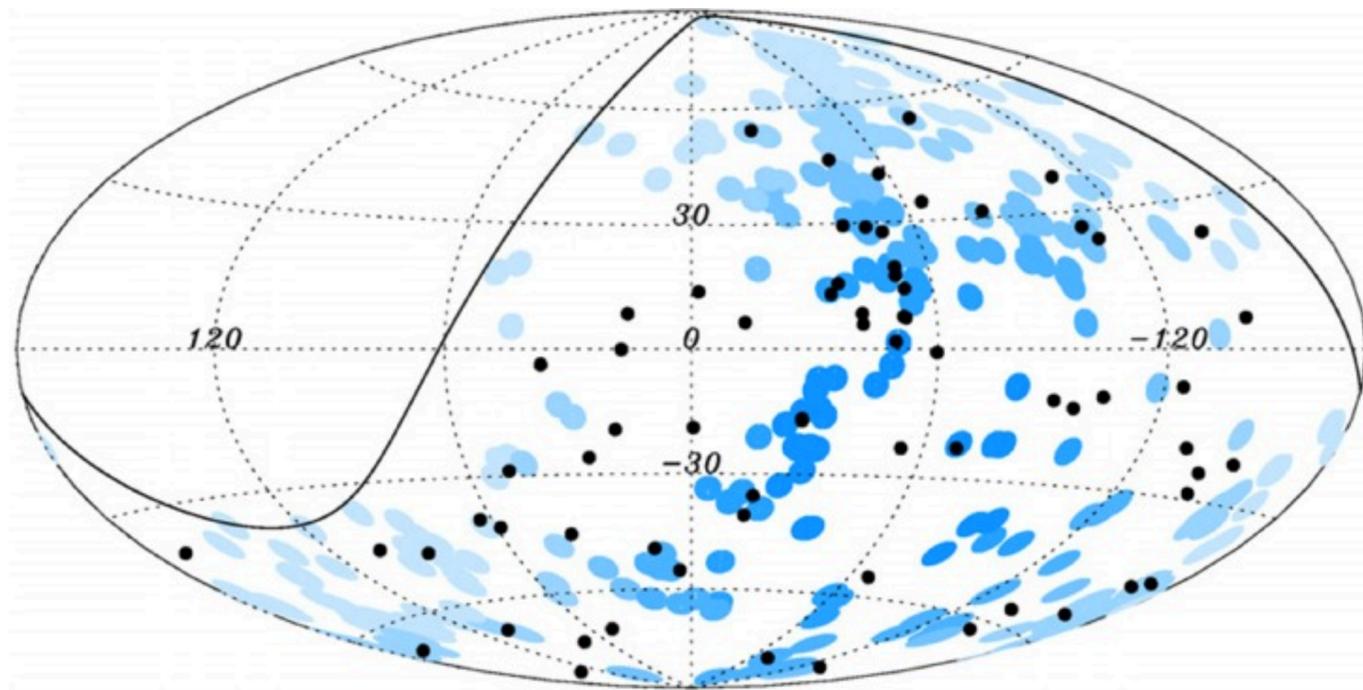
**$E = 4.2 \times 10^{19}$  eV**

# Directions d'arrivée, recherche des sources

à ultra-haute énergie, on peut rechercher les sources car  
les directions d'arrivées sont peu déviées

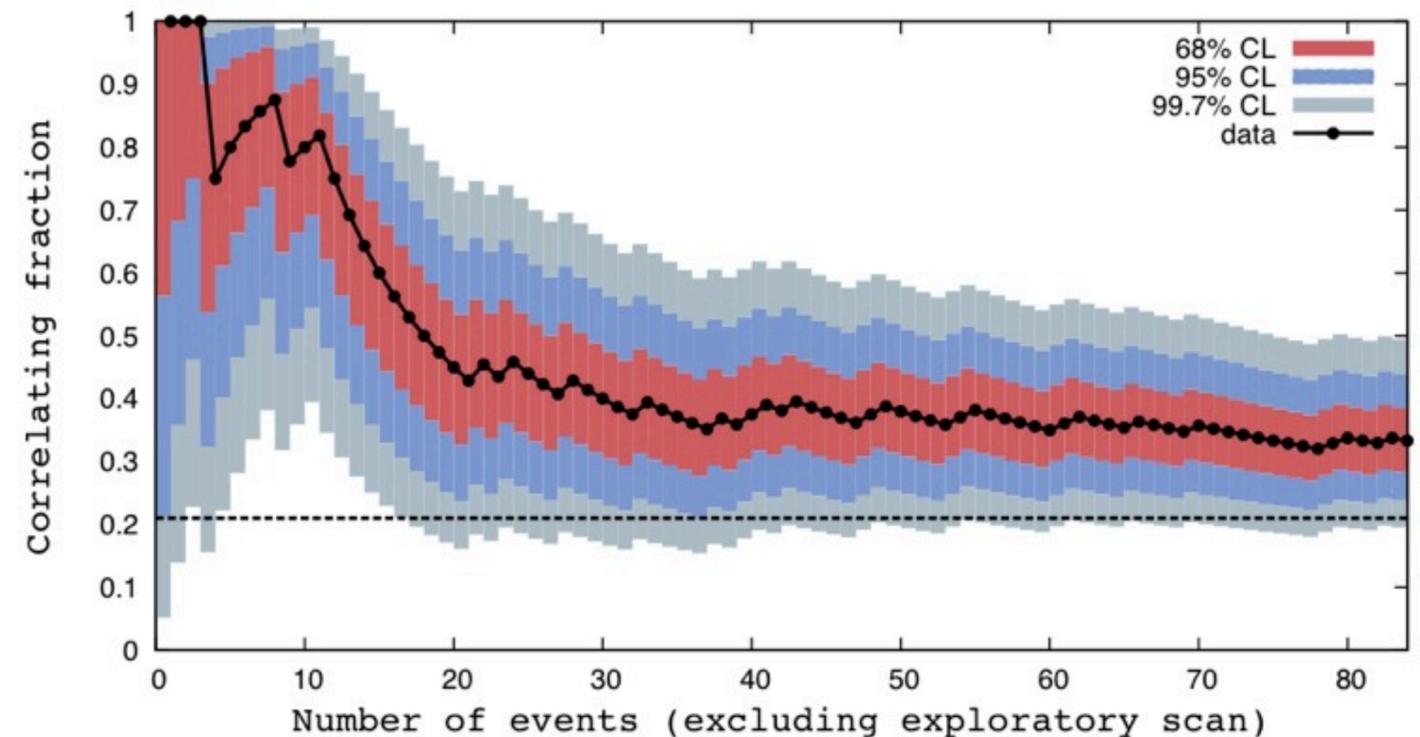
**hémisphère nord** : isotrope pour HiRes et TA

**hémisphère sud** : anisotrope pour Auger



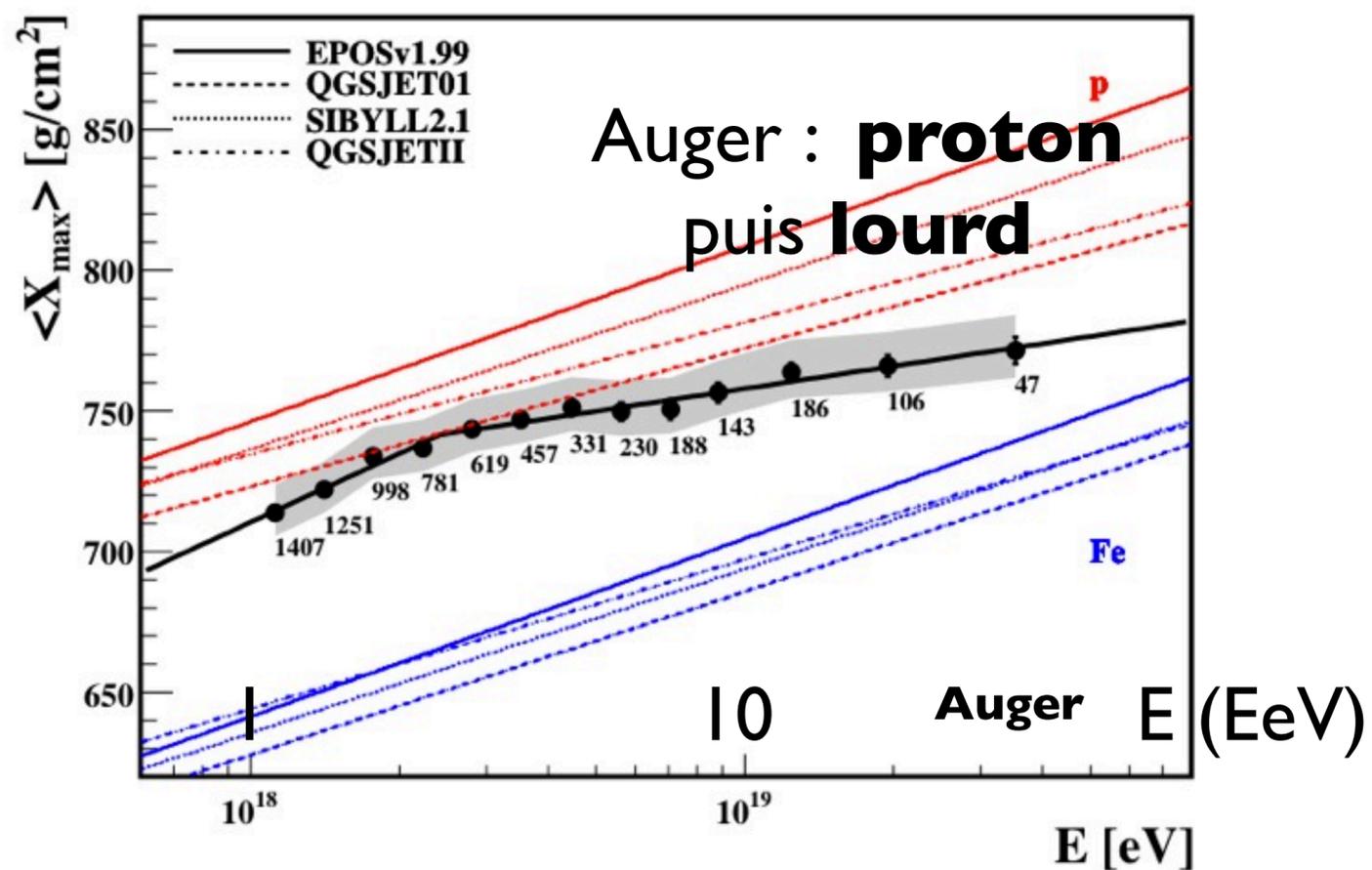
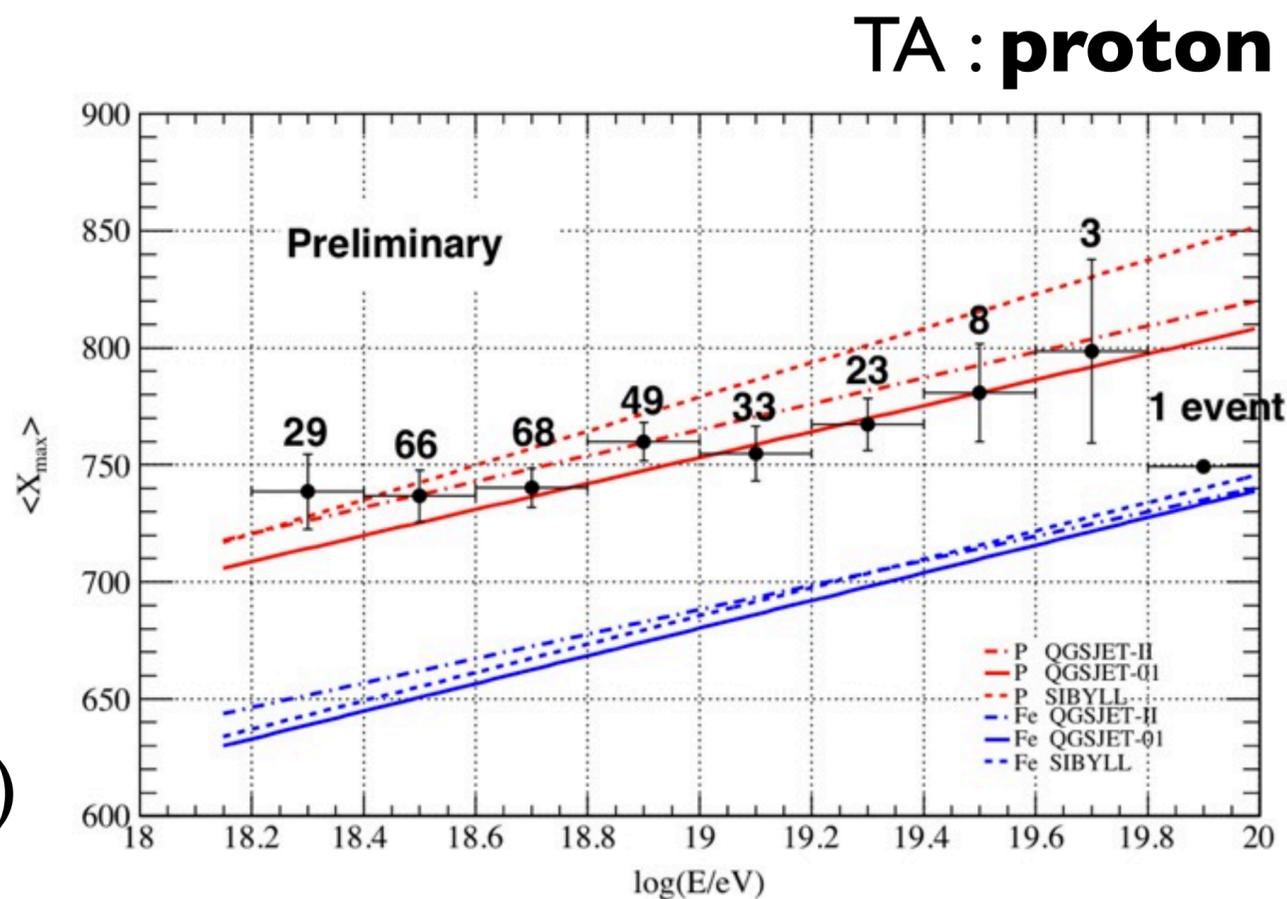
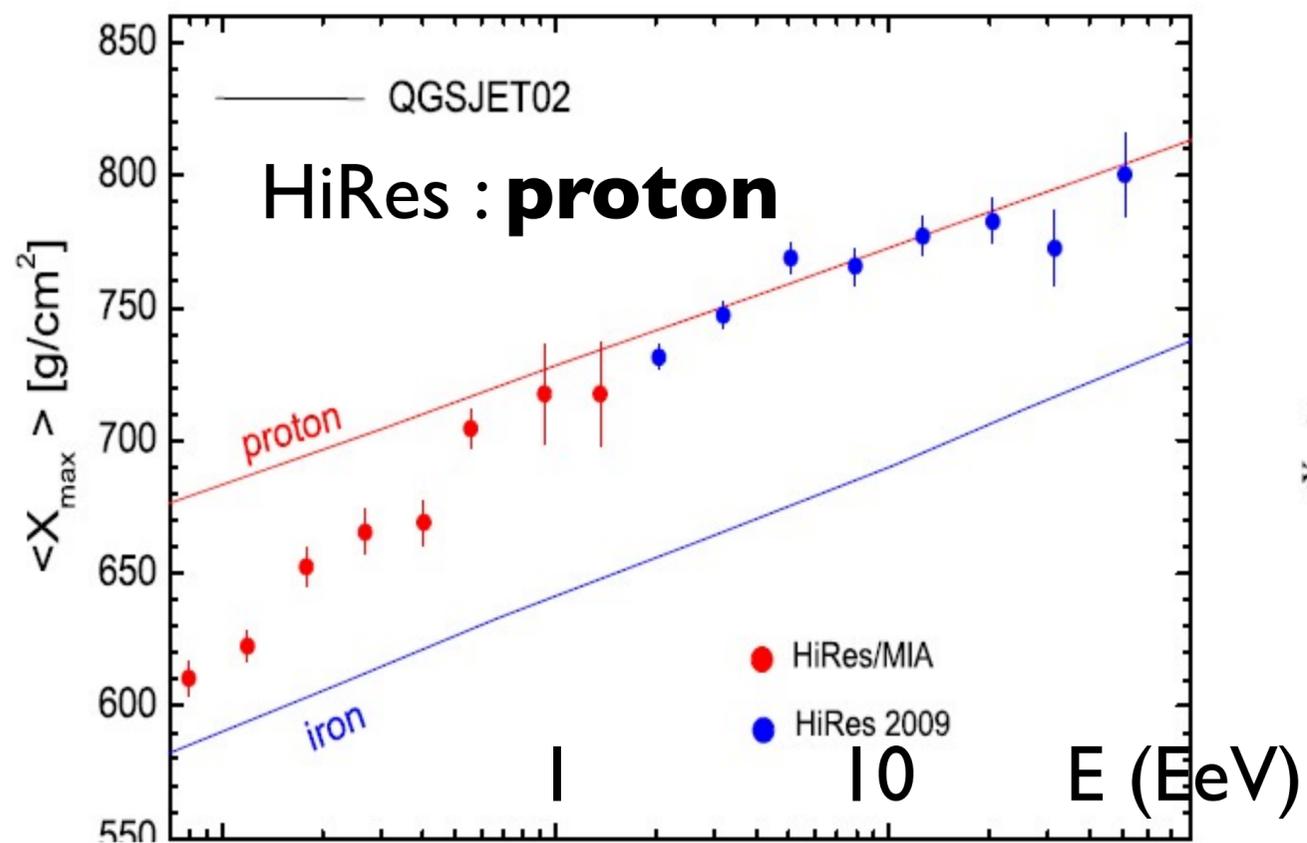
cercles de rayon  $3.1^\circ$  centrés sur  
les AGN ( $< 75$  Mpc, catalogue VC)

CenA à surveiller !



degré de corrélation : de  $69 (\pm 12) \%$  à  $33 (\pm 5) \%$   
 $21\%$  dans le cas isotrope  
 $\sim 12\%$  de vraie corrélation

# Composition



**hémisphère nord** : HiRes et TA compatibles avec des protons, à toutes les énergies

**hémisphère sud** : Auger voit des protons jusqu'à ~ 5 EeV puis des noyaux lourds

# Le futur ?

Auger : ~ 30 événements/an avec  $E > 55 \text{ EeV}$

Composition : indispensable pour connaître les mécanismes de production  
le facteur limitant est la faible statistique

Un détecteur plus grand est nécessaire  
( $> 20\,000 \text{ km}^2$  pour un détecteur de type Auger)

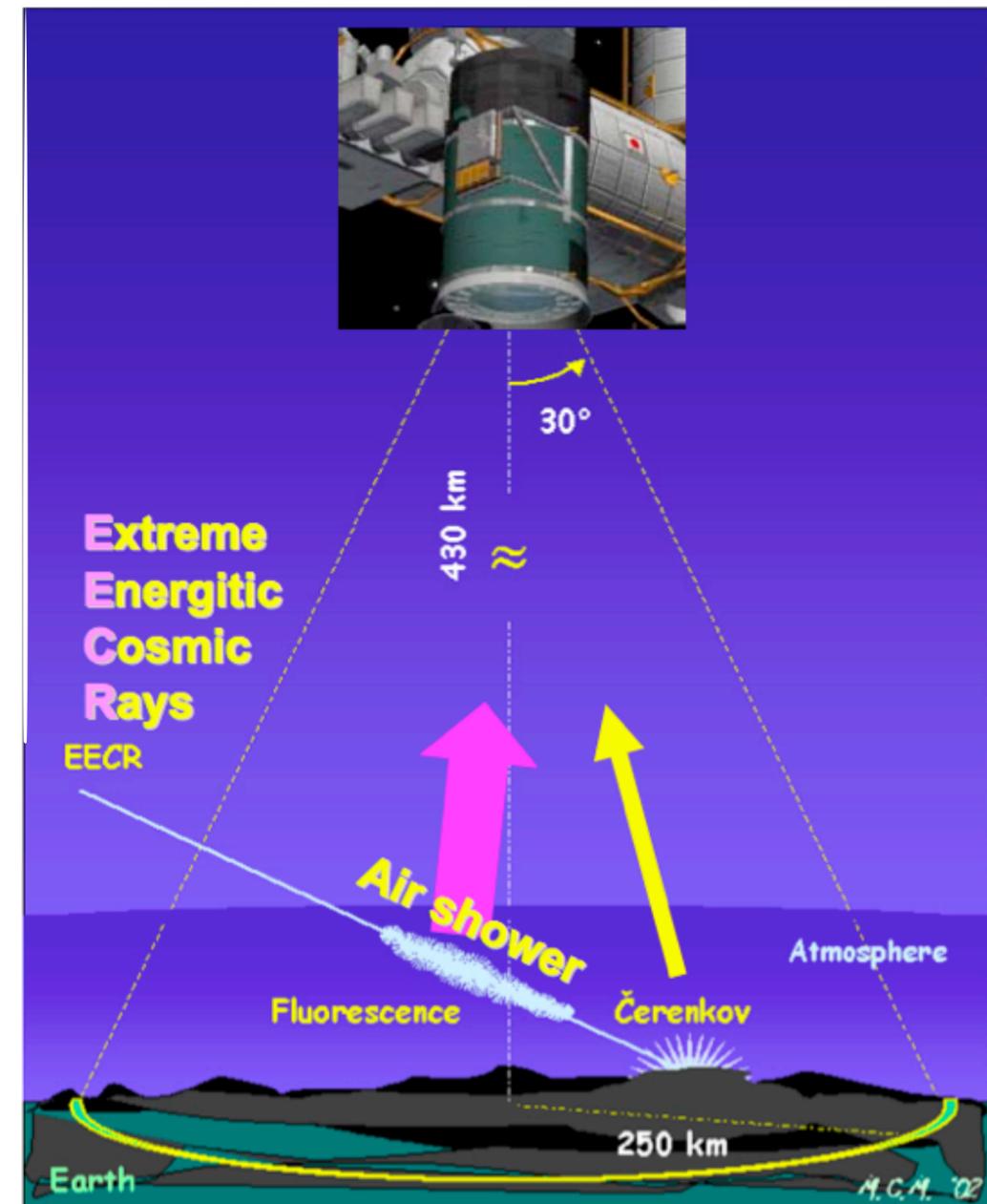
**mais**

Auger Nord : non financé

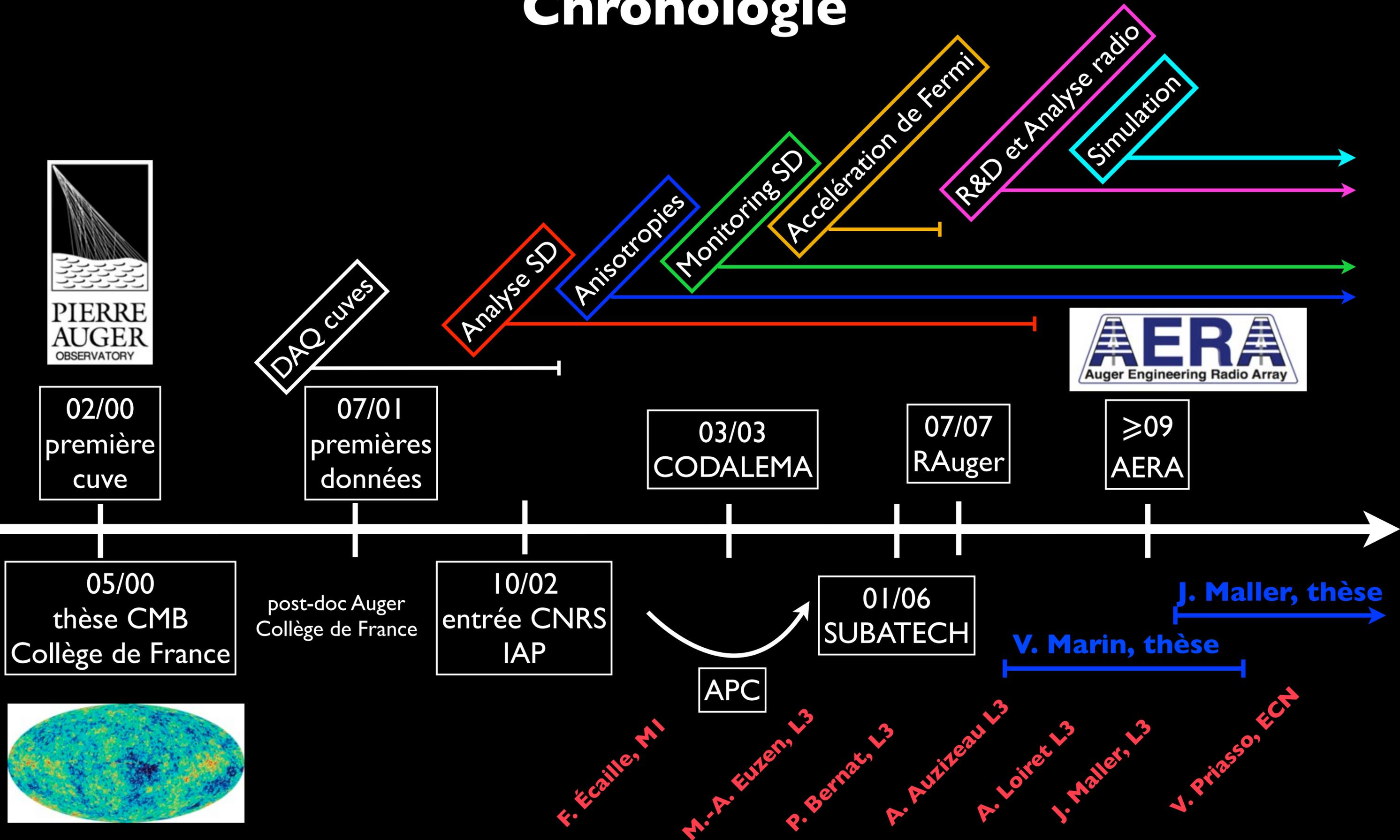
JEM-EUSO : phase R&D

- **améliorer les détecteurs actuels (en cours)**
- **détection GHz, R&D**
- **détection MHz, bien avancé**

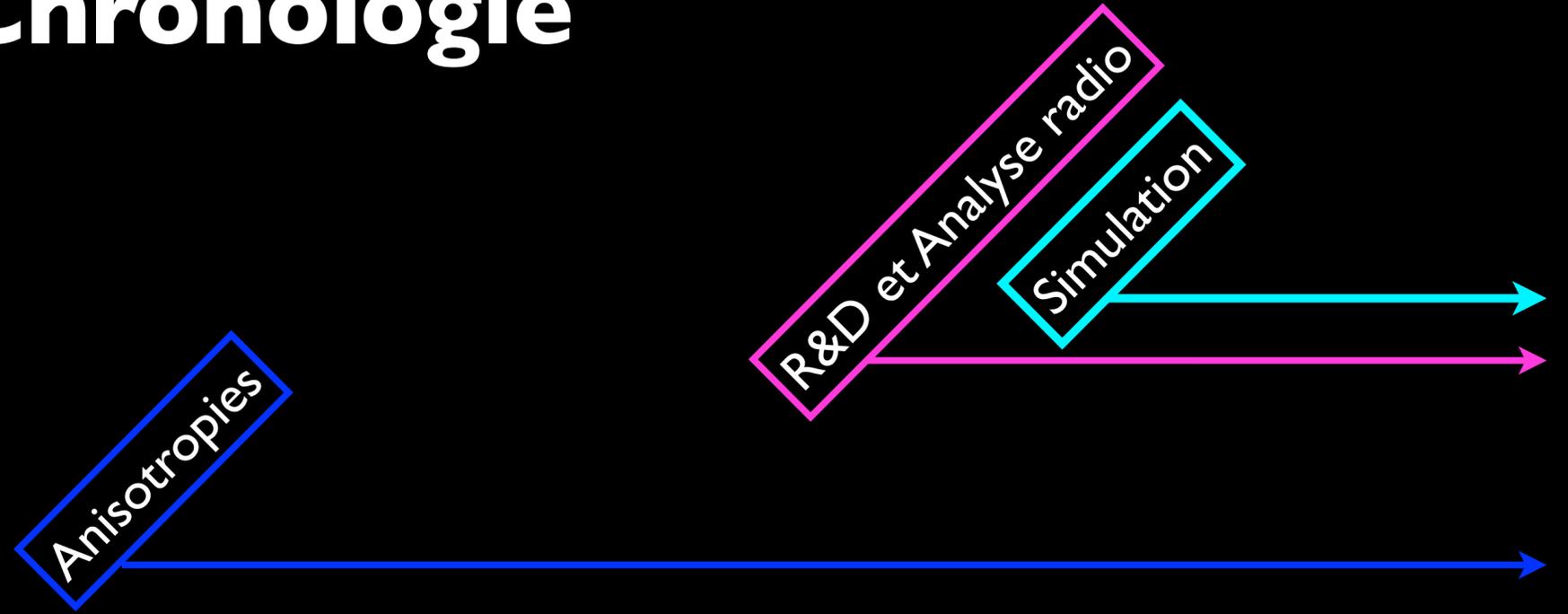
radio-détection de la gerbe  
atmosphérique dans le  
domaine radio (MHz)



# Chronologie



# Chronologie



**Anisotropies**



# Recherche des sources

- première communication à l'ICRC 2005 (Pune, Inde) : pas de source apparente entre 1 et 5 EeV et au-dessus de 5 EeV en recherche aveugle, aucun excès d'événements dans des directions prédéfinies (centre galactique...)
- fin 2012 : 20 fois plus de données (~ 700 000 au-dessus de 1 EeV), analyse bien plus complète
- principe : pour une échelle angulaire donnée, on calcule le **nombre d'événements attendus** (hypothèse isotrope) et on le compare au **nombre d'événements observés**
- si **nombre d'événements observés**  $\approx$  **nombre d'événements attendus**, compatible avec l'isotropie, sinon... peut-être une source !

# Recherche des sources

nombre de rayons cosmiques attendus = carte de couverture

$$W(\alpha, \delta) = \int_{t_{\min}}^{t_{\max}} a(\theta(\alpha, \delta, t), \phi(\alpha, \delta, t), t) dt.$$

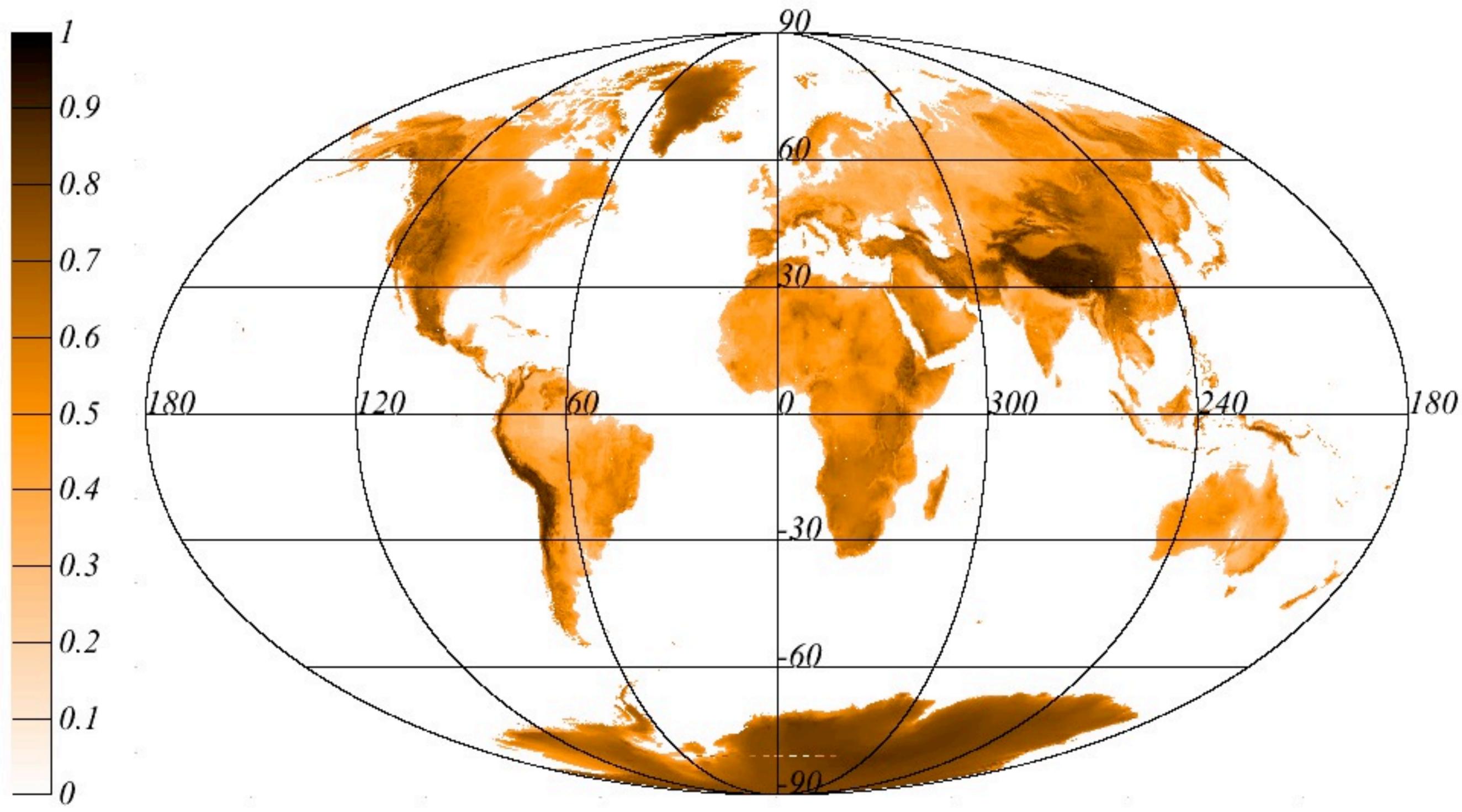
$a(t)$  : prise en compte de la taille variable du détecteur

$a(\theta(t))$  : prise en compte de l'acceptance zénithale

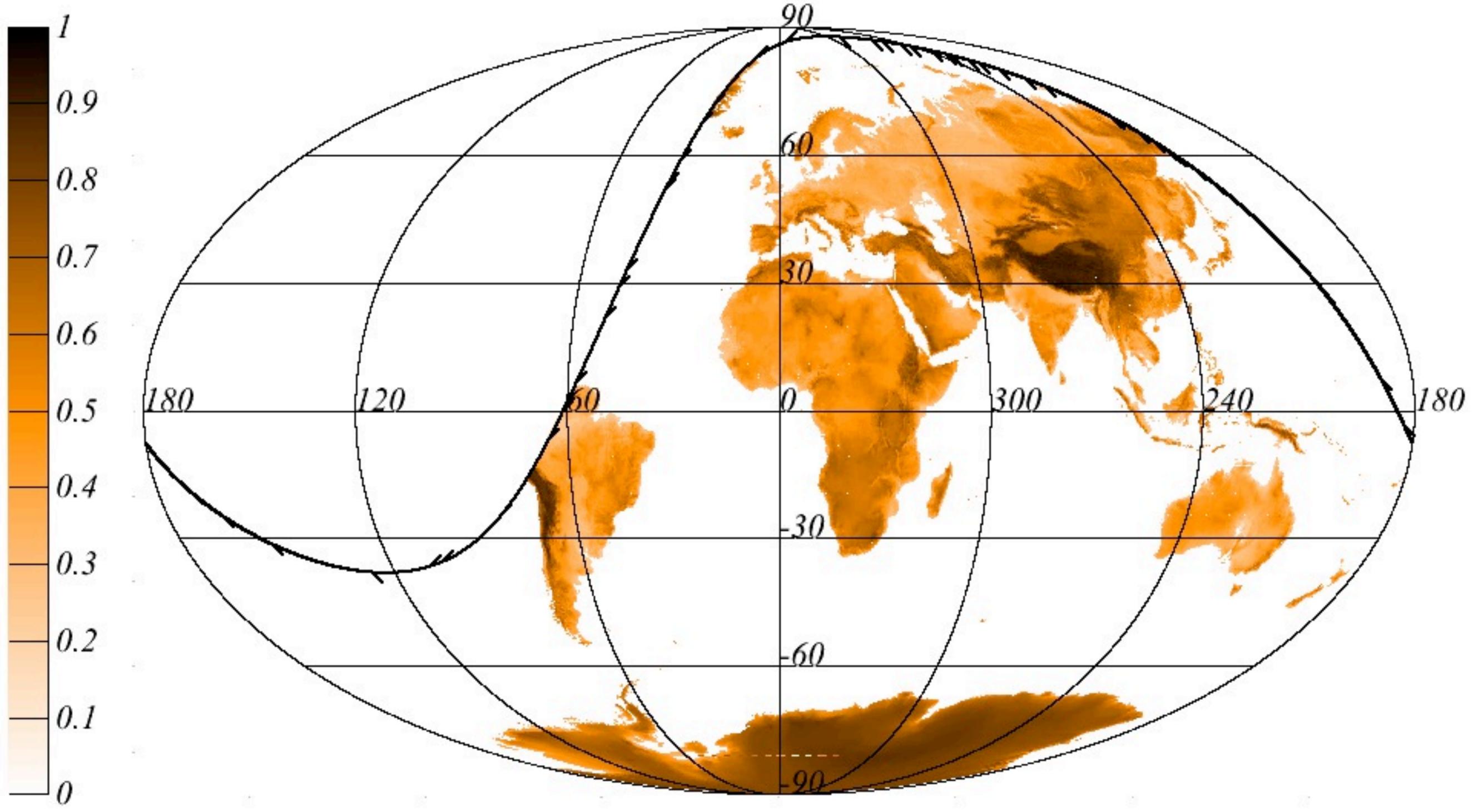
$a(\phi(t))$  : prise en compte de l'acceptance azimuthale

dans les cas simples, ces trois fonctions sont indépendantes,  
on peut alors faire le produit de ces acceptances

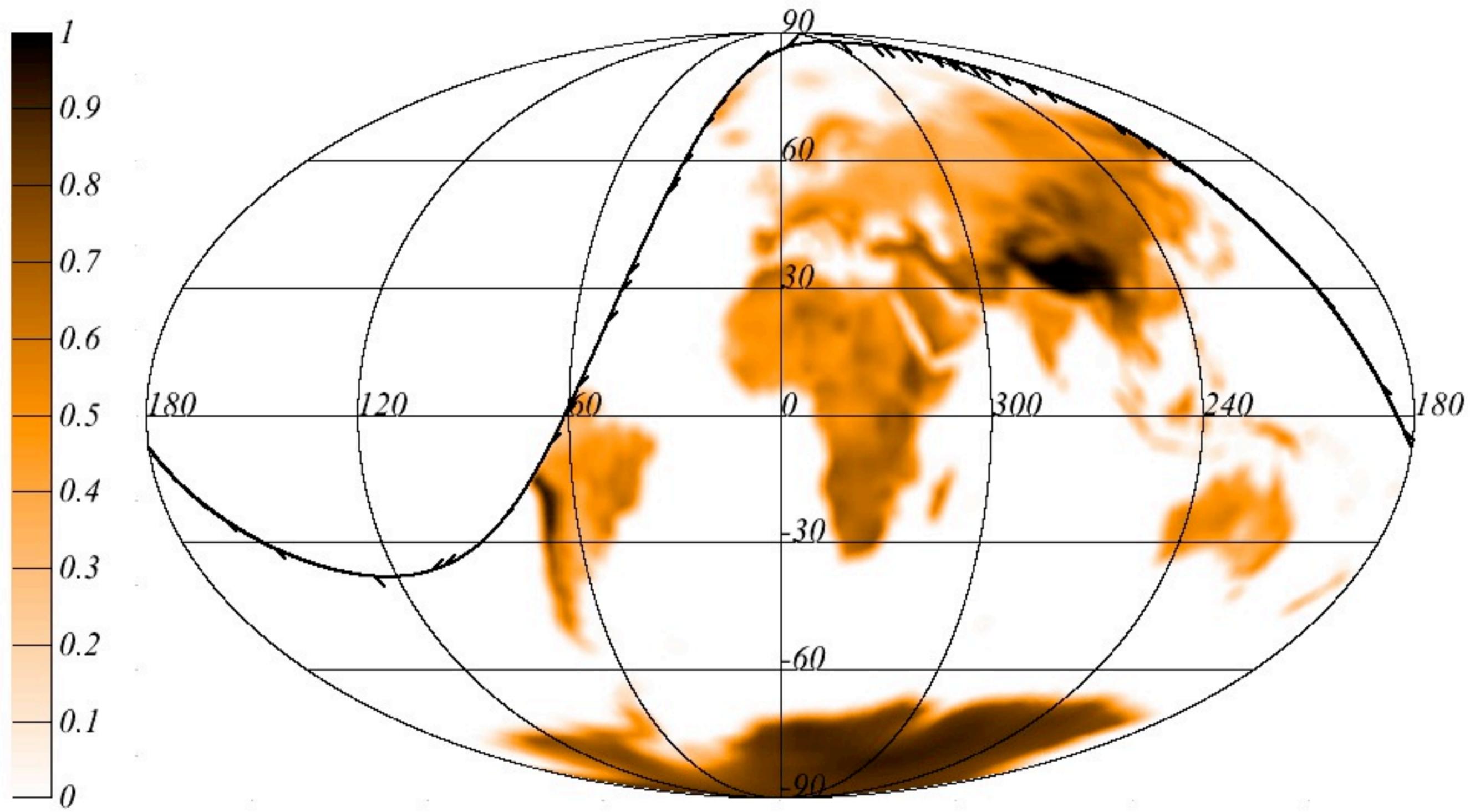
*Earth Map*



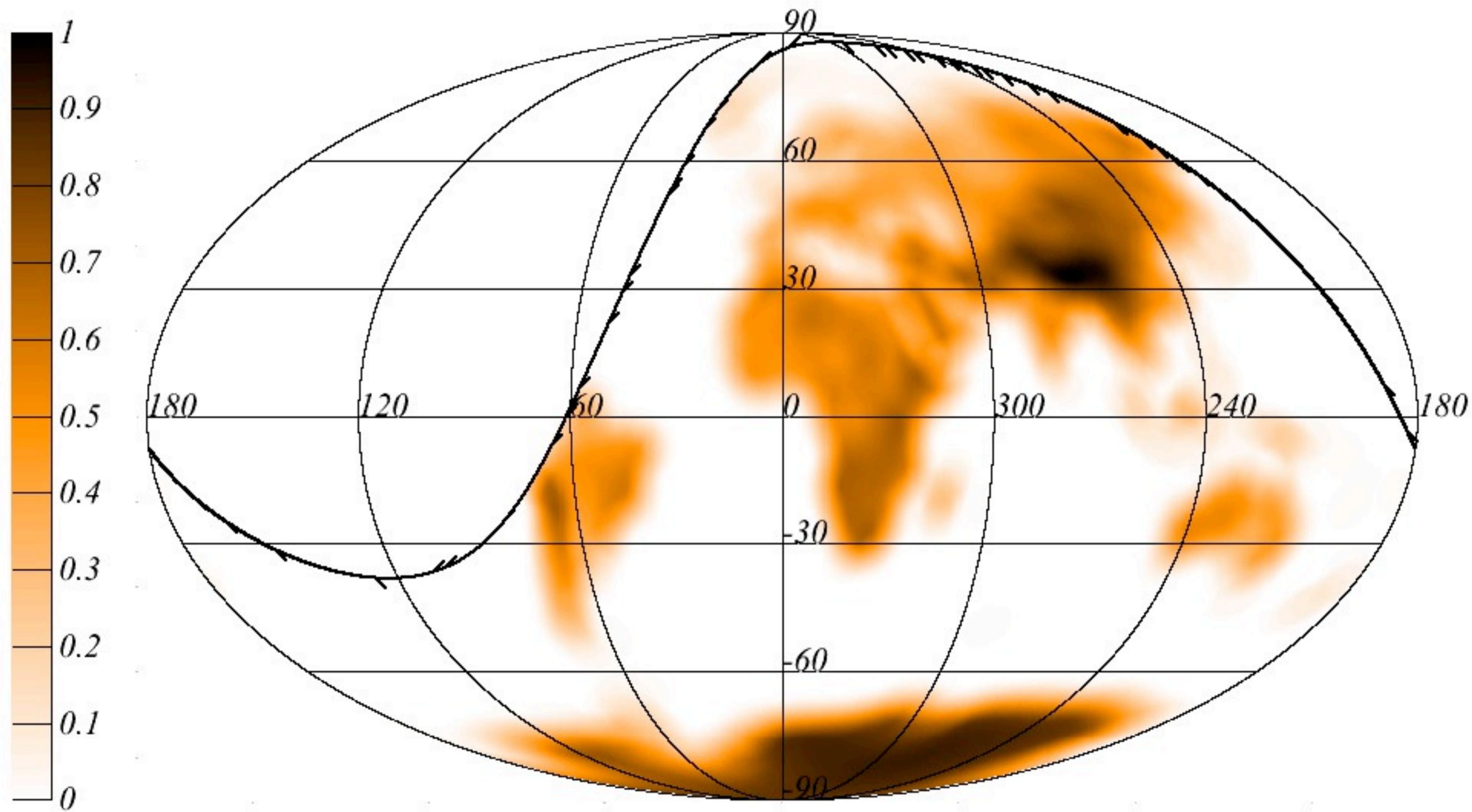
*Earth Map*



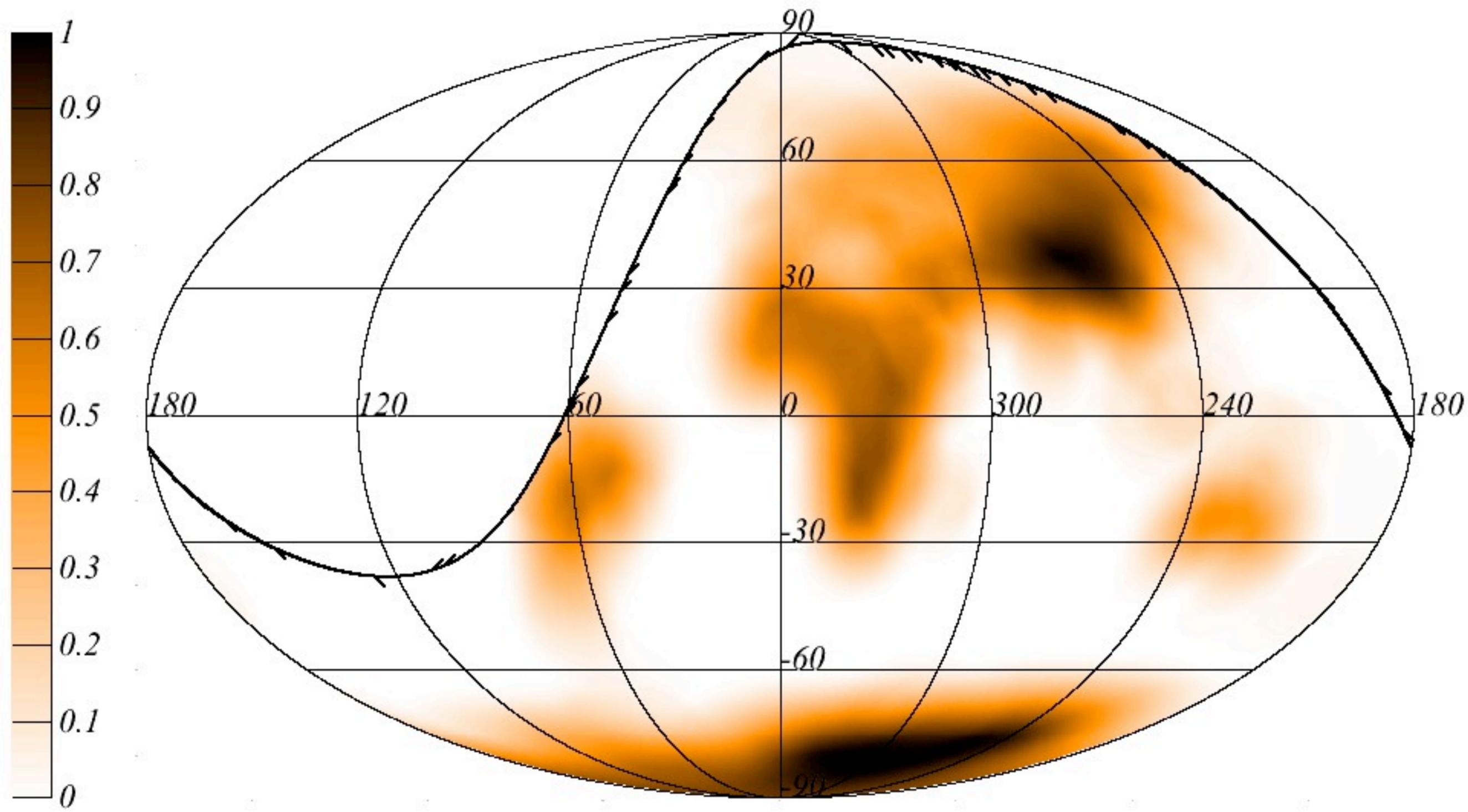
*Earth Map at 2 degrees*



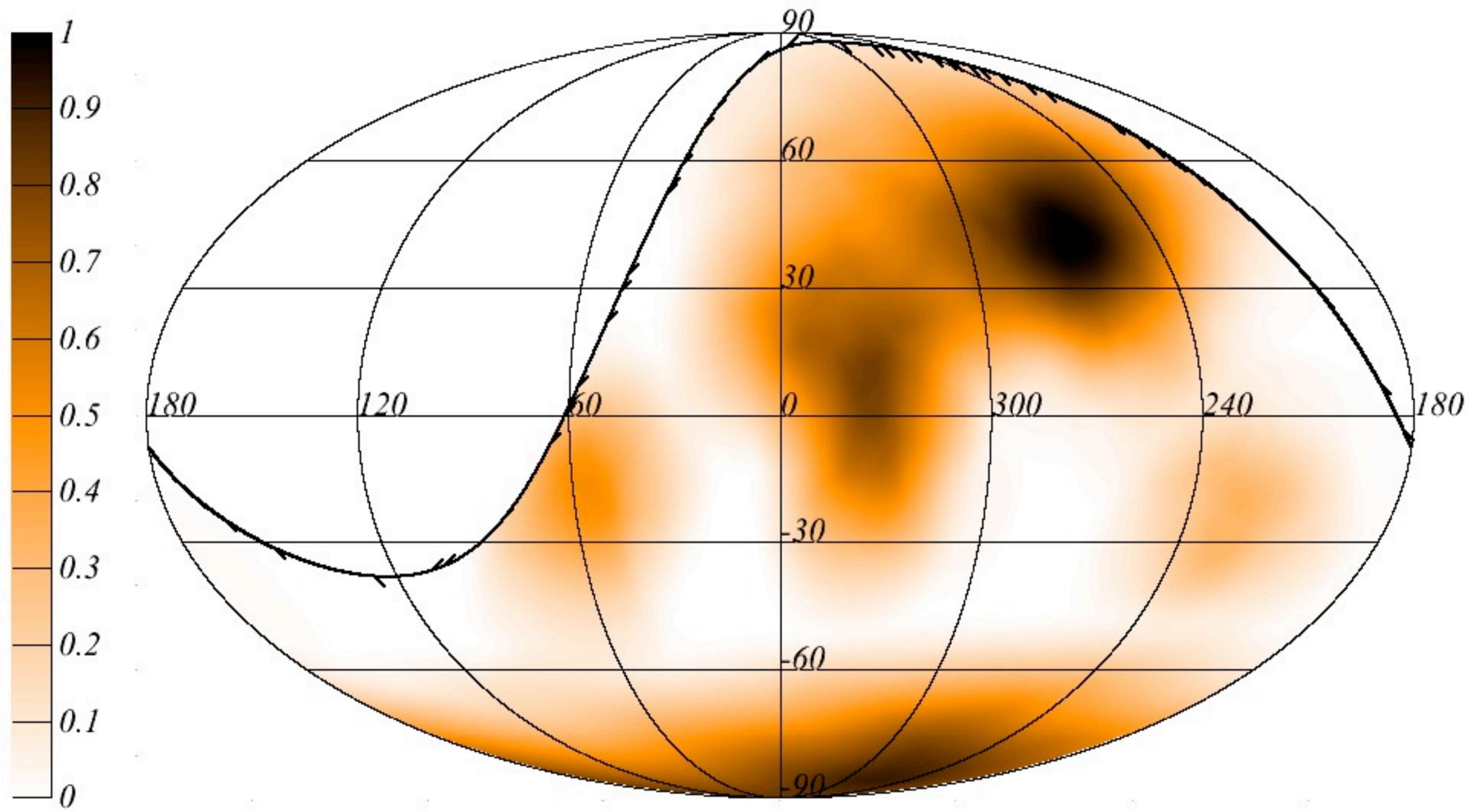
*Earth Map at 5 degrees*



*Earth Map at 10 degrees*



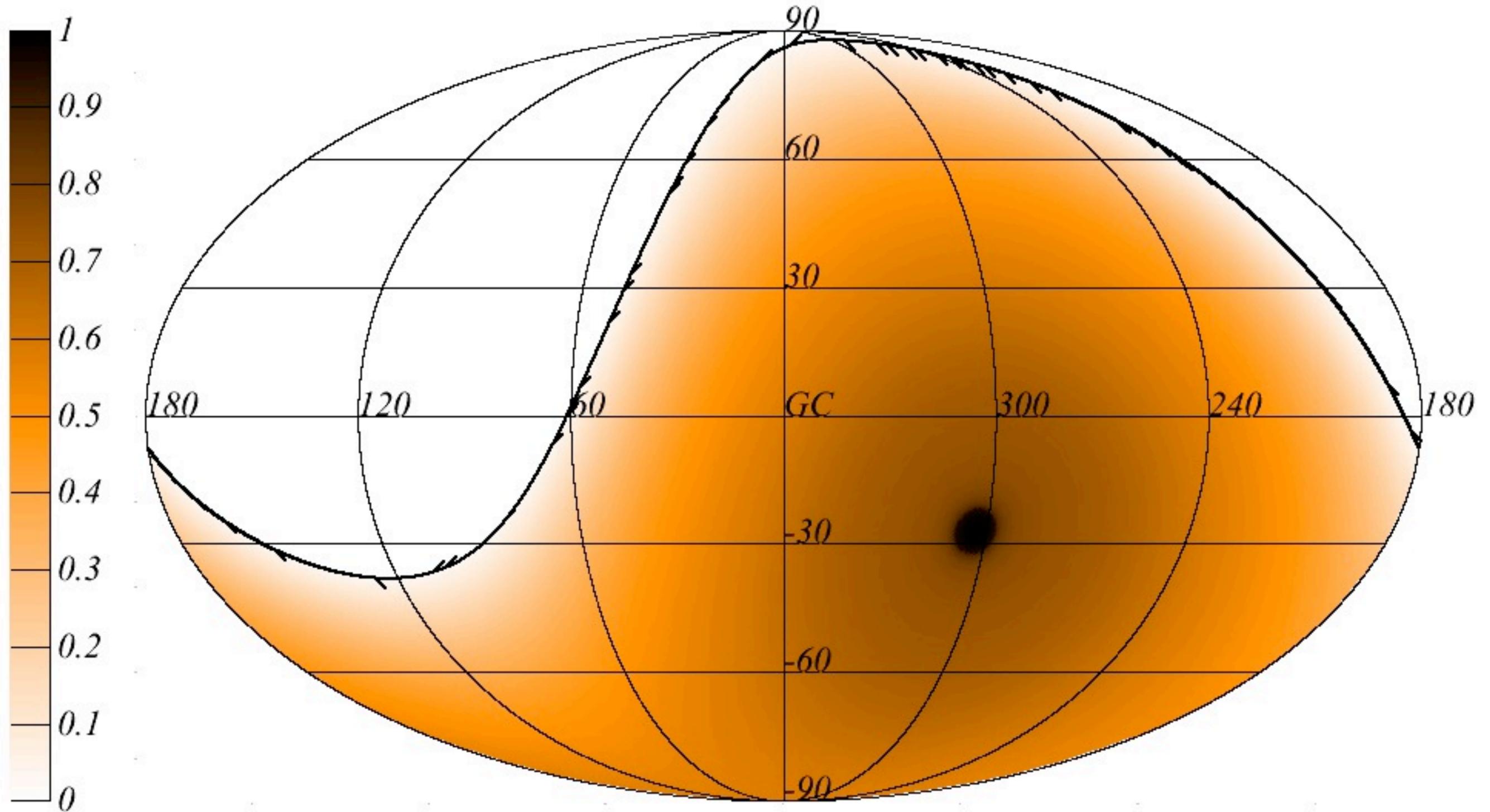
*Earth Map at 20 degrees*



# Recherche des sources

répartition sur le ciel des rayons cosmiques attendus

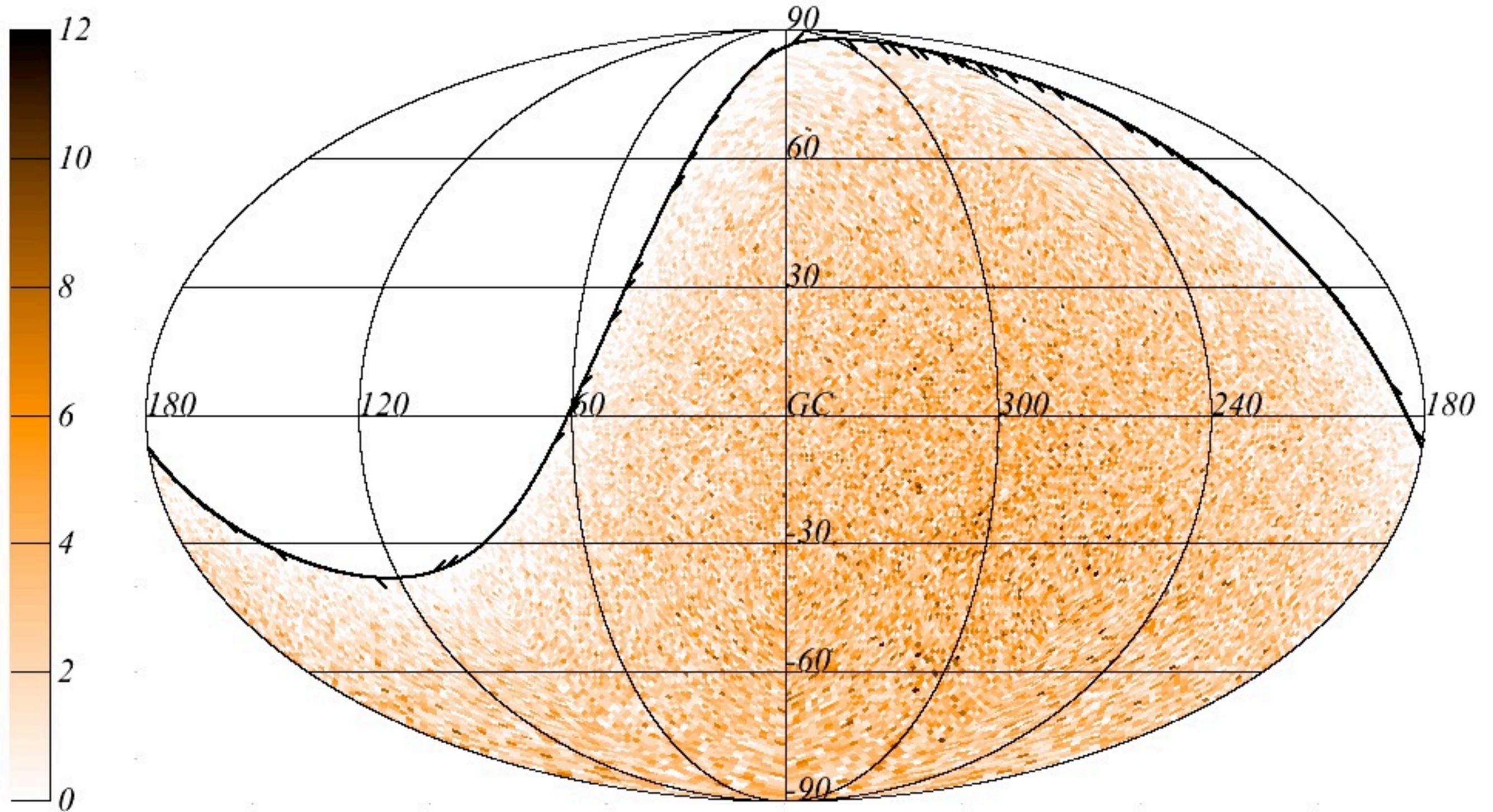
*Coverage Map*



# Recherche des sources

83 109 événements entre 1 et 1.1 EeV

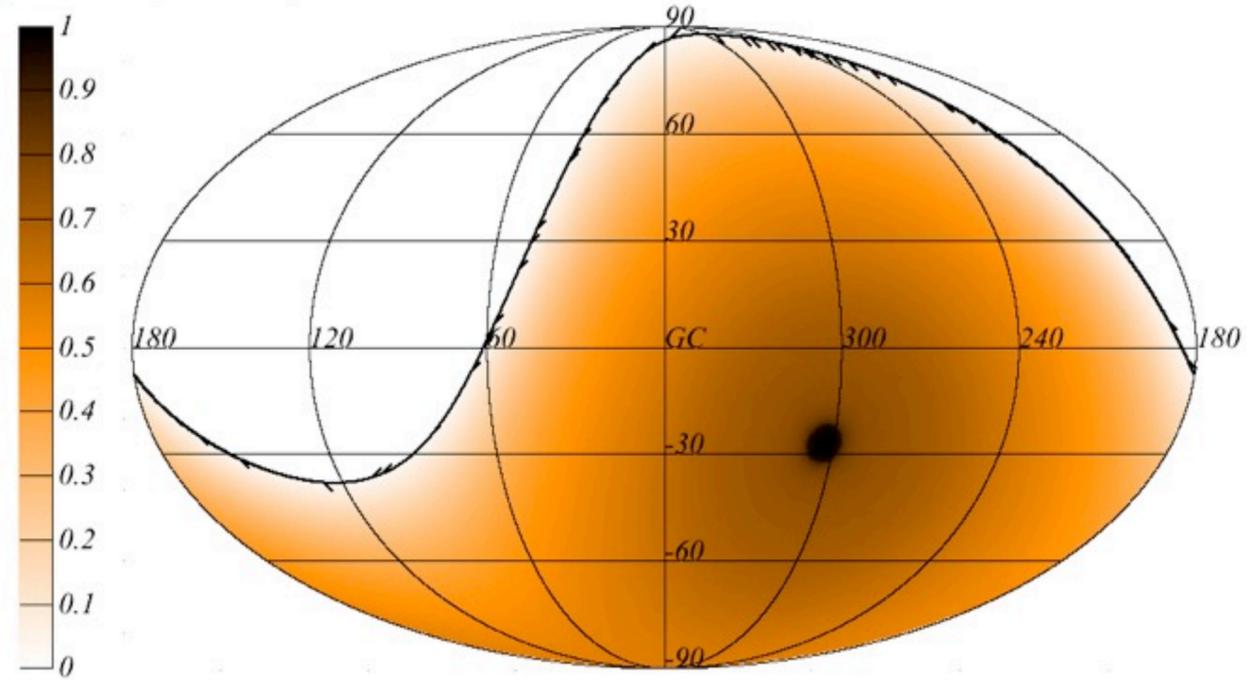
*Raw events map*



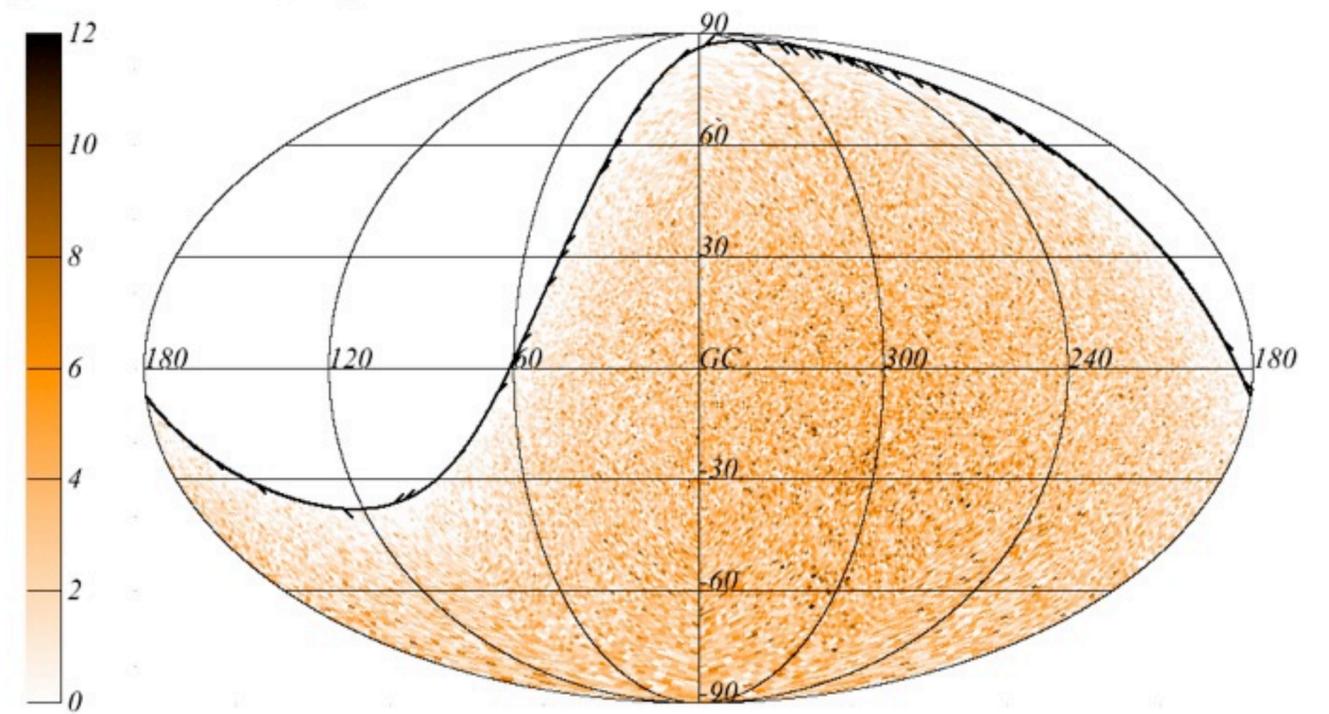
# Recherche des sources

83 109 événements entre 1 et 1.1 EeV

Coverage Map



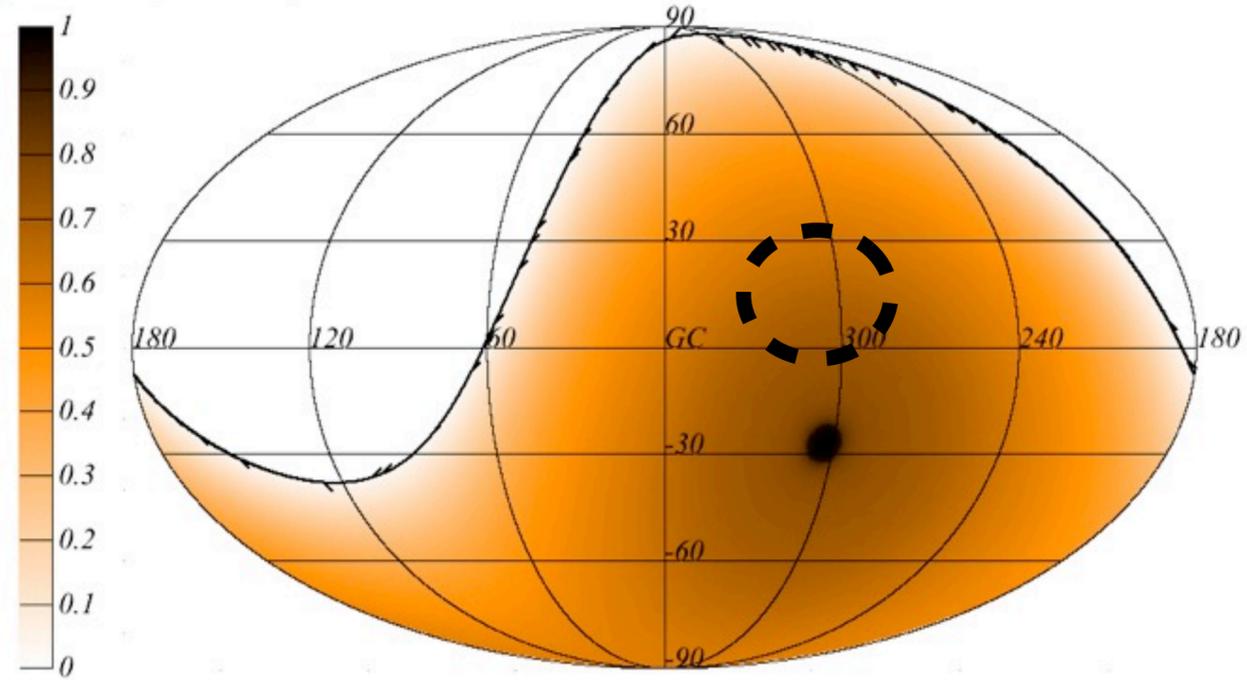
Raw events map



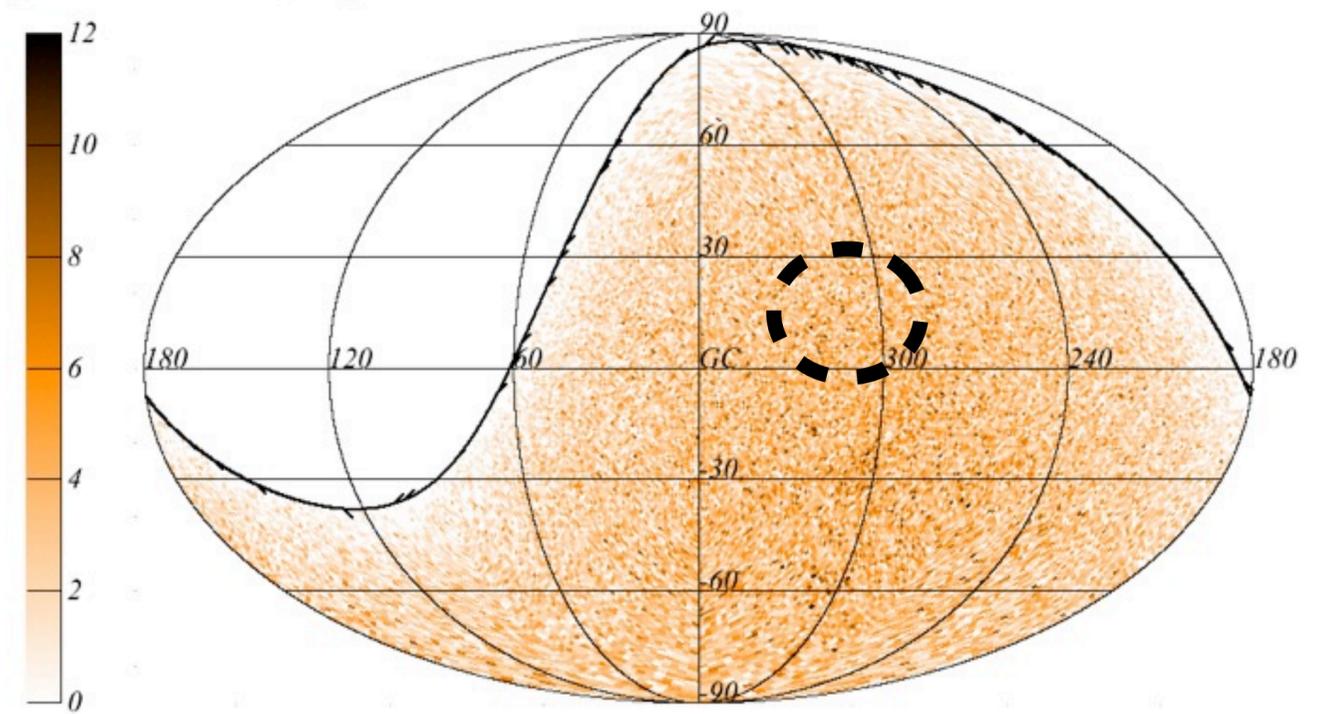
# Recherche des sources

83 109 événements entre 1 et 1.1 EeV

Coverage Map



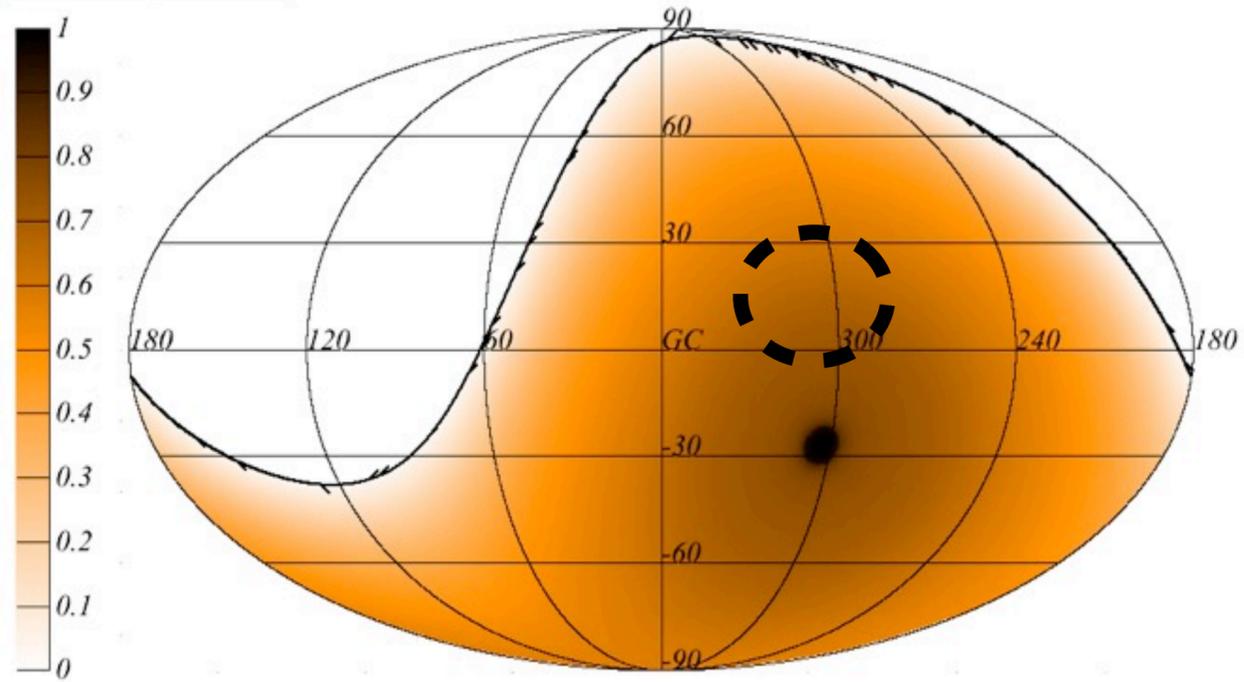
Raw events map



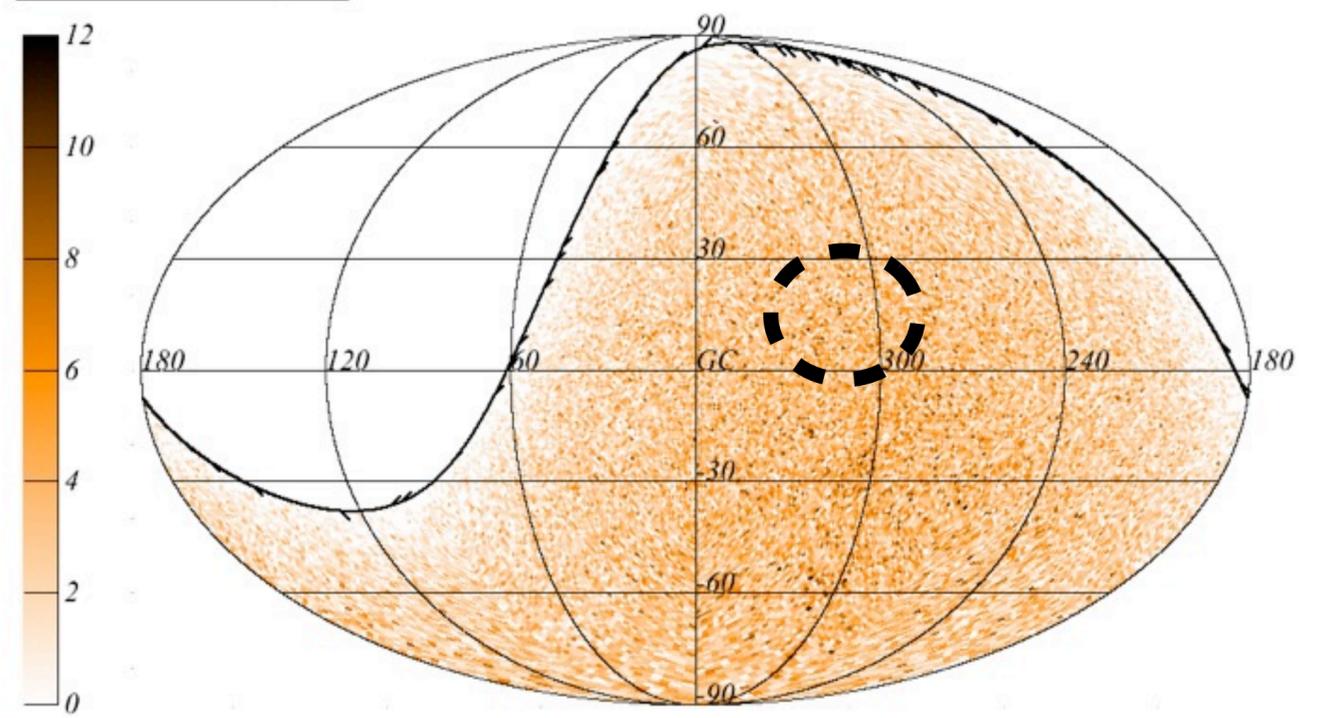
# Recherche des sources

83 109 événements entre 1 et 1.1 EeV

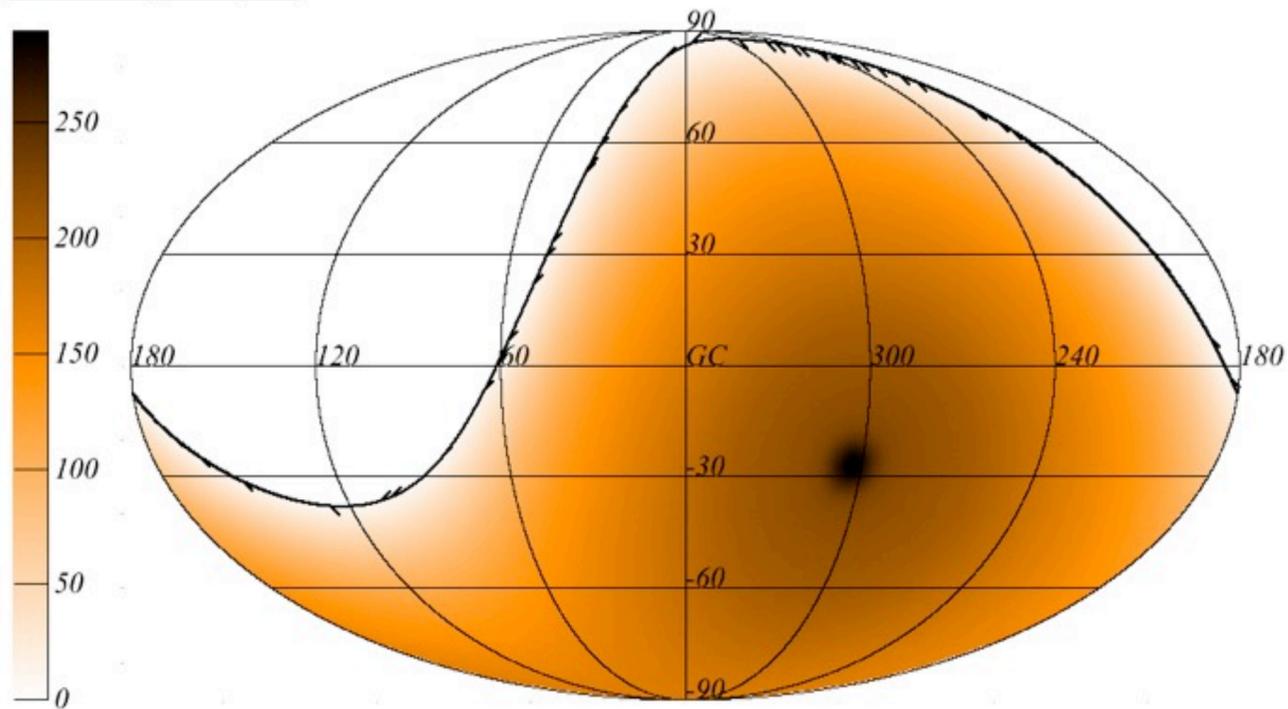
Coverage Map



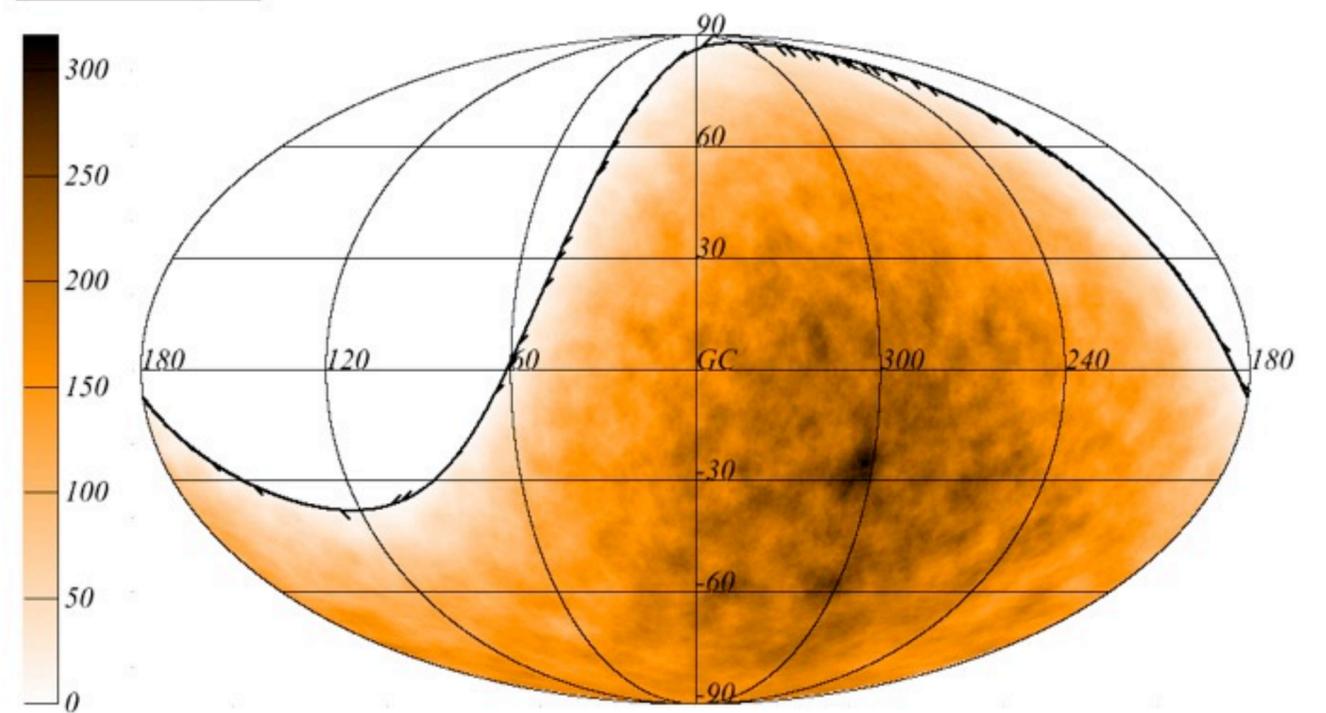
Raw events map



Coverage Map

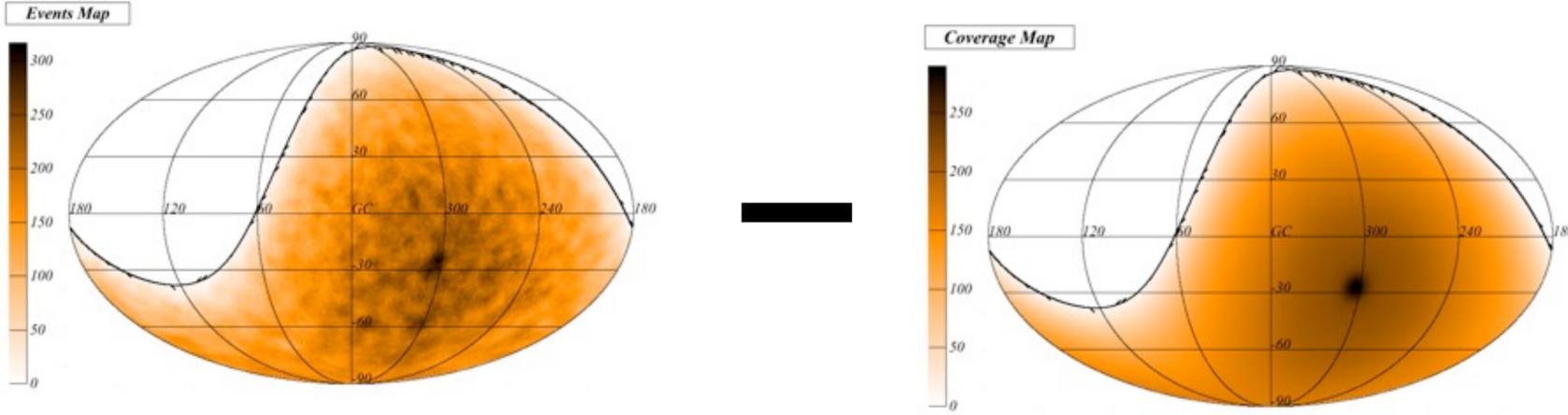


Events Map

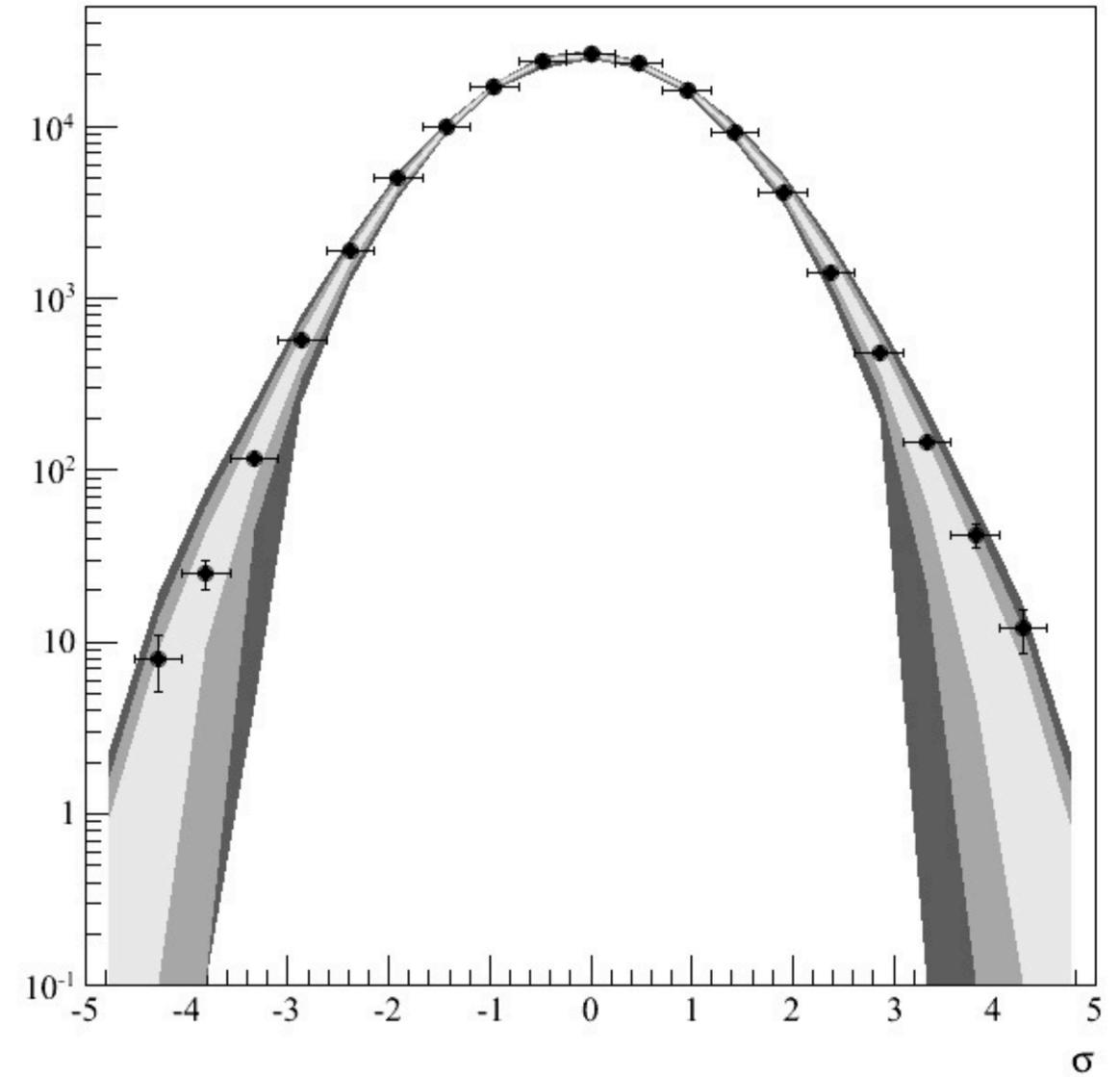


# Recherche des sources

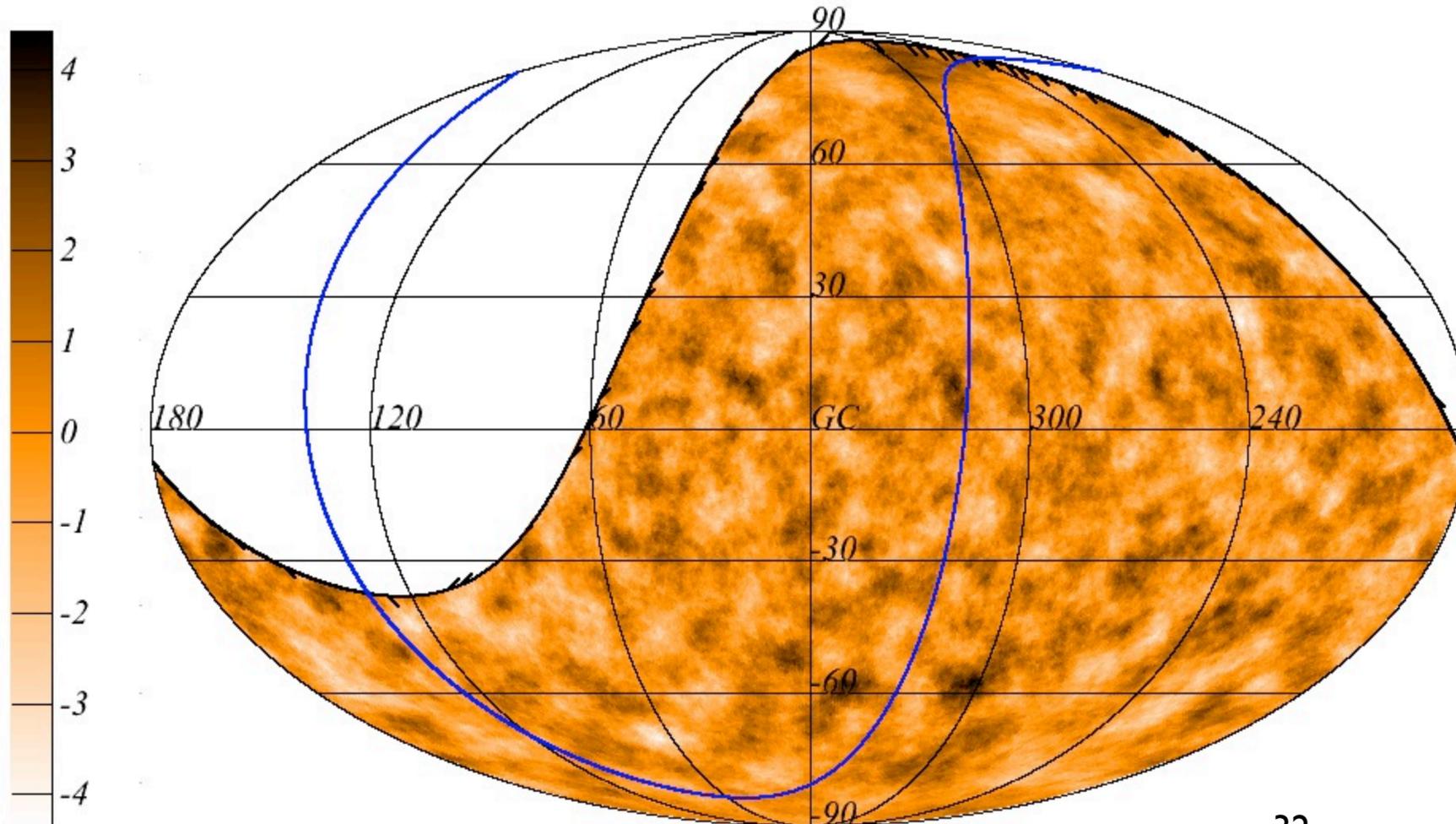
enfin, on calcule la carte des significances



*Li & Ma*

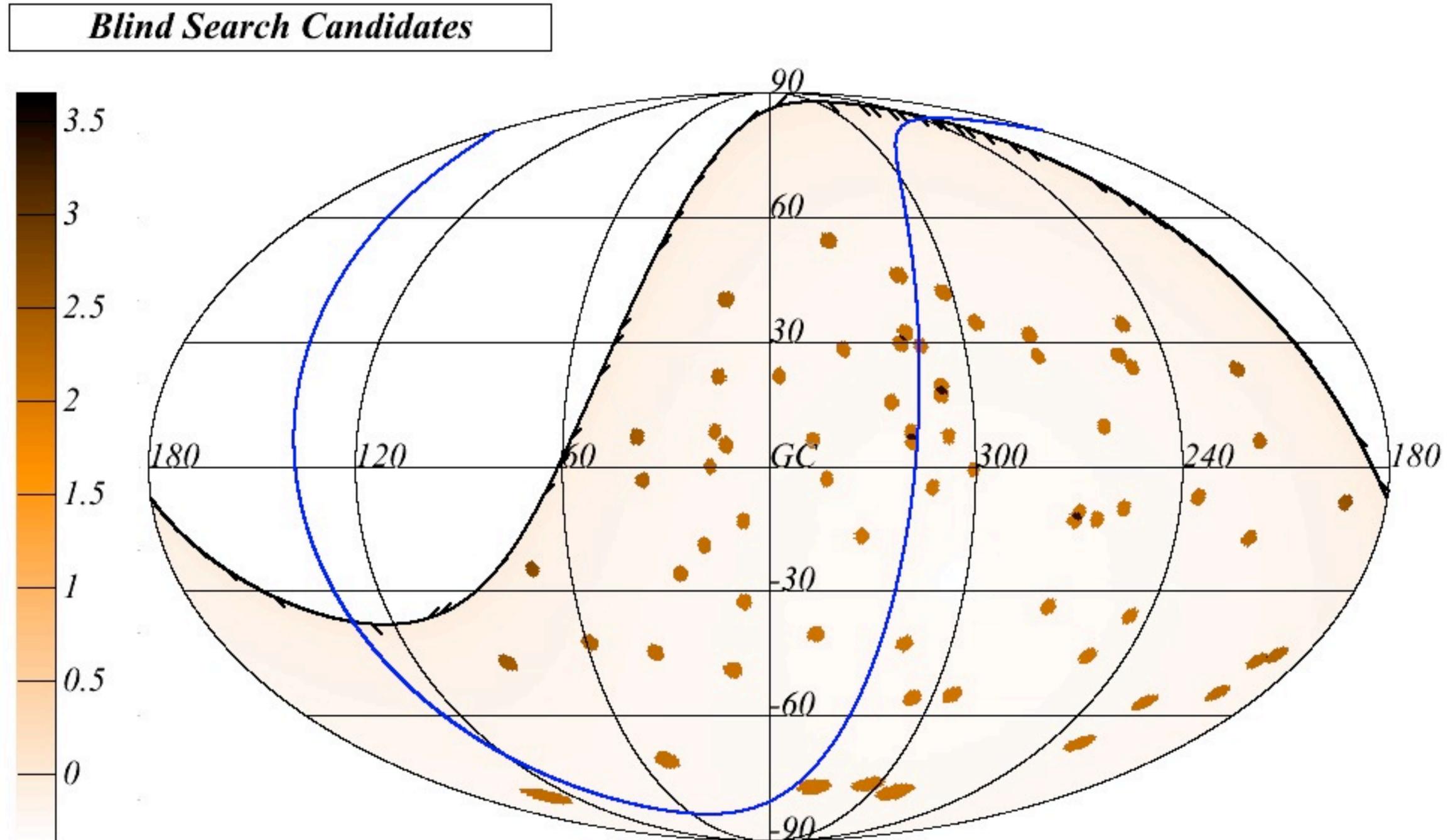


*Blind Search Candidates*



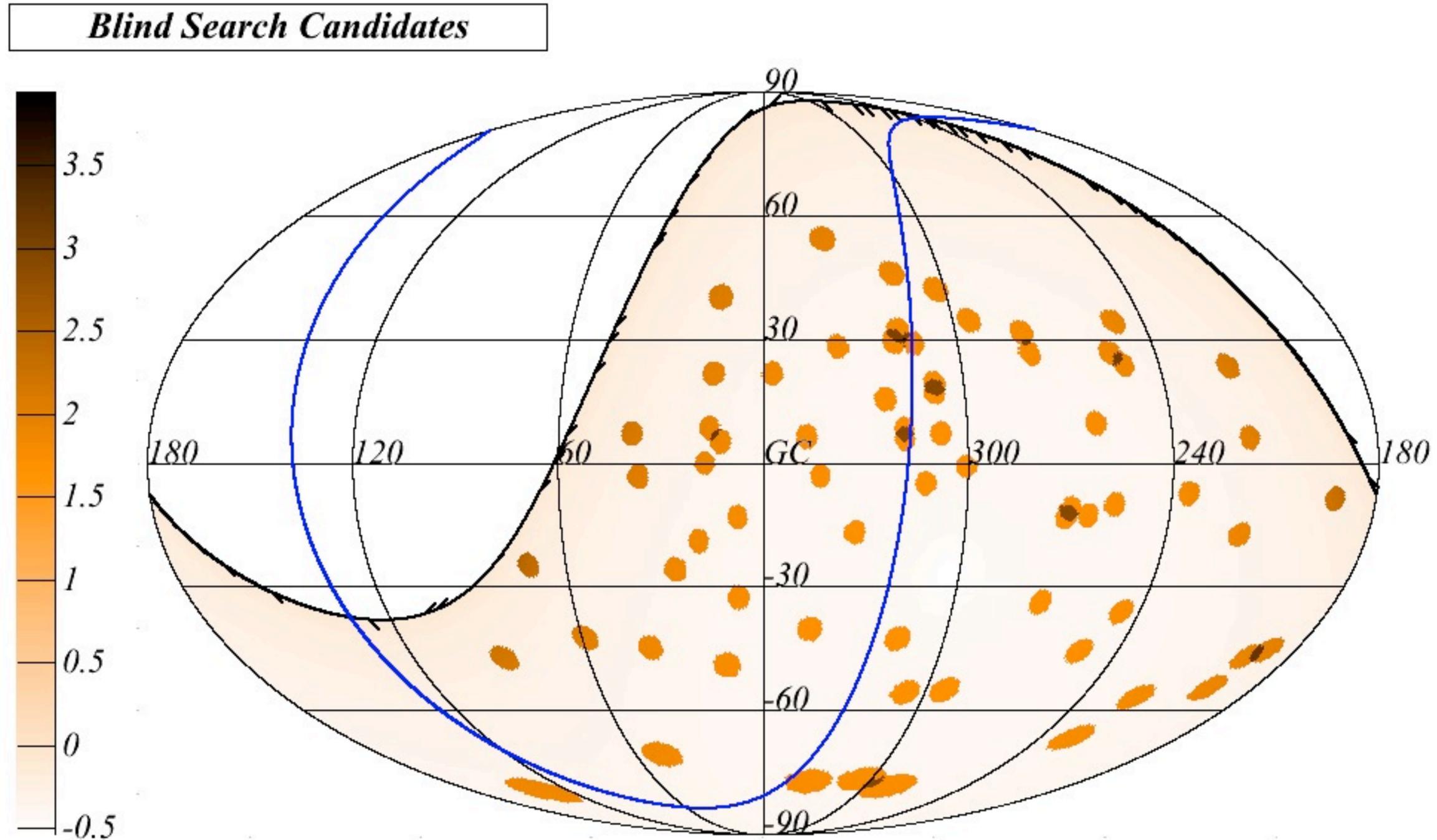
# Recherche des sources

exemple pour  $E \geq 55$  EeV



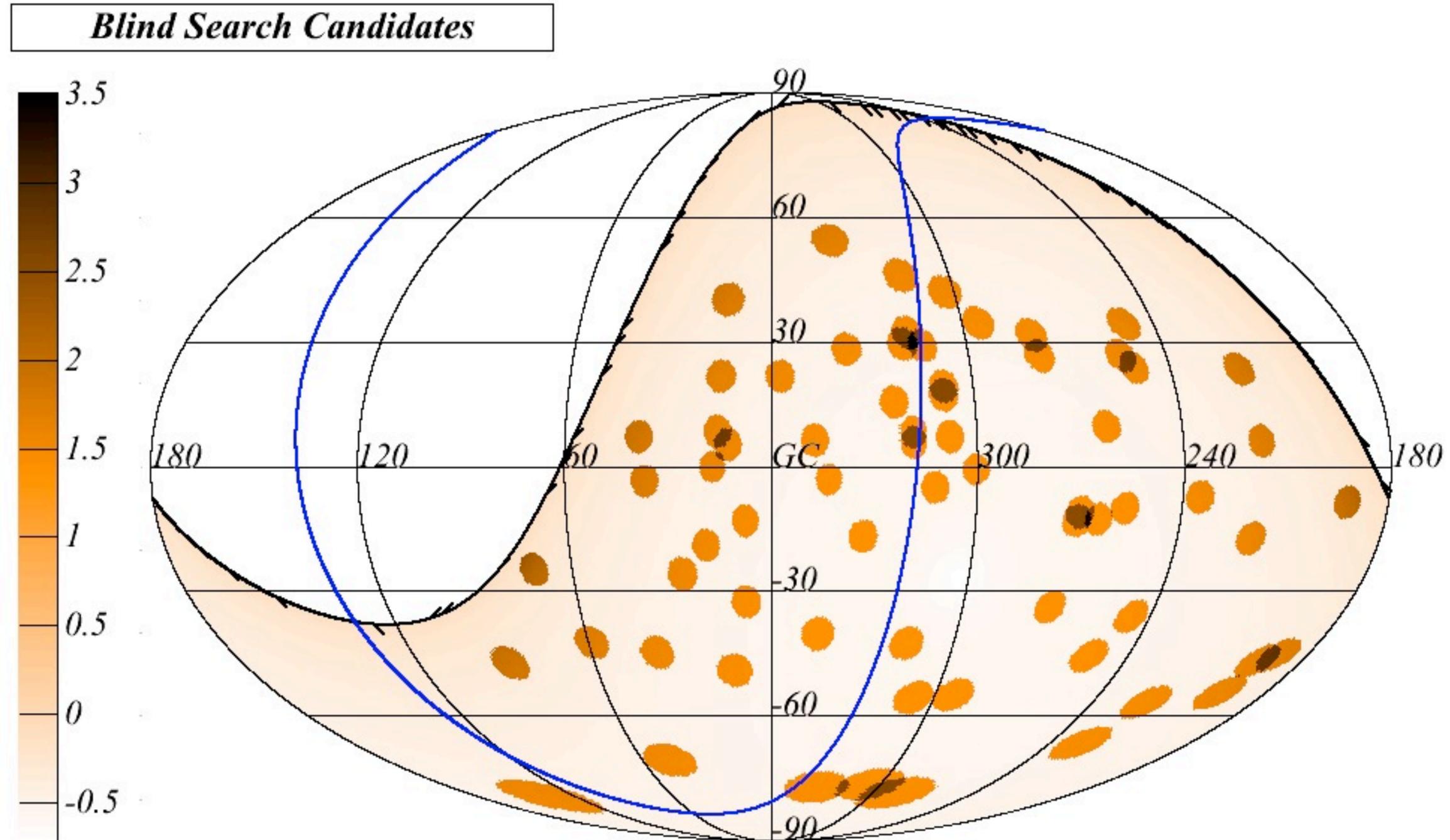
# Recherche des sources

exemple pour  $E \geq 55 \text{ EeV}$



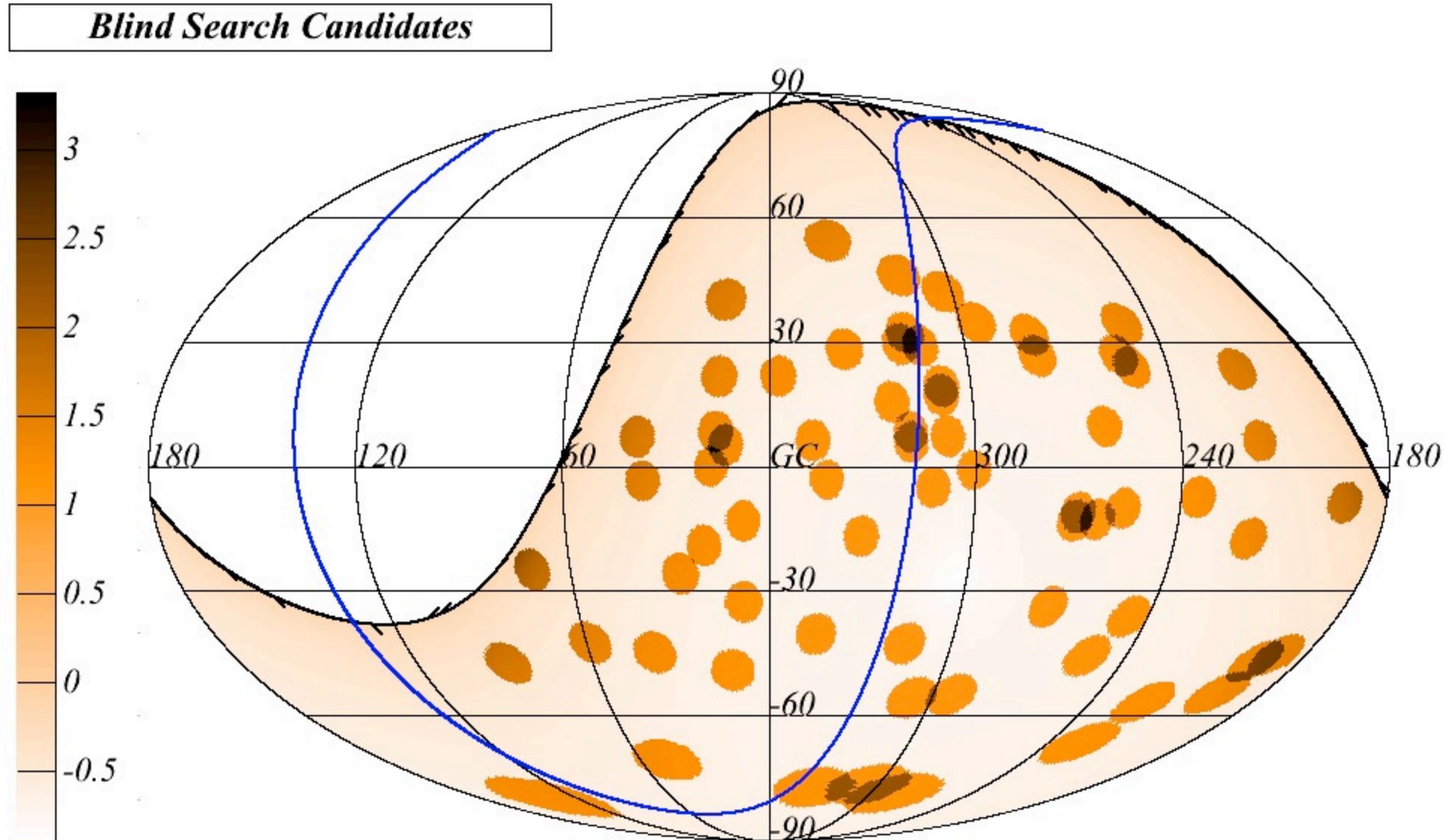
# Recherche des sources

exemple pour  $E \geq 55 \text{ EeV}$



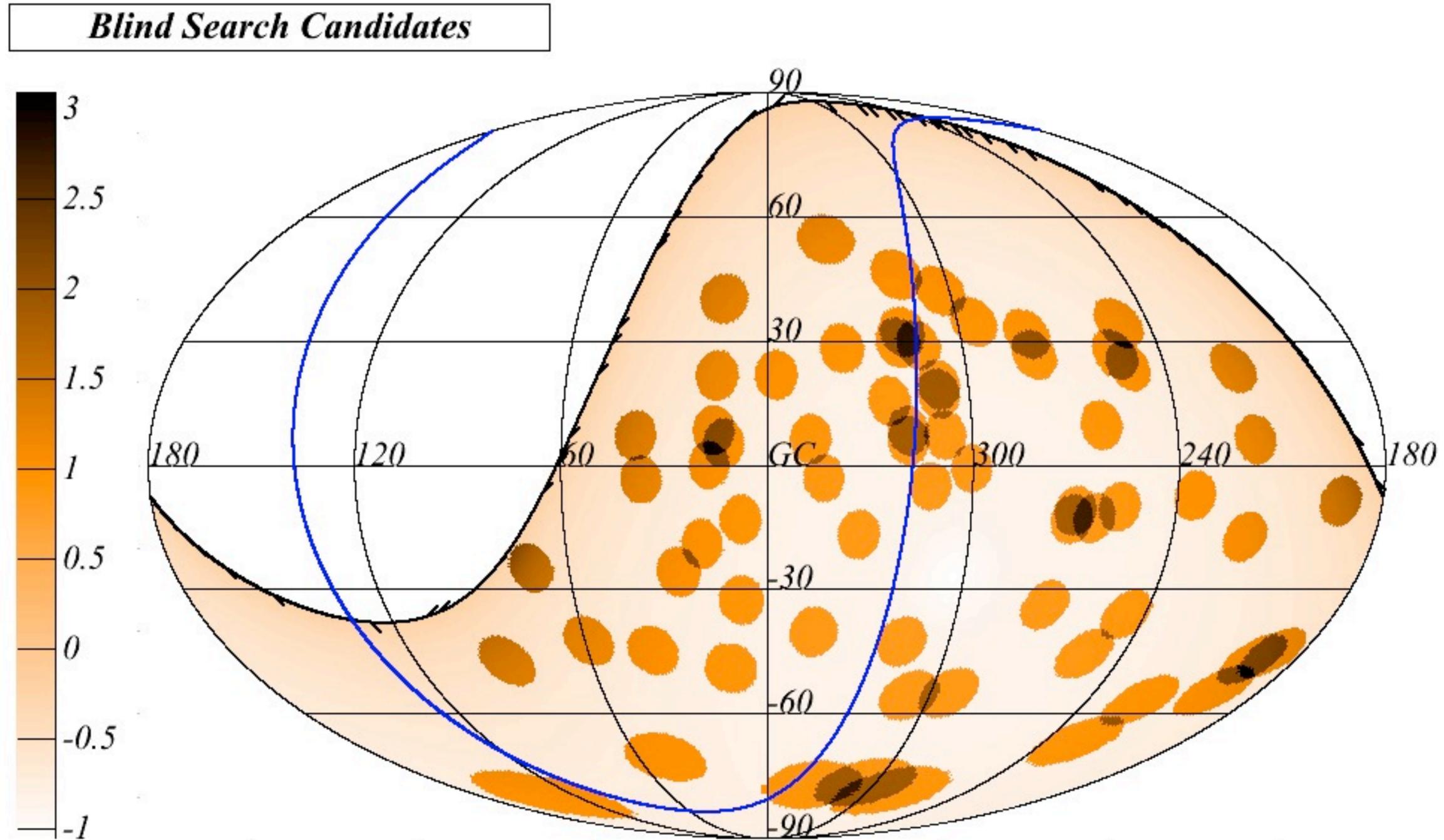
# Recherche des sources

exemple pour  $E \geq 55 \text{ EeV}$



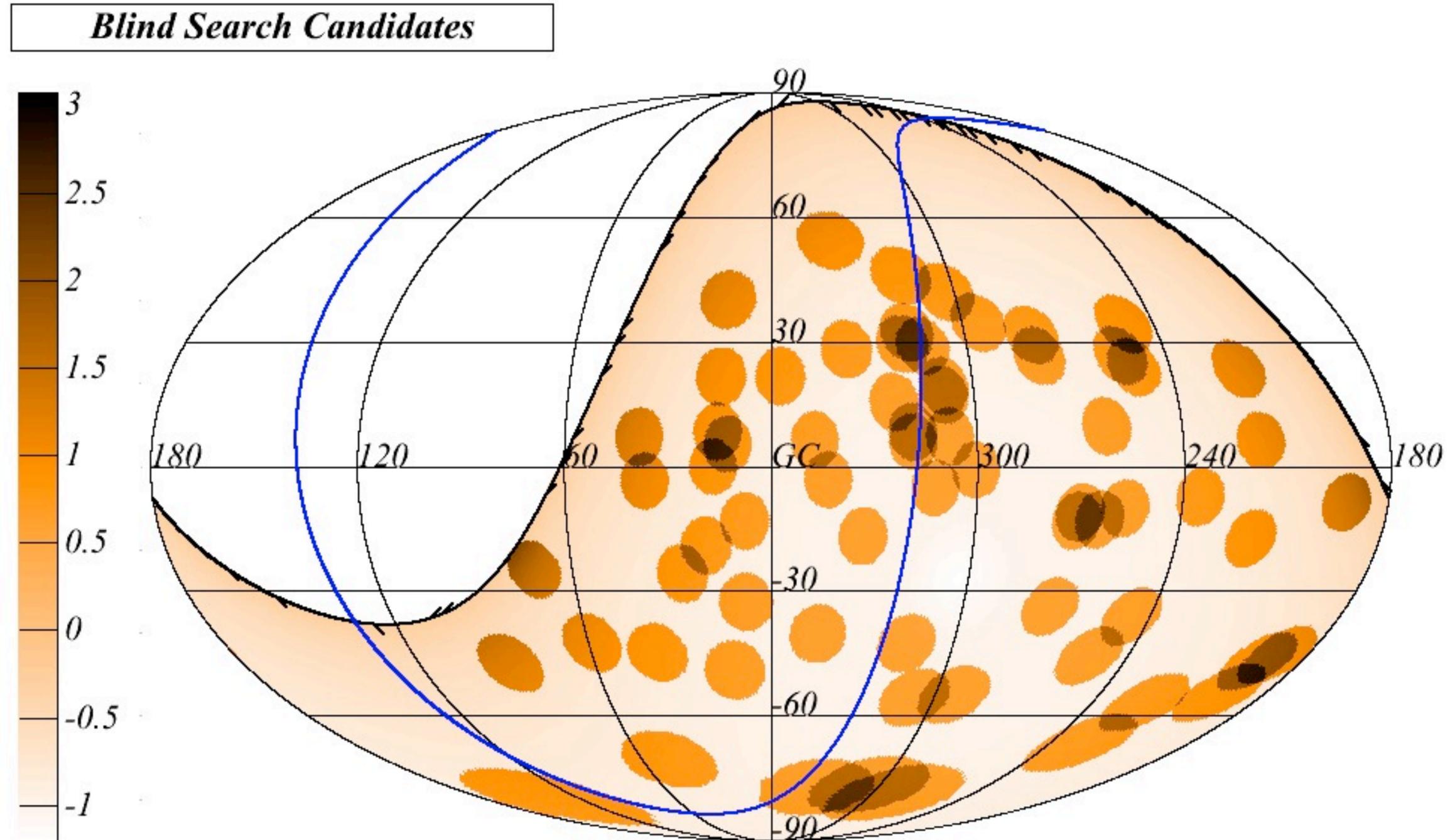
# Recherche des sources

exemple pour  $E \geq 55 \text{ EeV}$



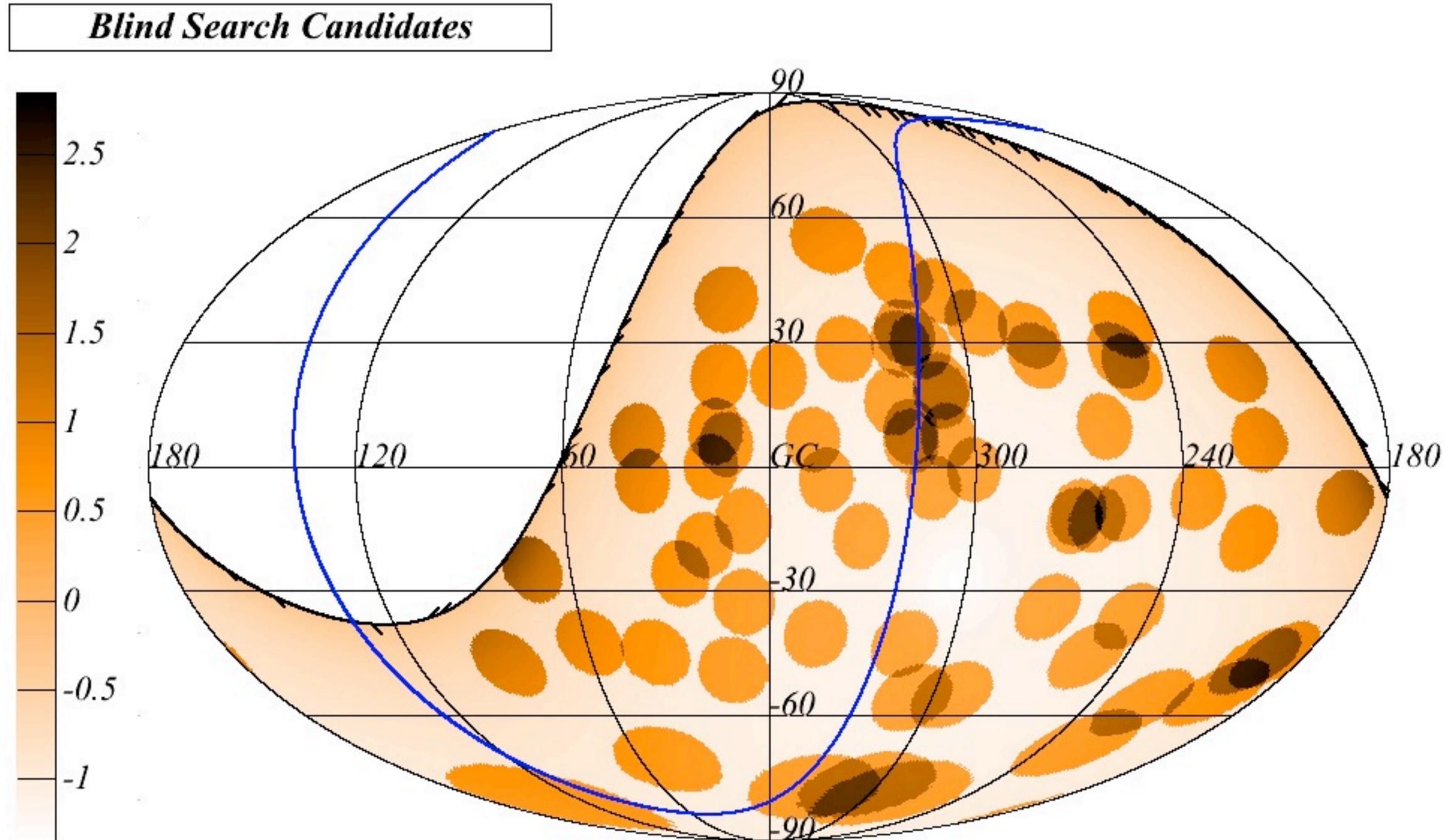
# Recherche des sources

exemple pour  $E \geq 55 \text{ EeV}$



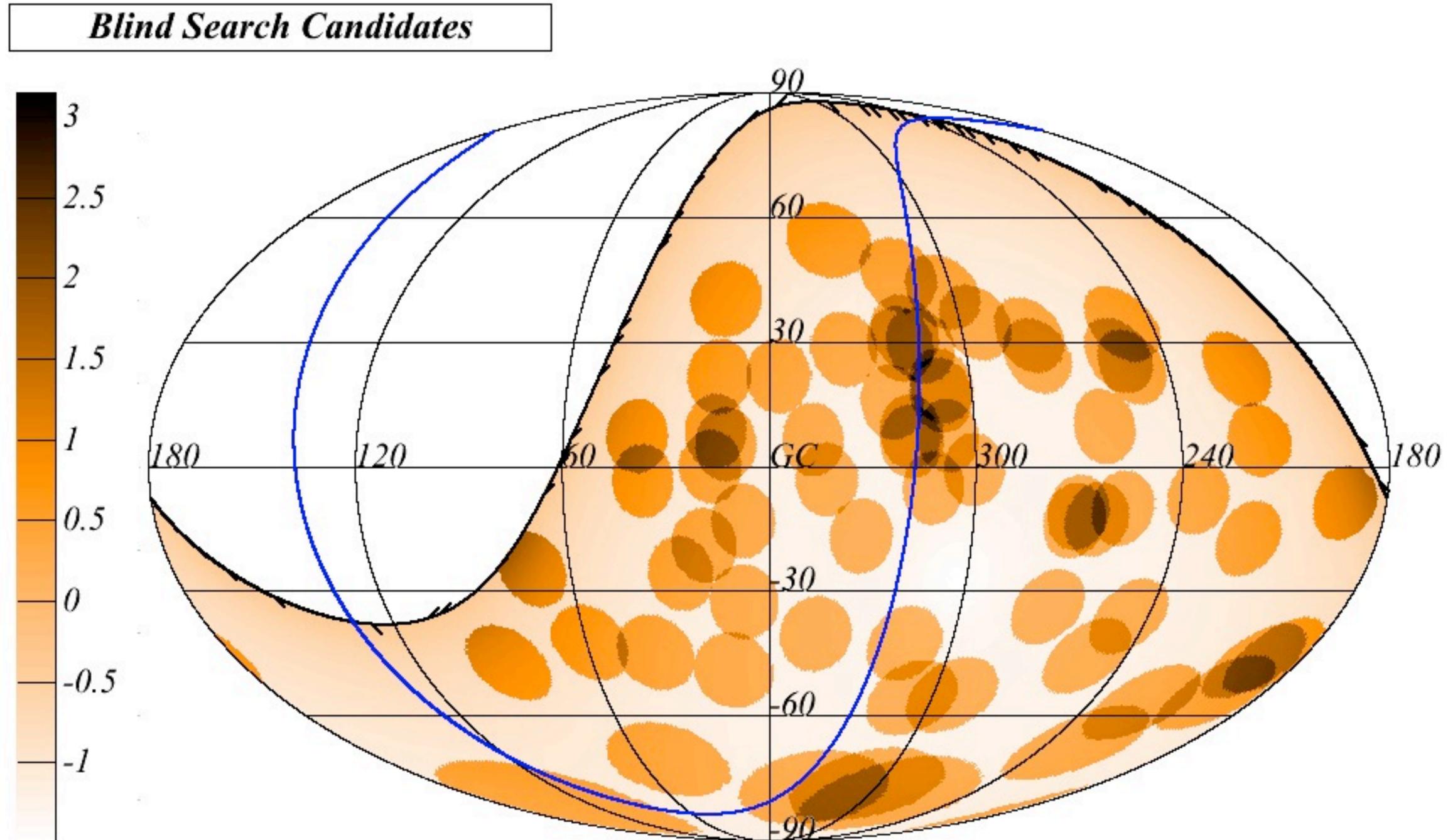
# Recherche des sources

exemple pour  $E \geq 55 \text{ EeV}$



# Recherche des sources

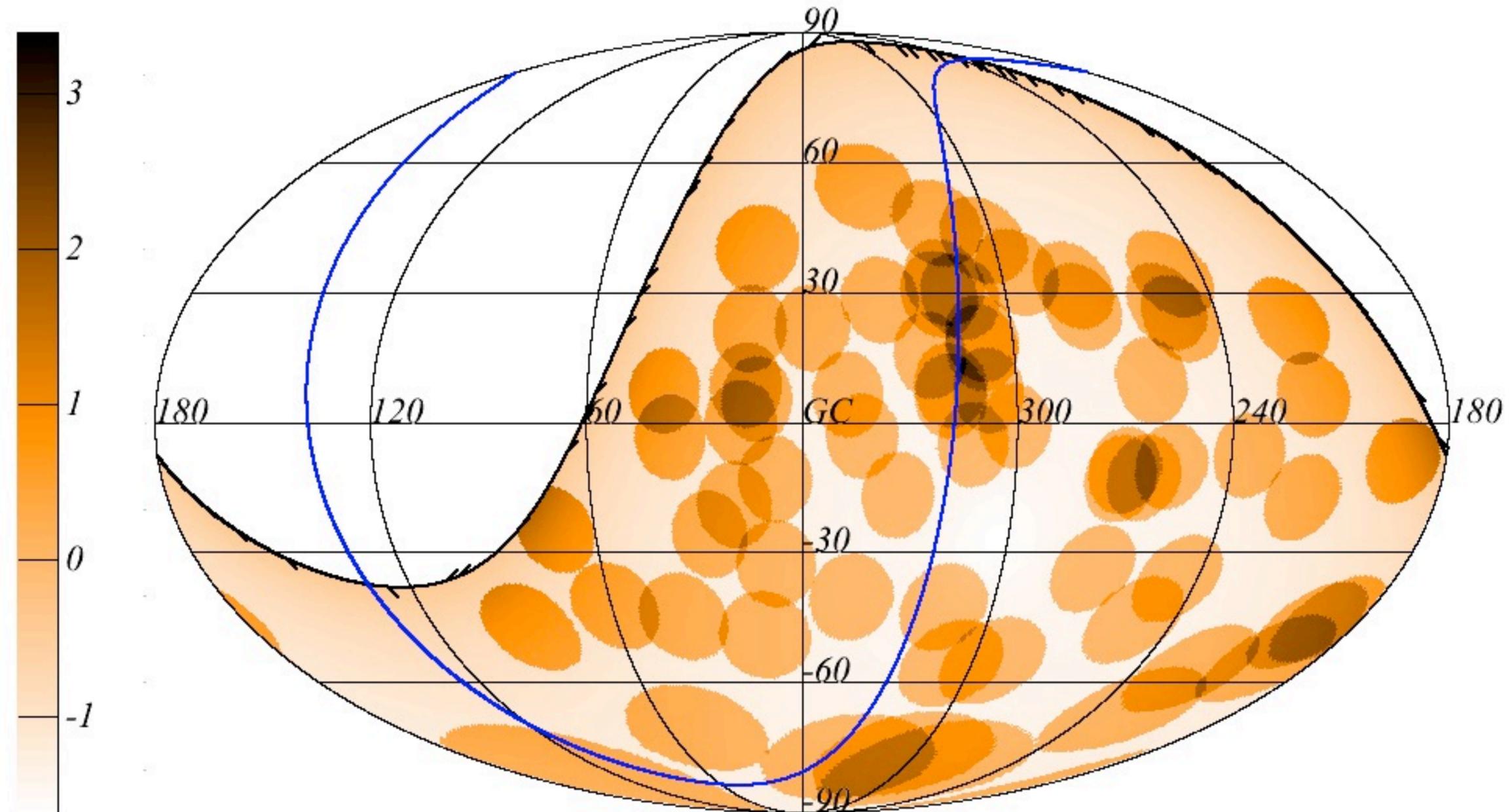
exemple pour  $E \geq 55 \text{ EeV}$



# Recherche des sources

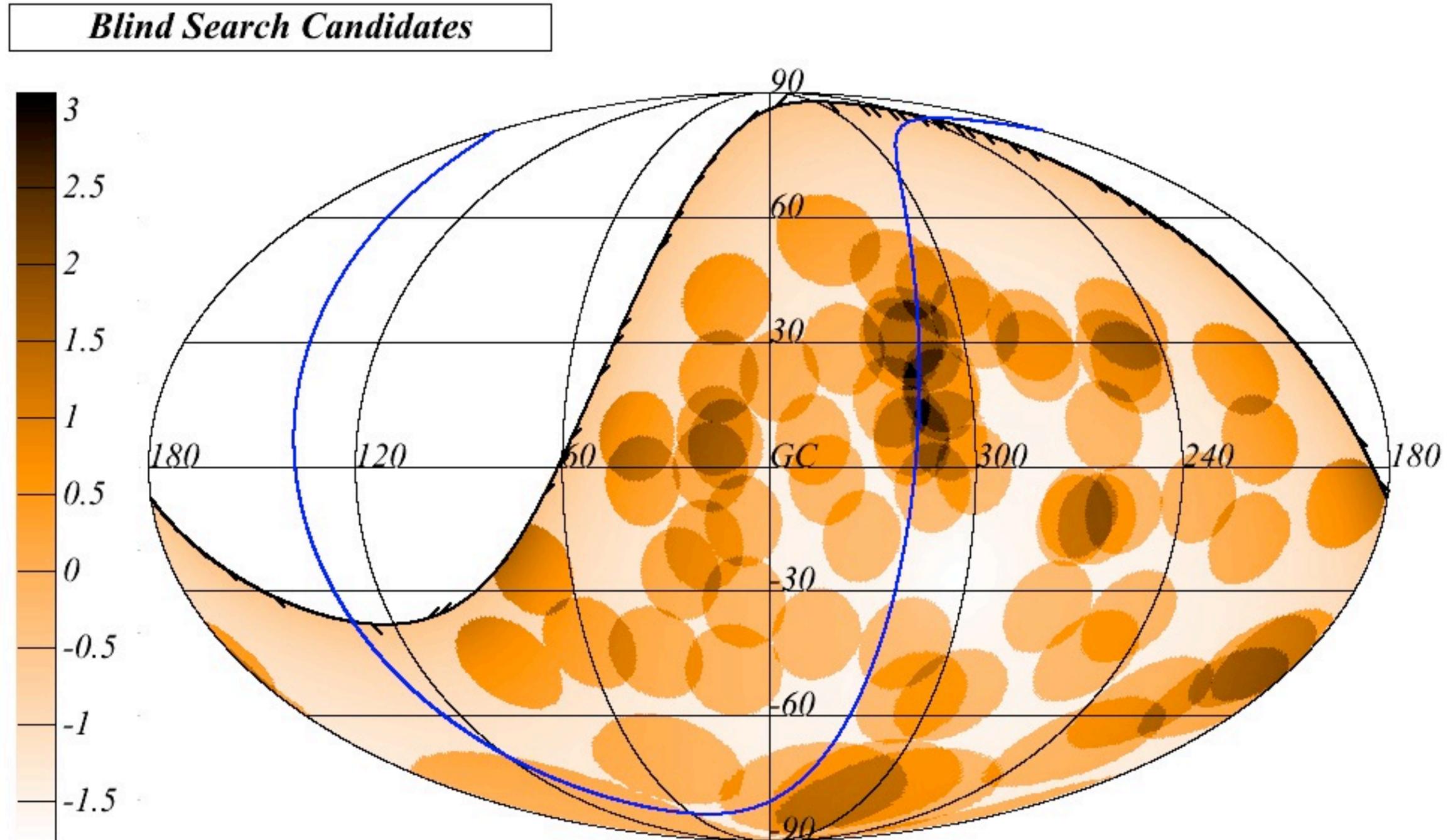
exemple pour  $E \geq 55 \text{ EeV}$

*Blind Search Candidates*



# Recherche des sources

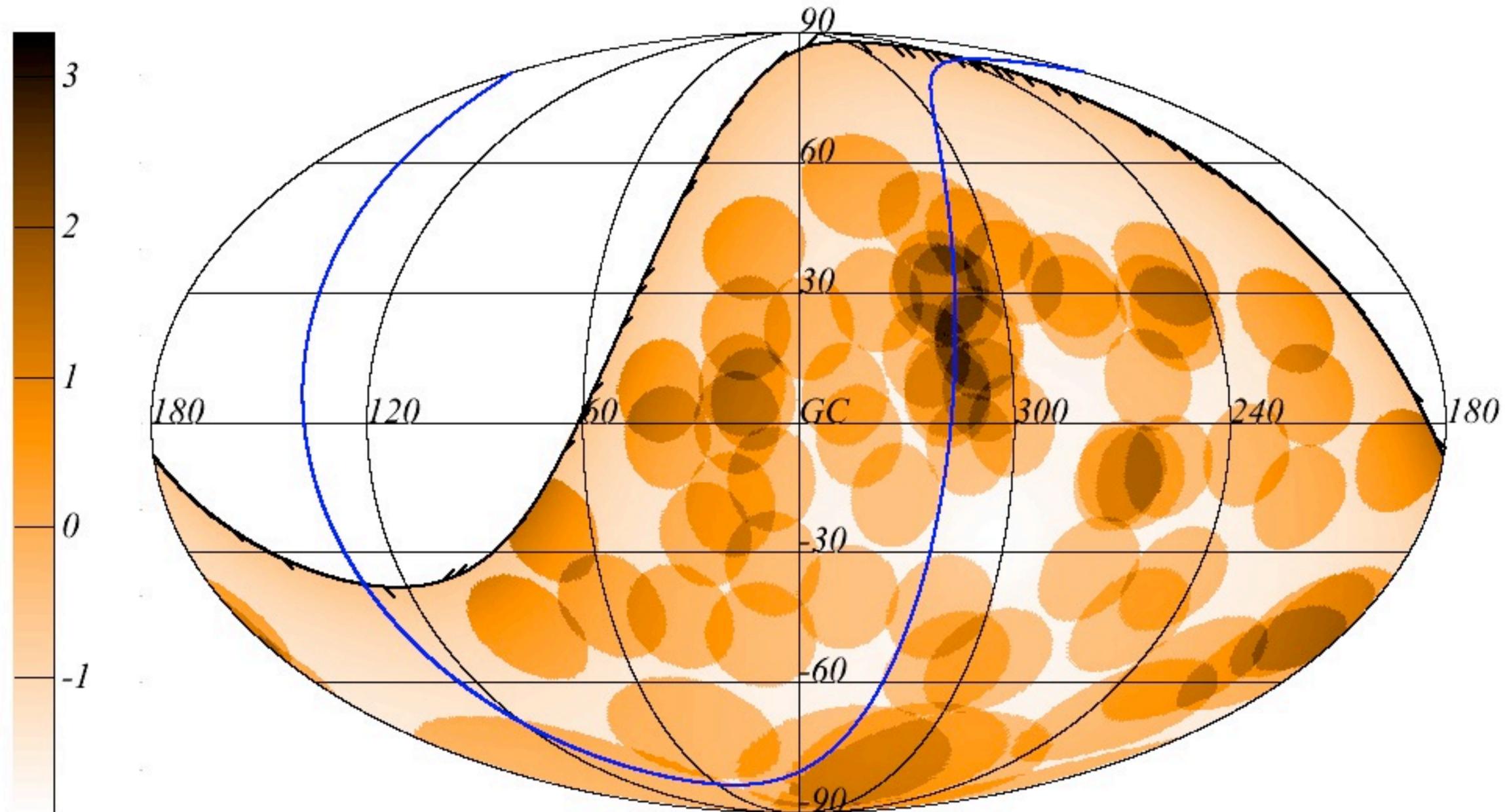
exemple pour  $E \geq 55 \text{ EeV}$



# Recherche des sources

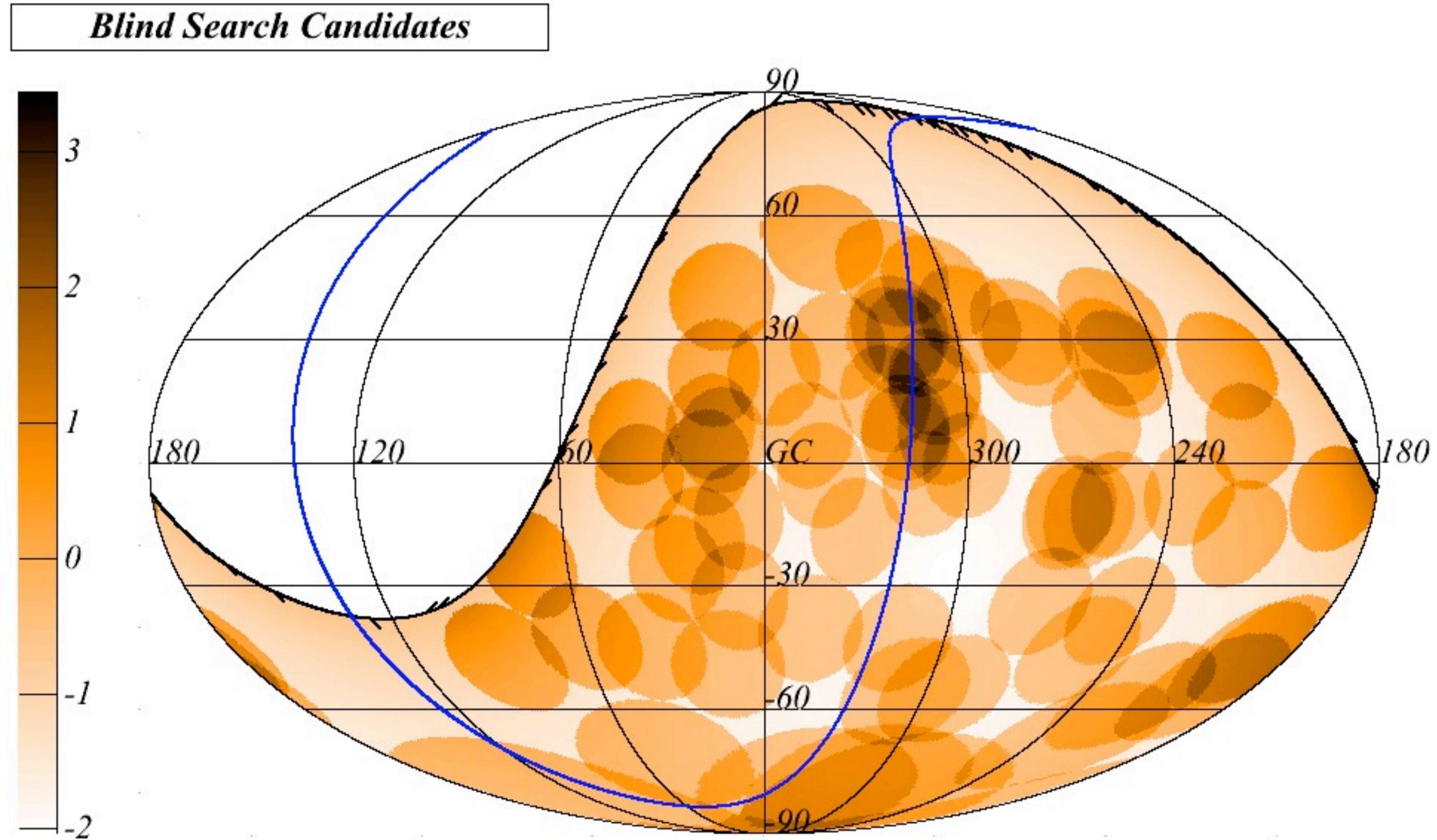
exemple pour  $E \geq 55 \text{ EeV}$

*Blind Search Candidates*



# Recherche des sources

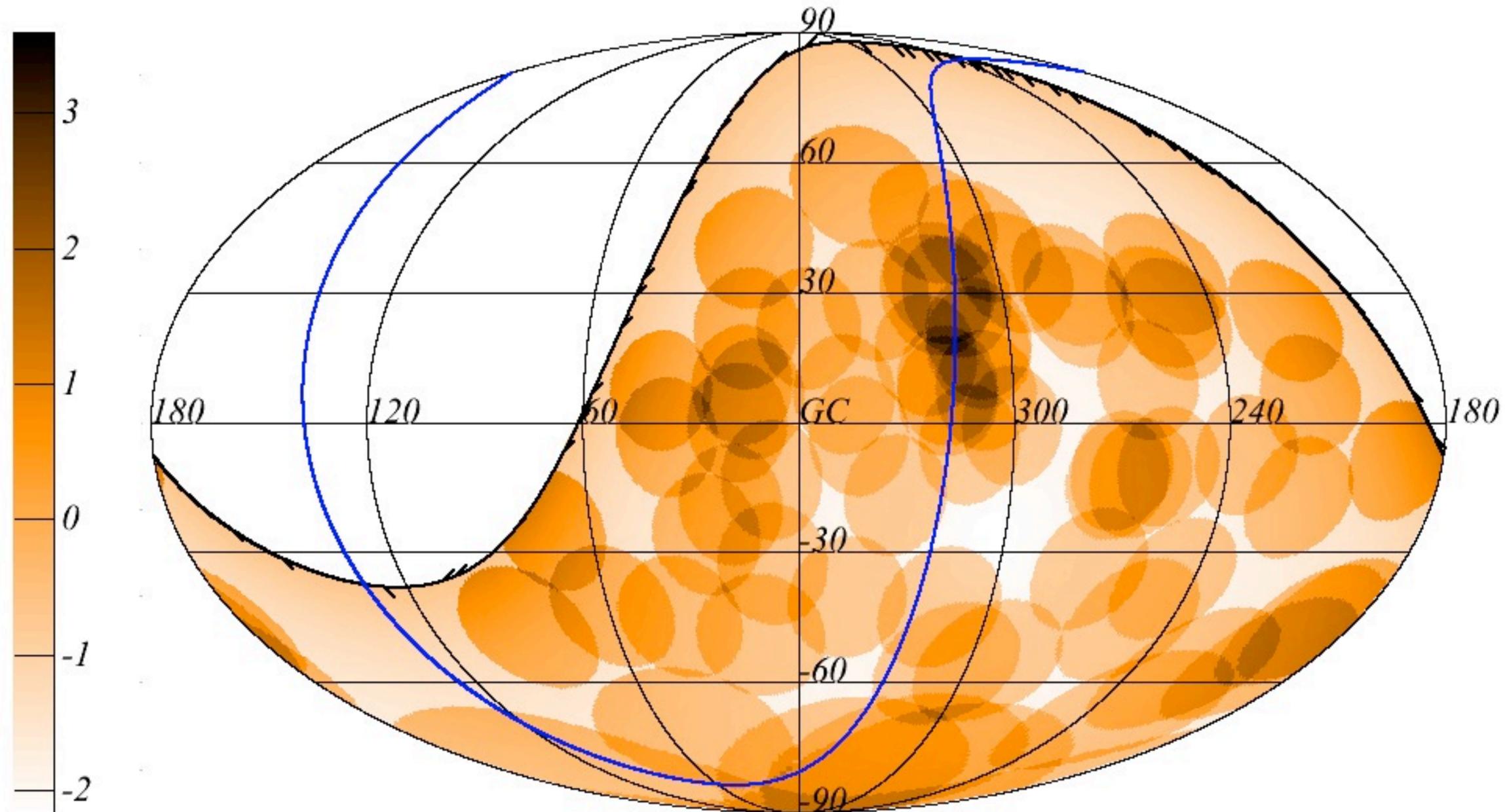
exemple pour  $E \geq 55 \text{ EeV}$



# Recherche des sources

exemple pour  $E \geq 55 \text{ EeV}$

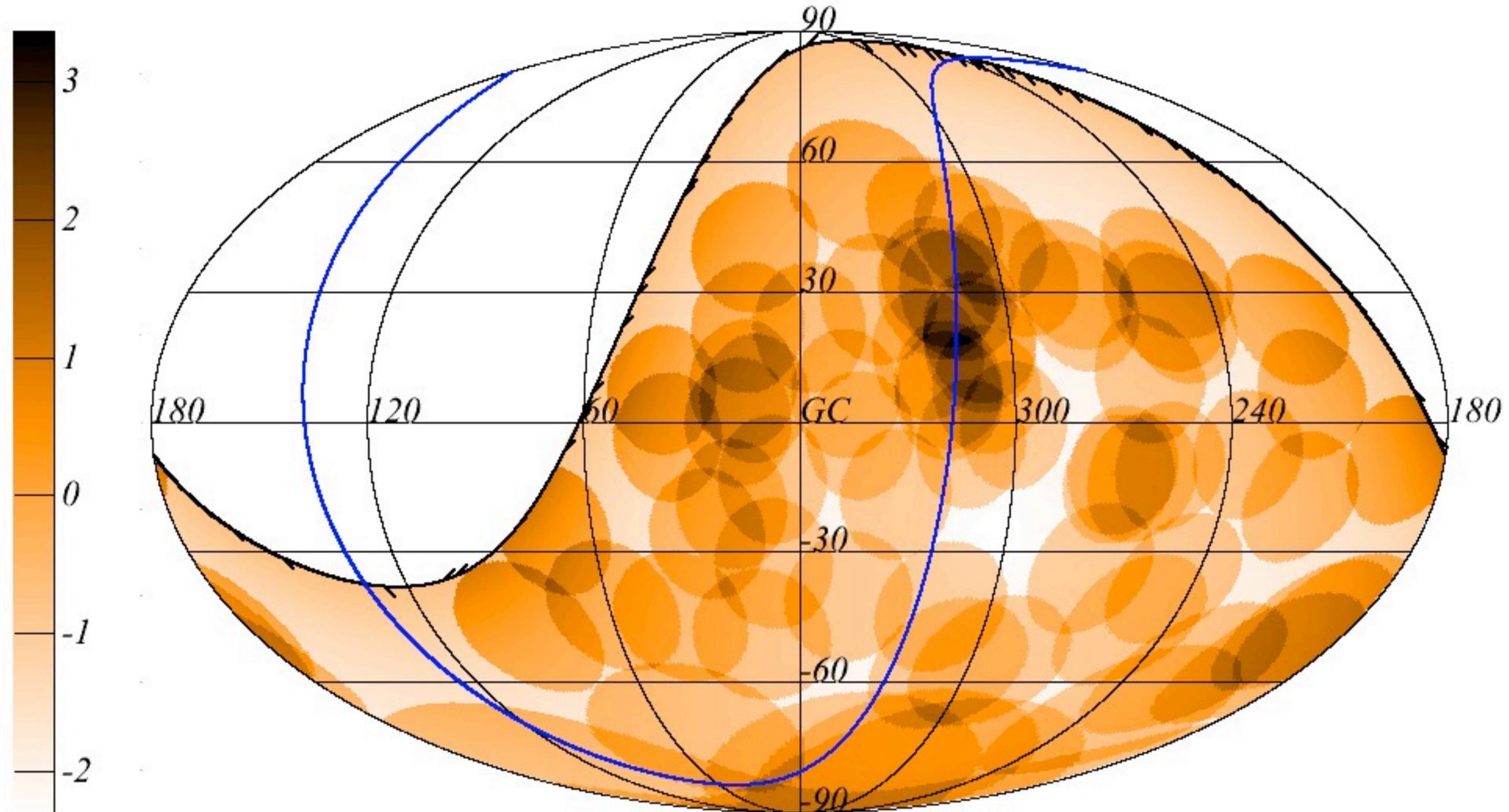
*Blind Search Candidates*



# Recherche des sources

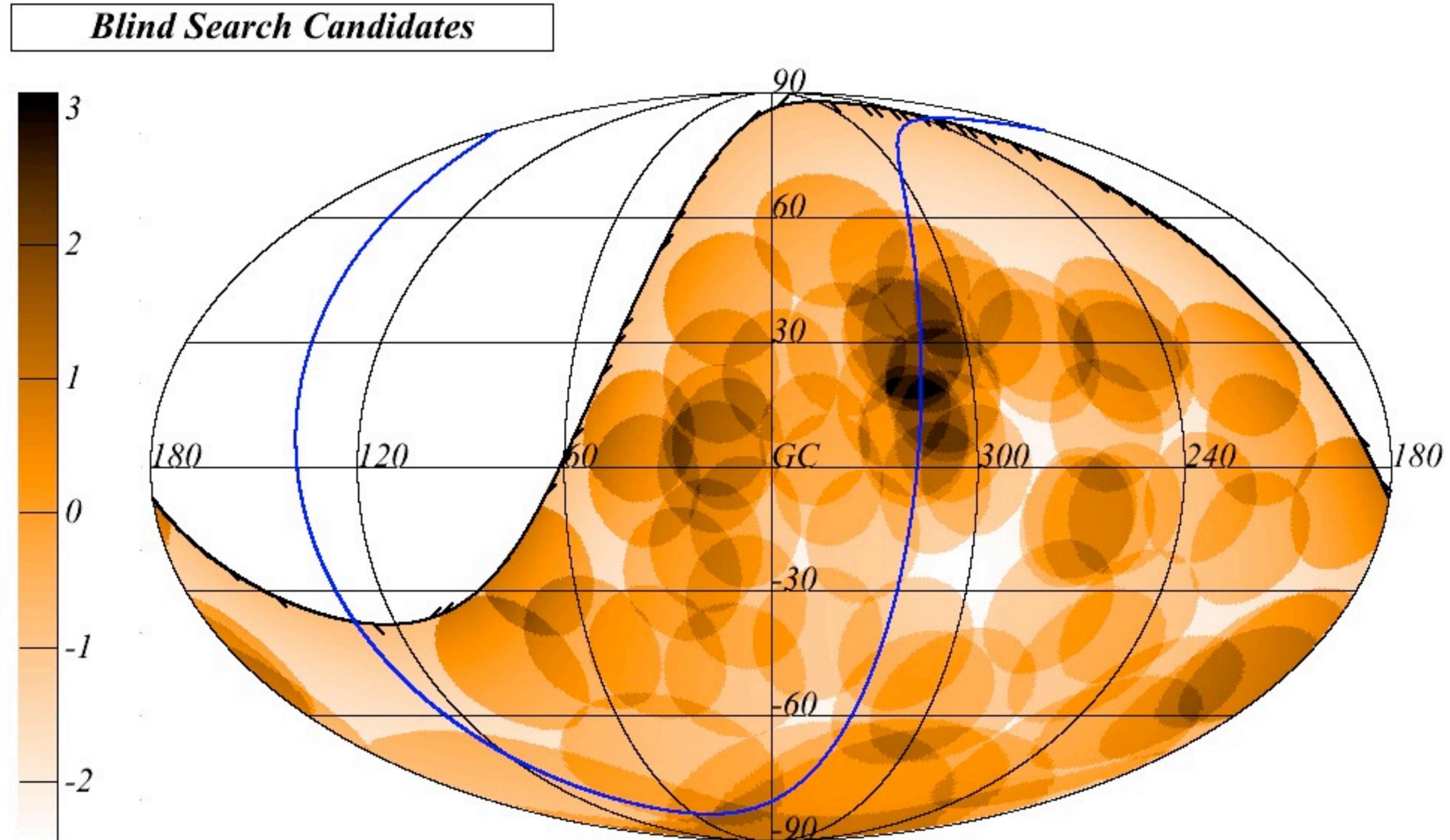
exemple pour  $E \geq 55 \text{ EeV}$

*Blind Search Candidates*



# Recherche des sources

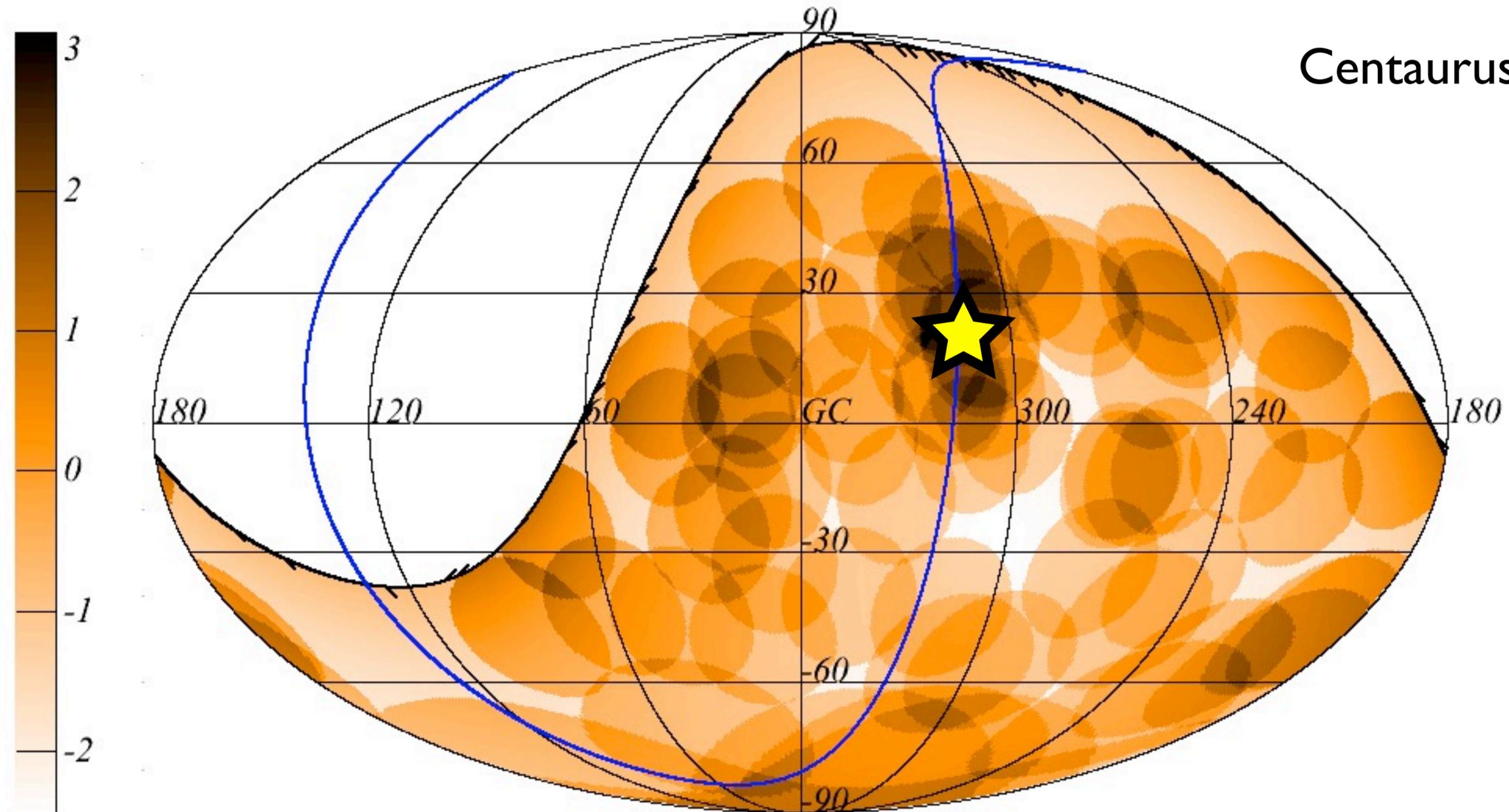
exemple pour  $E \geq 55 \text{ EeV}$



# Recherche des sources

exemple pour  $E \geq 55 \text{ EeV}$

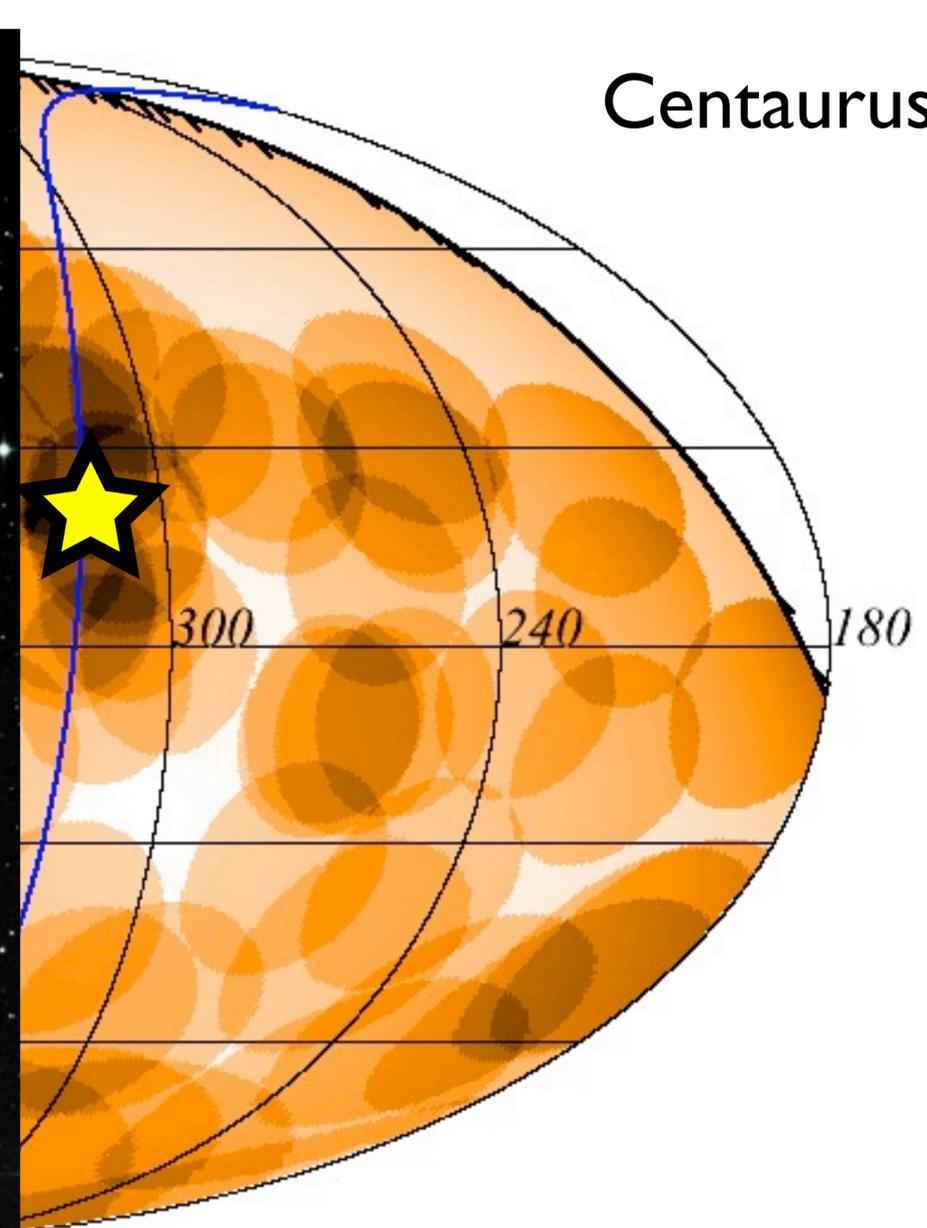
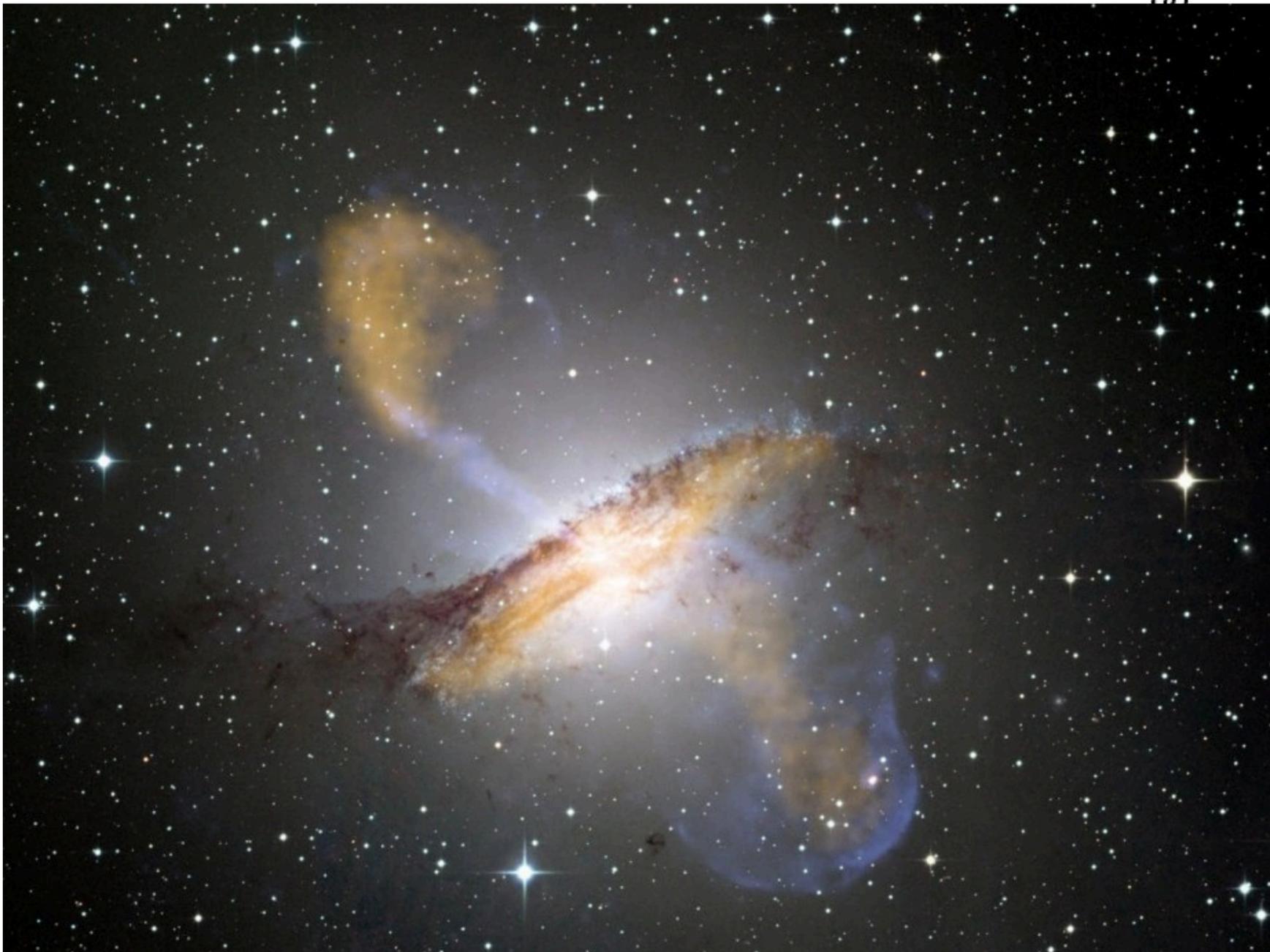
*Blind Search Candidates*



# Recherche des sources

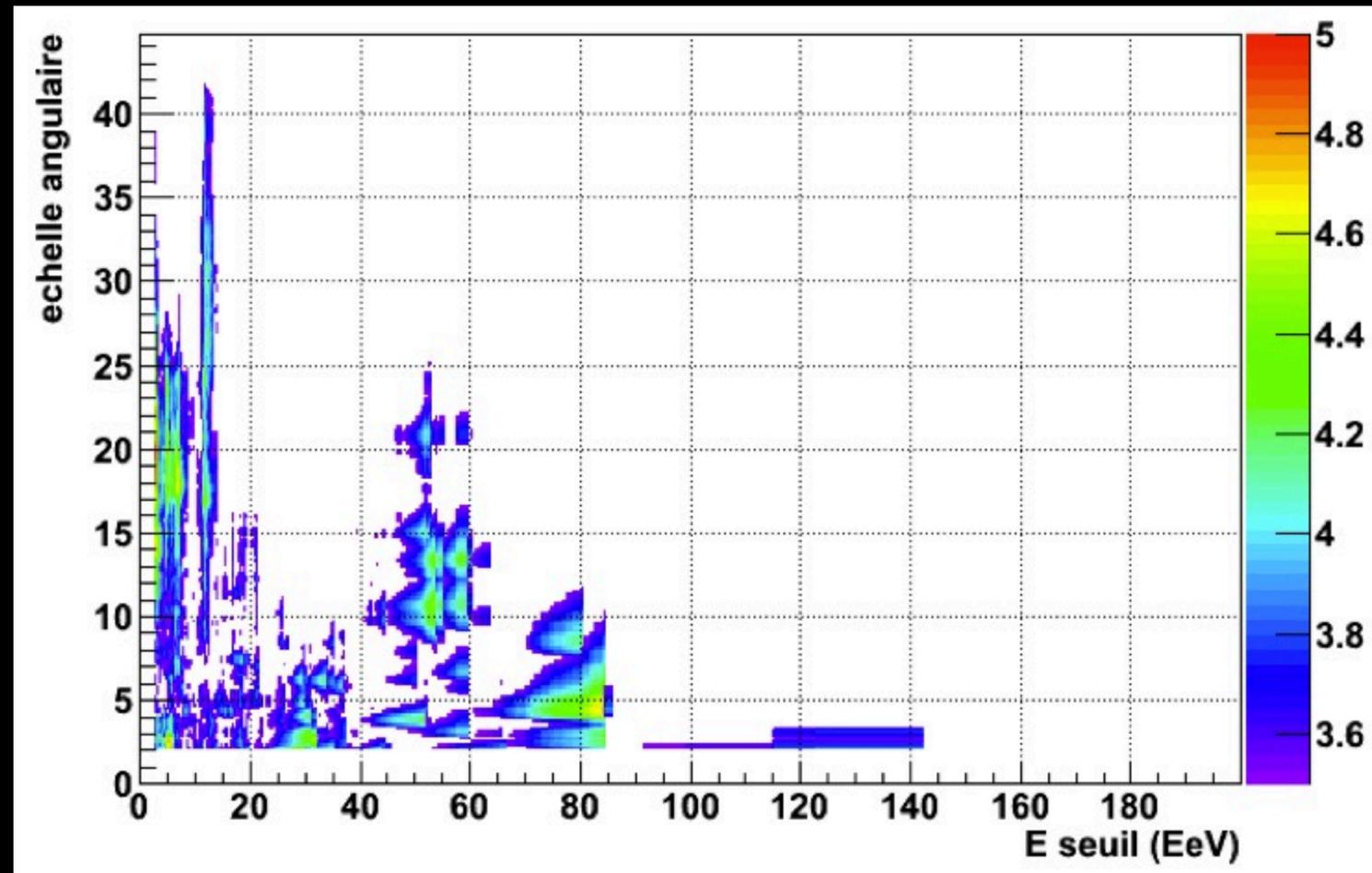
exemple pour  $E \geq 55 \text{ EeV}$

*Blind Search Candidates*



# Anisotropies

- faire un scan : on recherche dans des intervalles d'énergie bornés  $[E; l.1 \times E]$  ou avec un seuil,  $E \geq E_{\min}$



- aucune source évidente pour le moment
- article en cours de rédaction, avec D. Harari (Arg), R. Bonino (Ita), draft fin 2012

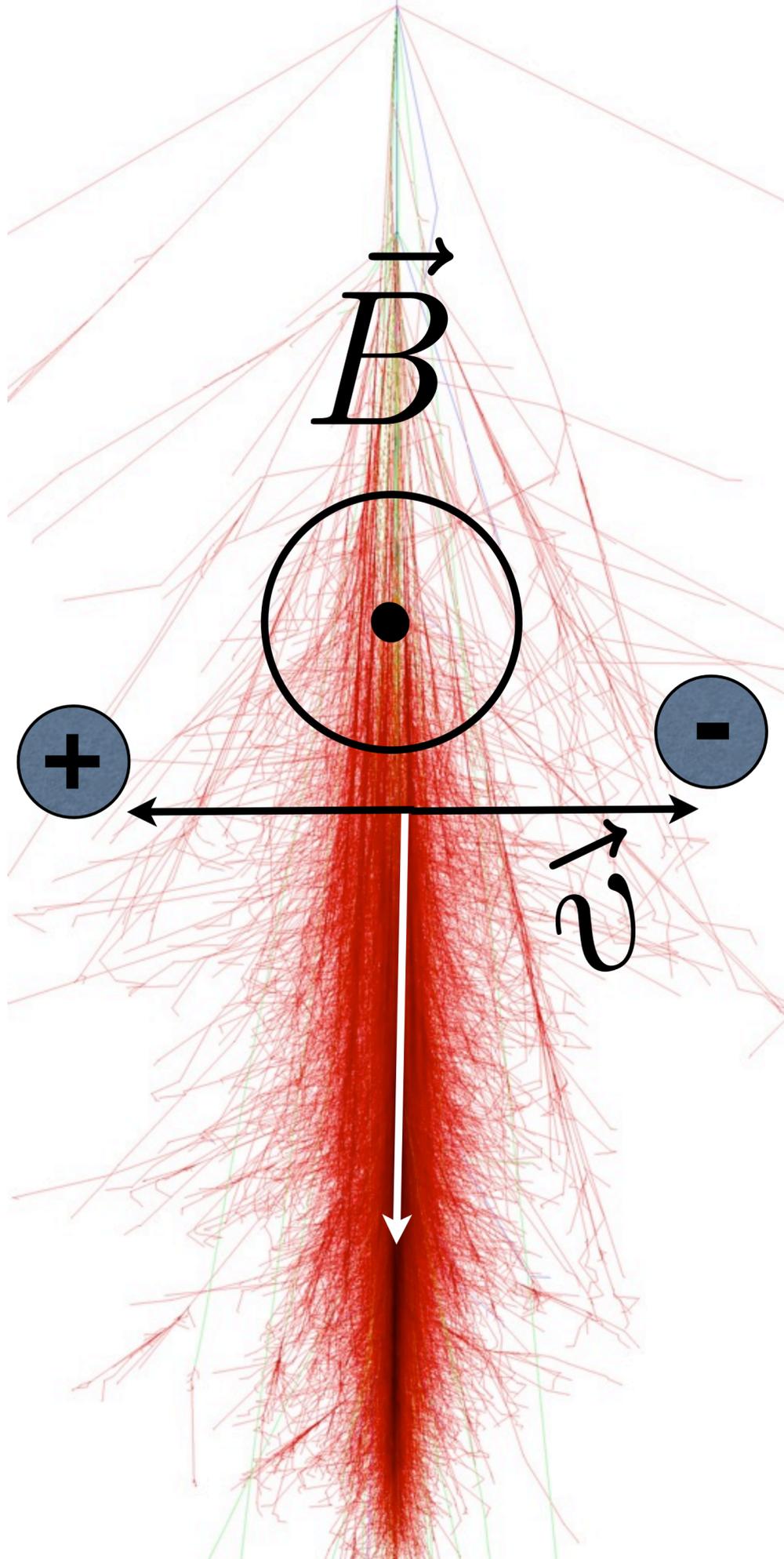
**R&D et Analyse radio**



# Champ électrique

différentes sources :

- rayonnement Cerenkov de l'excès d'électrons (l'excès est de 10-20 %), effet Askaryan (1962)
- émission par le courant macroscopique  $\mathbf{j}$ , code MGMR (Scholten, Werner)
- rayonnement dans  $\mathbf{B}$  des  $e^-/e^+$ , approche microscopique, codes REAS3 (Huege, Falcke), SELFAS (Marin, Revenu), ZHAires (Alvarez-Muniz et al)...
- polarisation de la gerbe (dipôle)



# Champ électrique (exemple de SELFAS)

(thèse de Vincent Marin 2008-2011) pour l'ensemble des e<sup>-</sup>/e<sup>+</sup> :

$$\mathbf{E}_{tot}(\mathbf{x}, t) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left\{ \sum_{i=1} \left[ \frac{\mathbf{n}_i q_i(t_{ret})}{R_i^2 (1 - \boldsymbol{\beta}_i \cdot \mathbf{n}_i)} \right]_{ret} + \frac{1}{c} \frac{\partial}{\partial t} \sum_{i=1} \left[ \frac{\mathbf{n}_i q_i(t_{ret})}{R_i (1 - \boldsymbol{\beta}_i \cdot \mathbf{n}_i)} \right]_{ret} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial}{\partial t} \sum_{i=1} \left[ \frac{\mathbf{v}_i q_i(t_{ret})}{R_i (1 - \boldsymbol{\beta}_i \cdot \mathbf{n}_i)} \right]_{ret} \right\}$$

## Champ statique

somme de toutes les contributions statiques individuelles

## Variation de charge macroscopique

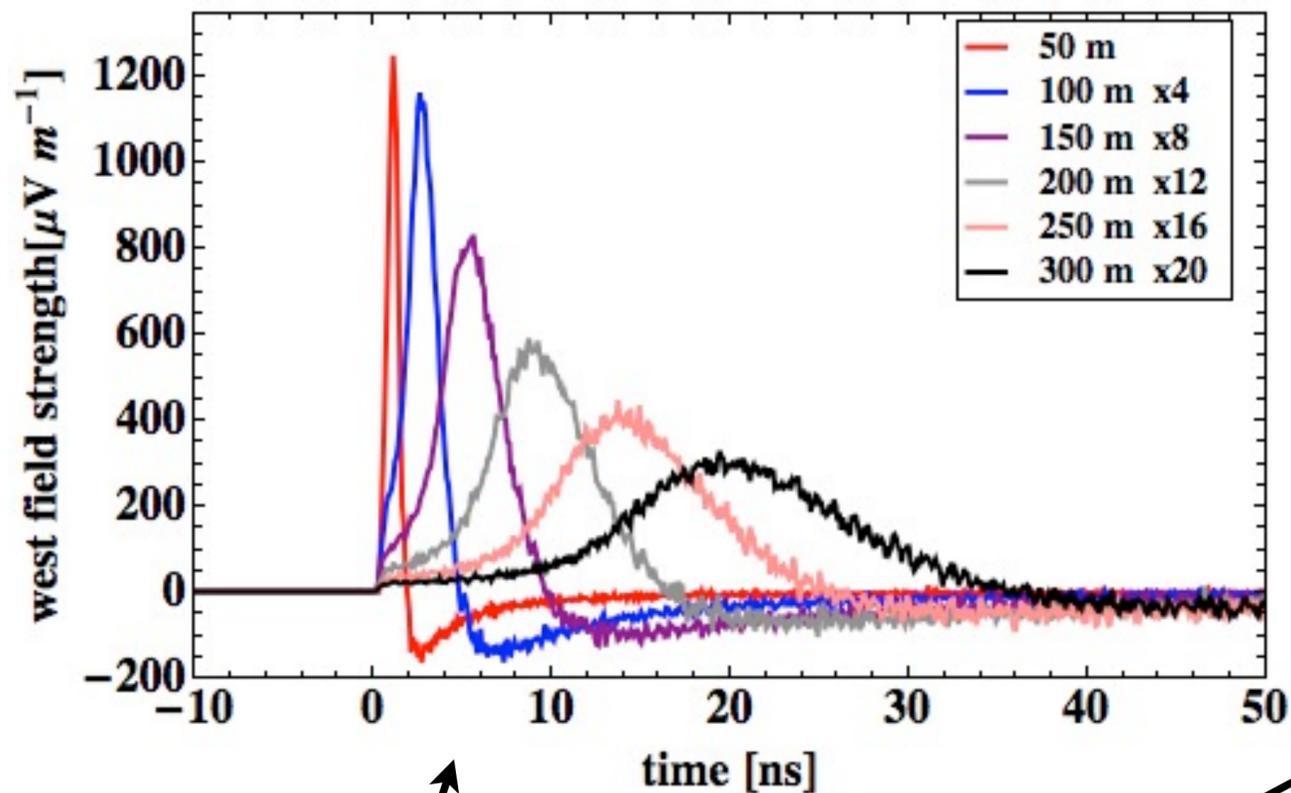
Somme sur toutes les charges.  
L'excès d'e<sup>-</sup>  
implique une variation de charge globale  $Q(t) = \alpha N(t)$

## Variation du courant (terme géomagnétique)

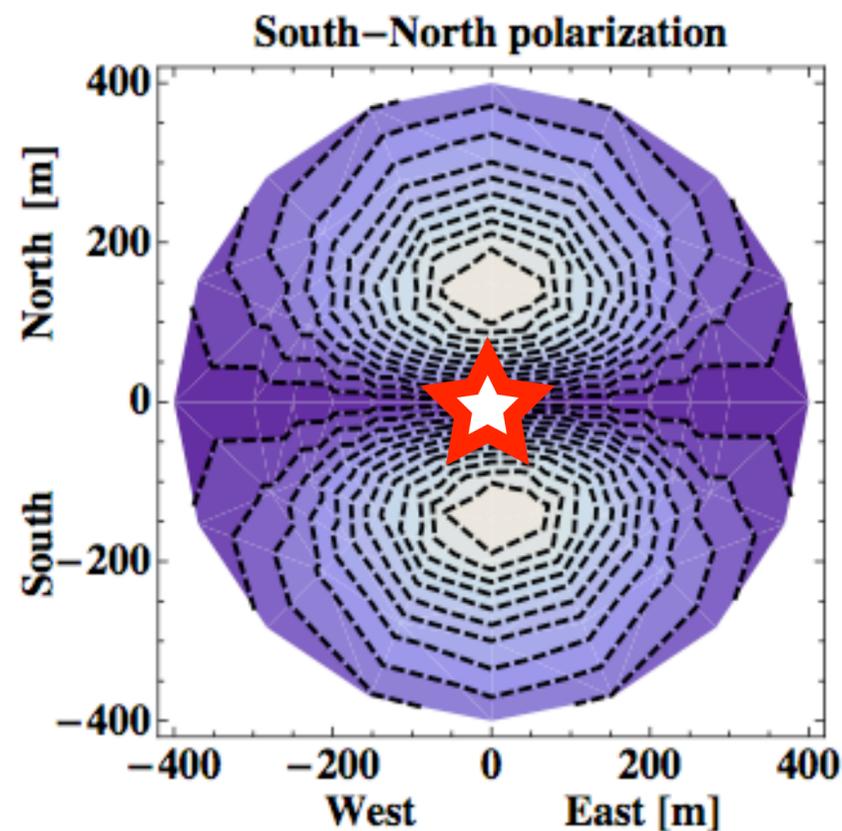
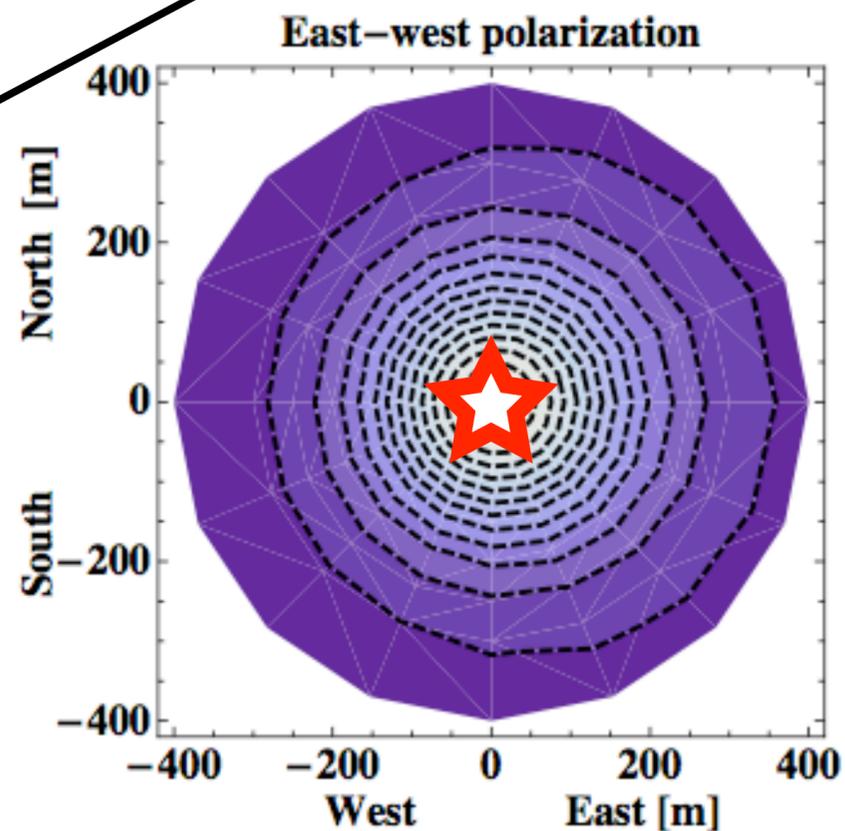
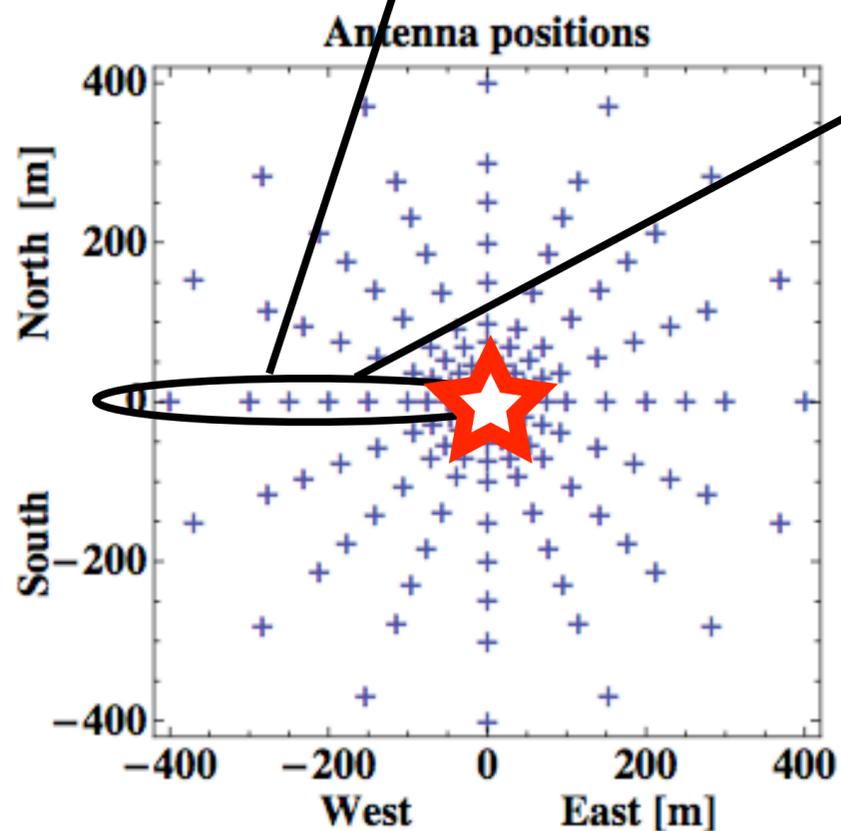
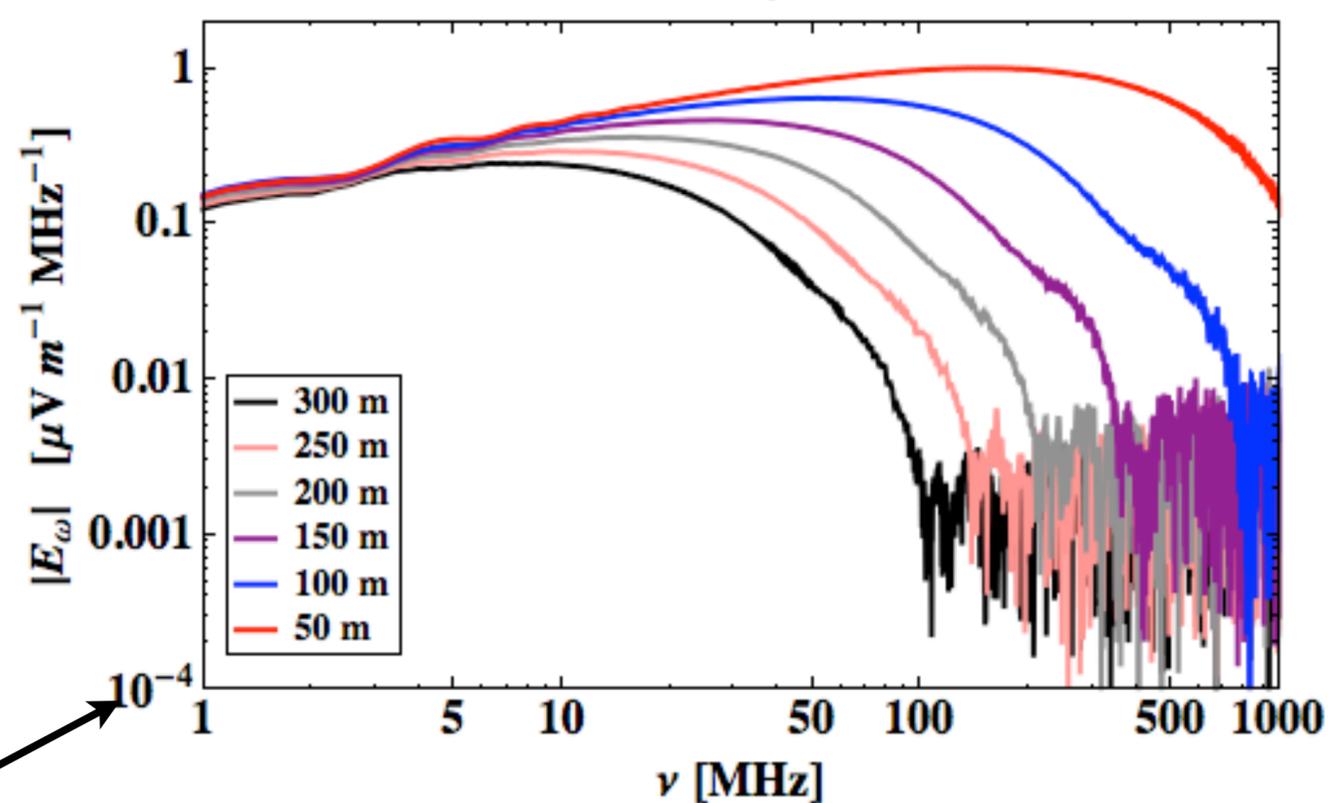
Somme des courants.  
Vient de la dérive systématique des e<sup>-</sup>/e<sup>+</sup> dans  $\mathbf{B}$

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

vertical,  $10^{17}$  eV, Nancay B-field, SELFAS2



vertical,  $10^{17}$  eV, Nancay B-field, SELFAS2

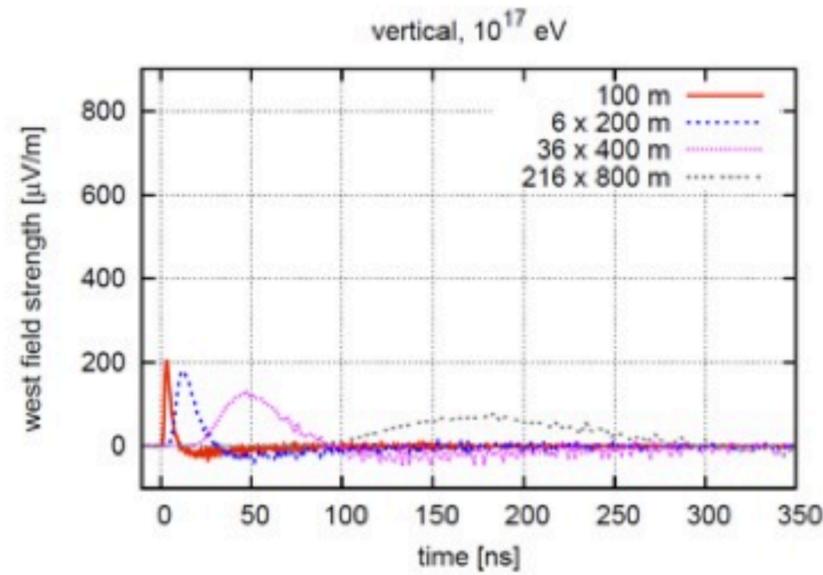


# Comparaison des codes

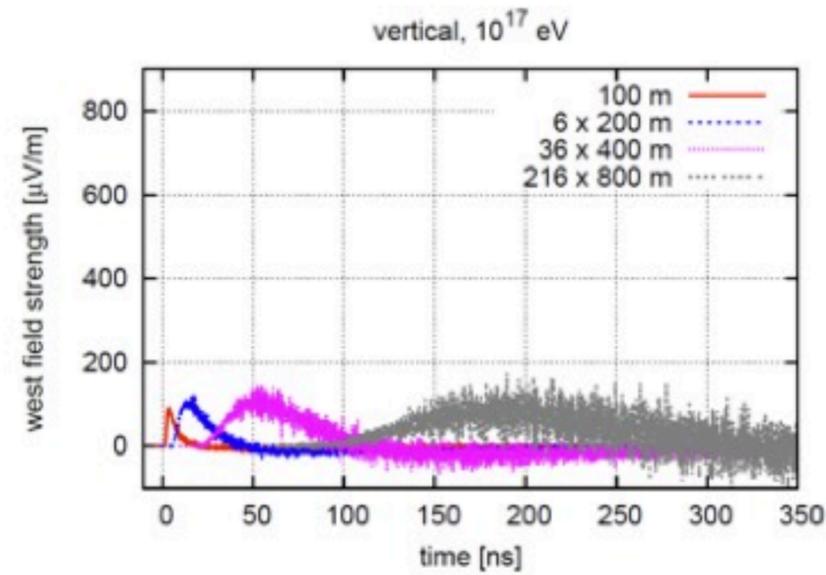
(T. Huege, ARENA juin 2012)

Article prévu avec les auteurs des principaux codes

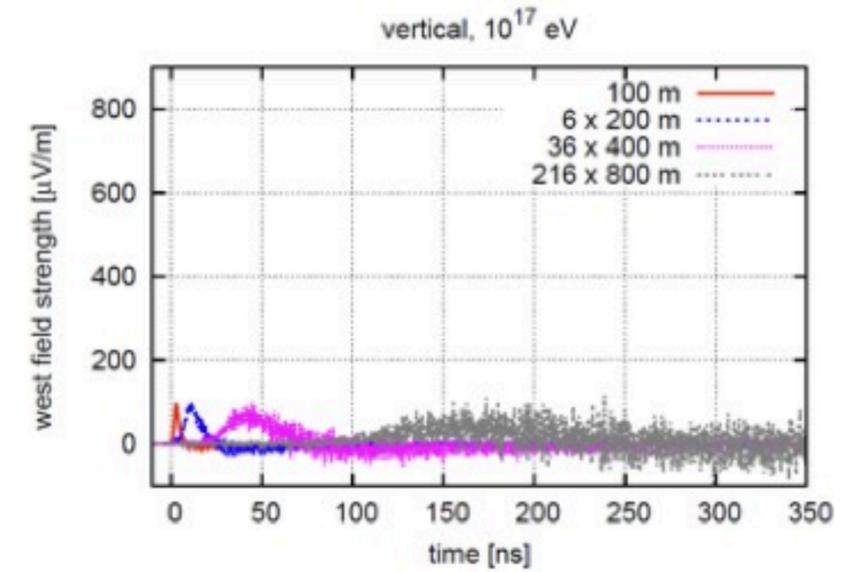
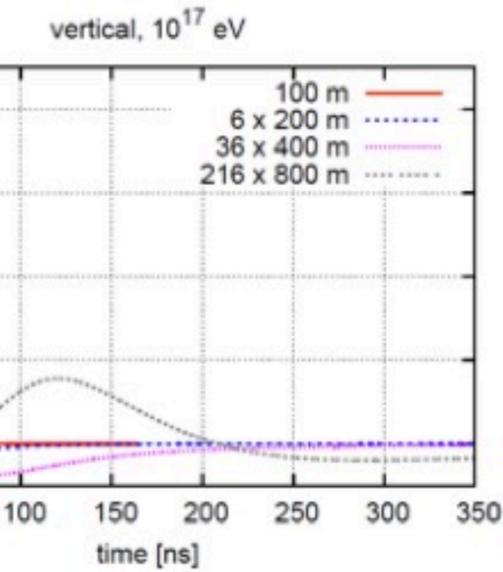
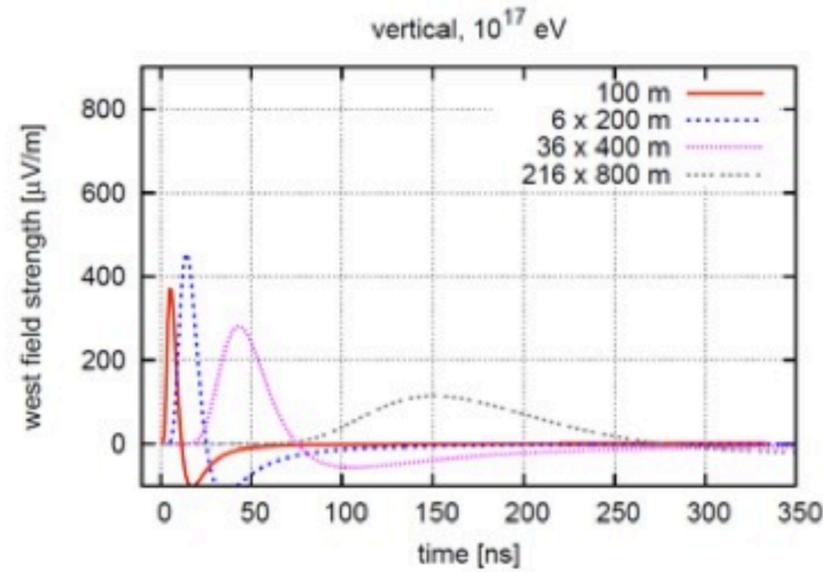
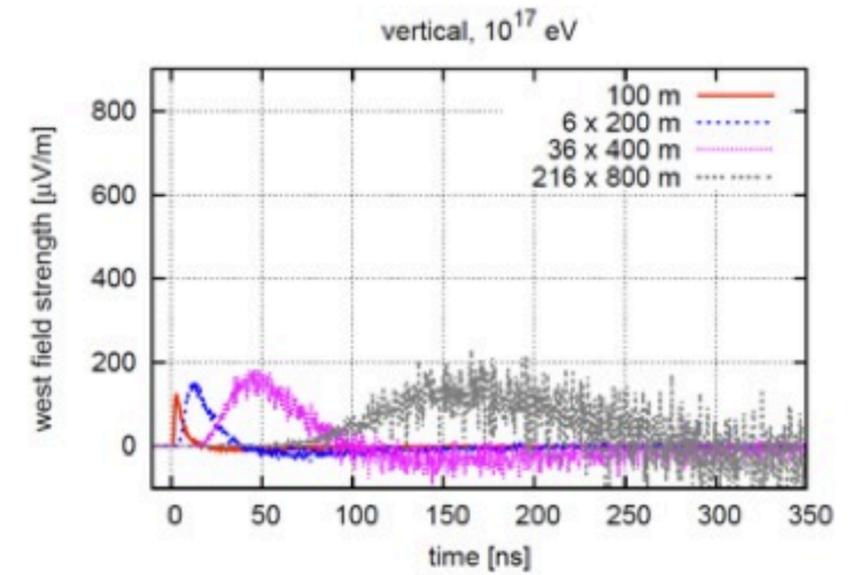
## REAS3.1



## CoREAS



## ZHAireS



## MGMR

## EVA

## SELFAS2

# Signal attendu

ce que nous apprennent les simulations (et les expériences des 60s)

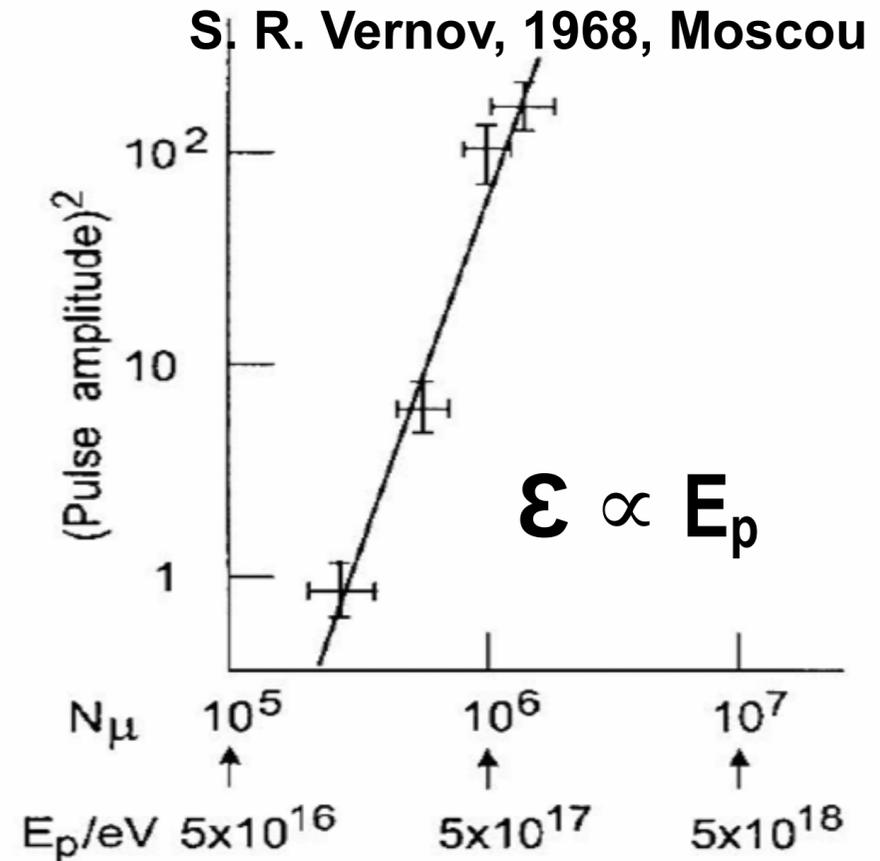
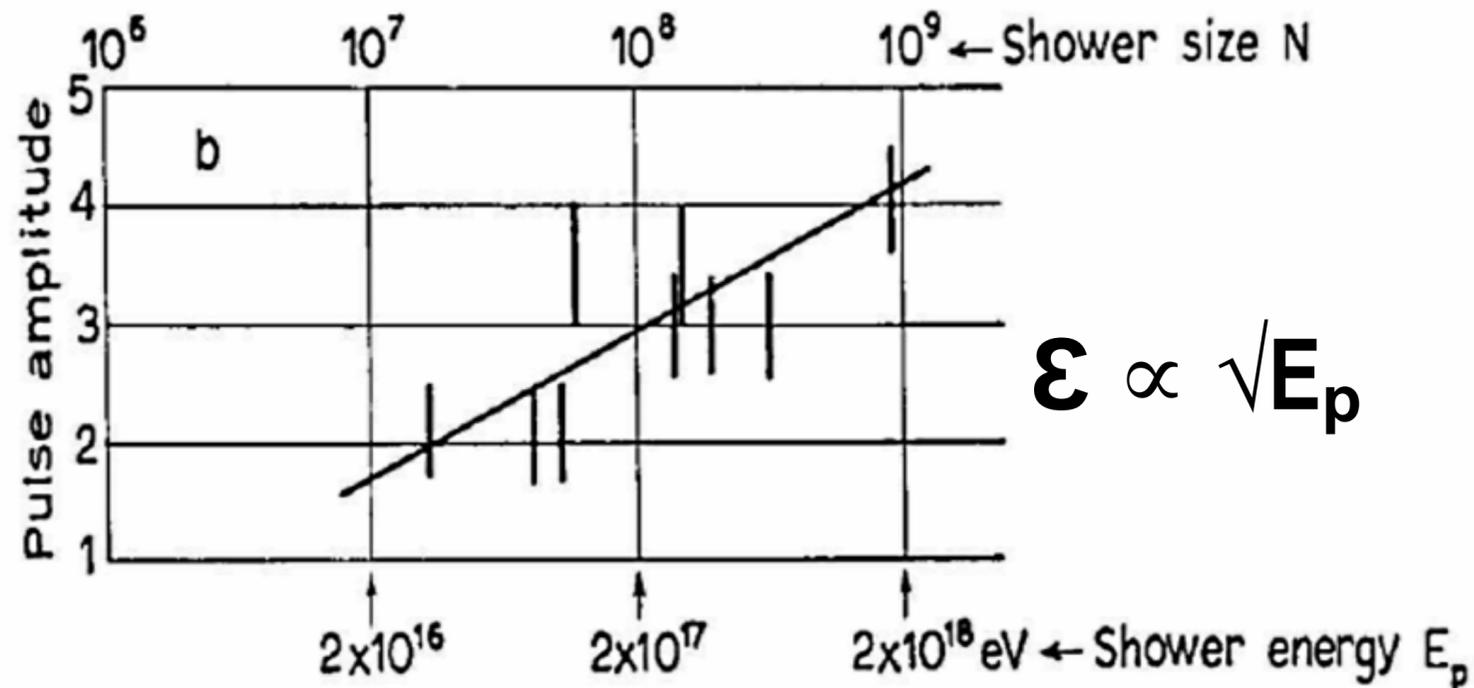
- le champ électrique est **proportionnel** au nombre de charges et donc à l'énergie du primaire
- le signal se trouve dans la bande **1 MHz - 1 GHz**
- besoin d'une **antenne large bande** pour détecter les gerbes lointaines
- besoin d'une sensibilité suffisante pour mesurer des champs de l'ordre de quelques **10  $\mu\text{V}/\text{m}$**

# Héritage des 60s



P. R. Barker, 1968, Chacaltaya

- 1964-65: Jelley et al, premières expériences dans le MHz
- 1968 : situation peu claire, cohérence ? incohérence ?



- synthèse en 1971 par Allan  $\varepsilon(d) \propto E_p \sin \alpha \exp(-d/d_0)$

# Radiodétection depuis 2000

- 2000 : renouveau de la radiodétection dans les milieux denses (glace, sel) pour la détection de neutrinos
- 2000 : tentative de détection des gerbes sur CASA-MIA et EAS-TOP
- 2003 : premières expériences modernes CODALEMA (Nançay) & LOPES (Karlsruhe)
- depuis 2003 : nombreux développements théoriques (descriptions microscopique, macroscopique) donnant naissance à plusieurs codes de simulation (REAS3, MGMR, SELFAS, ZHAires...)
- depuis 2006 : nouvelles expériences, notamment en mode autonome

$$\mathbf{E} \propto \mathbf{n} \times \mathbf{B}$$

# Expériences modernes

- LOPES (GE)
- • CODALEMA (FRA)
- TREND (FRA/CN)
- En Argentine
  - pre-AERA setups
- • RAuger (FRA)
- MAXIMA (NL)
- • AERA (FRA/GE/NL)
- EASIER (FRA)
- RASTA (USA)

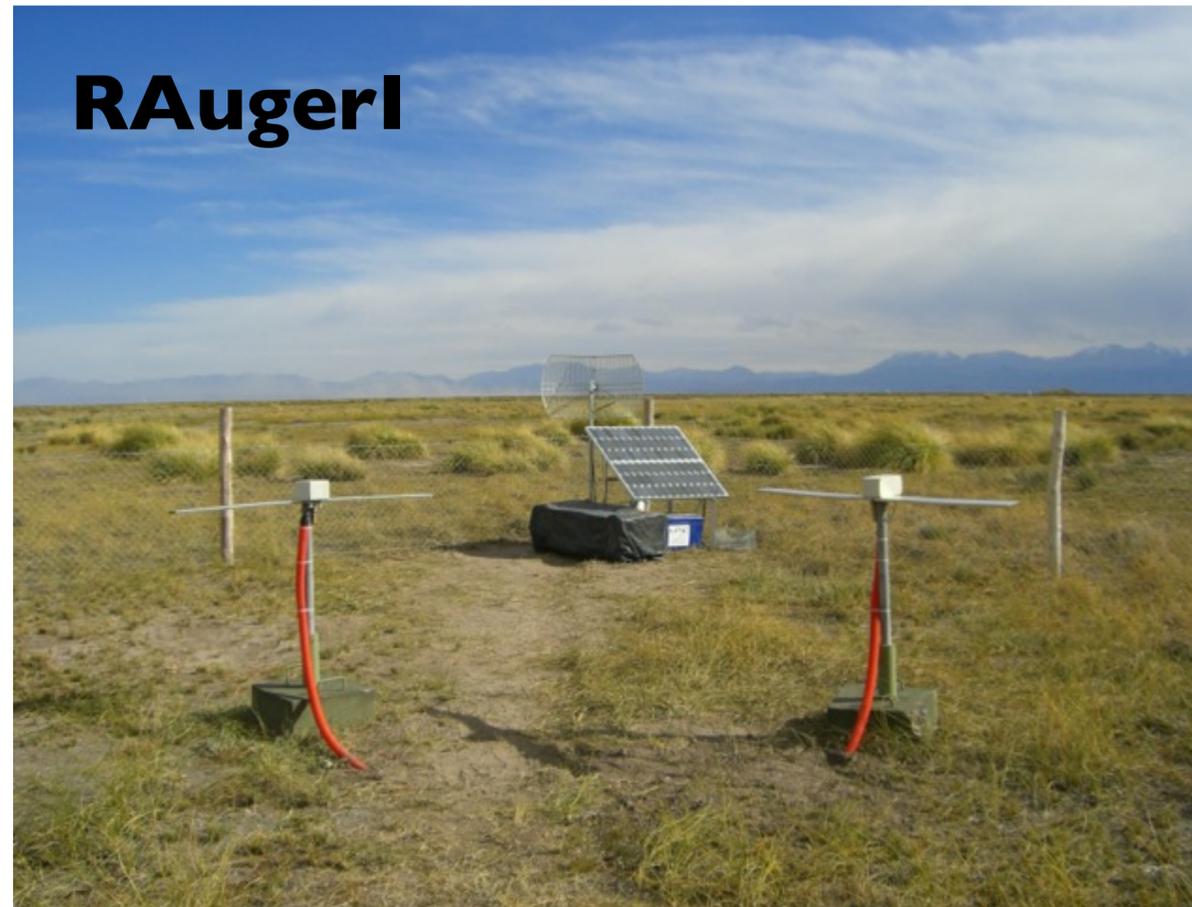
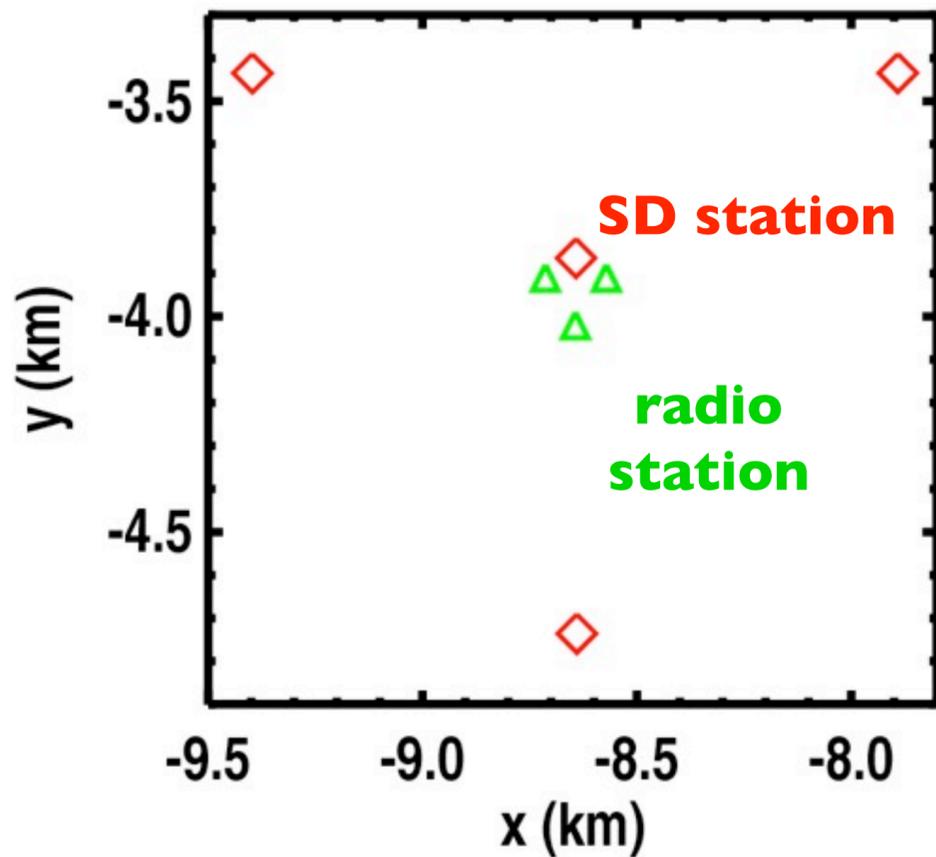
# Expériences modernes

→ ● RAuger (FRA)

→ ● AERA (FRA/GE/NL)

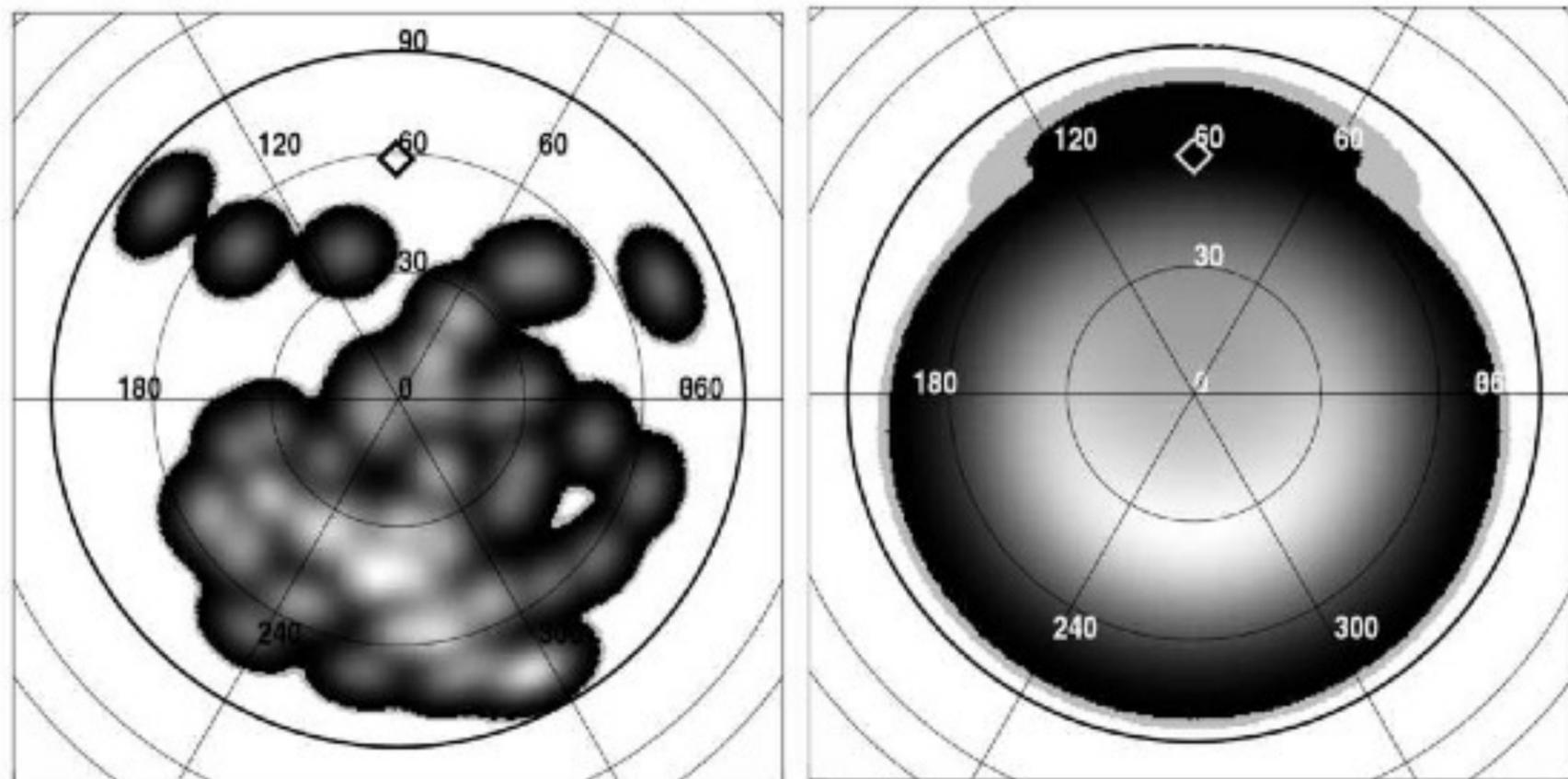


# RAugerI et II: self-trigger



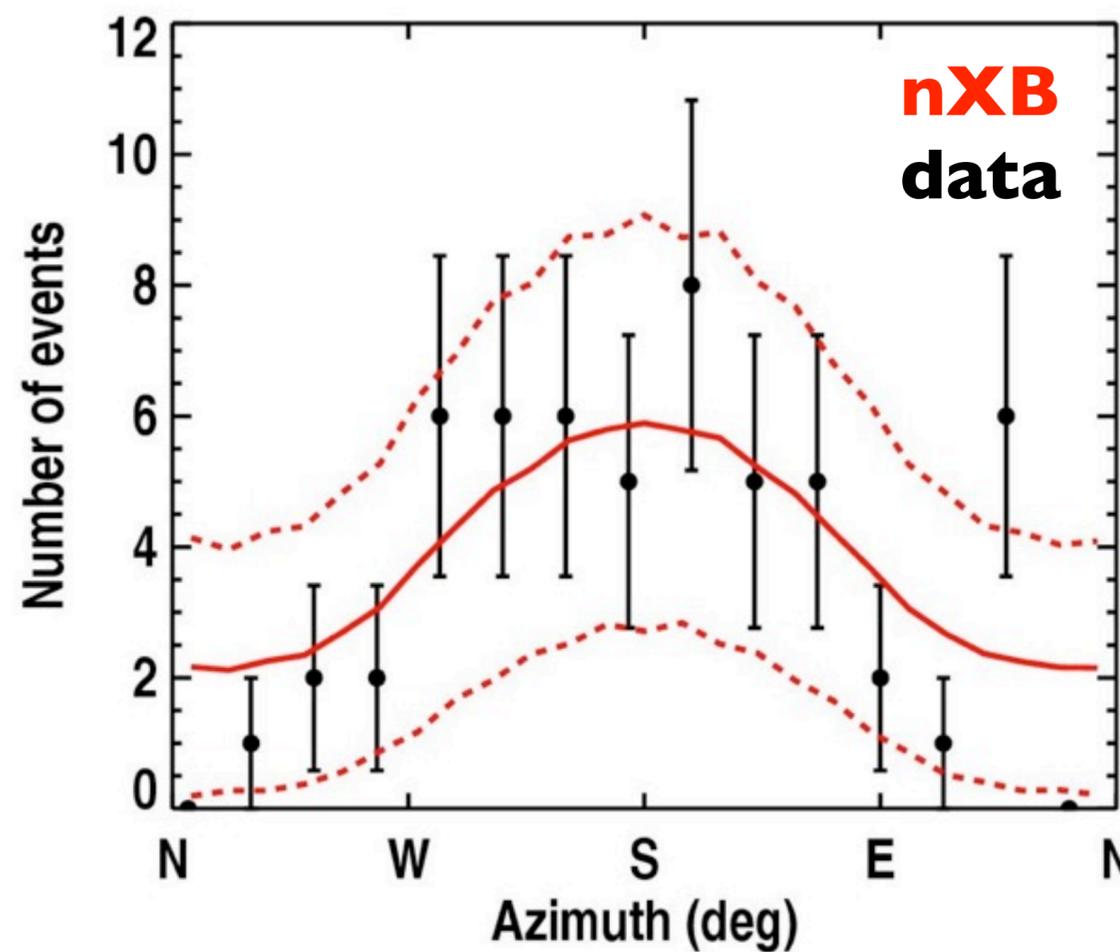
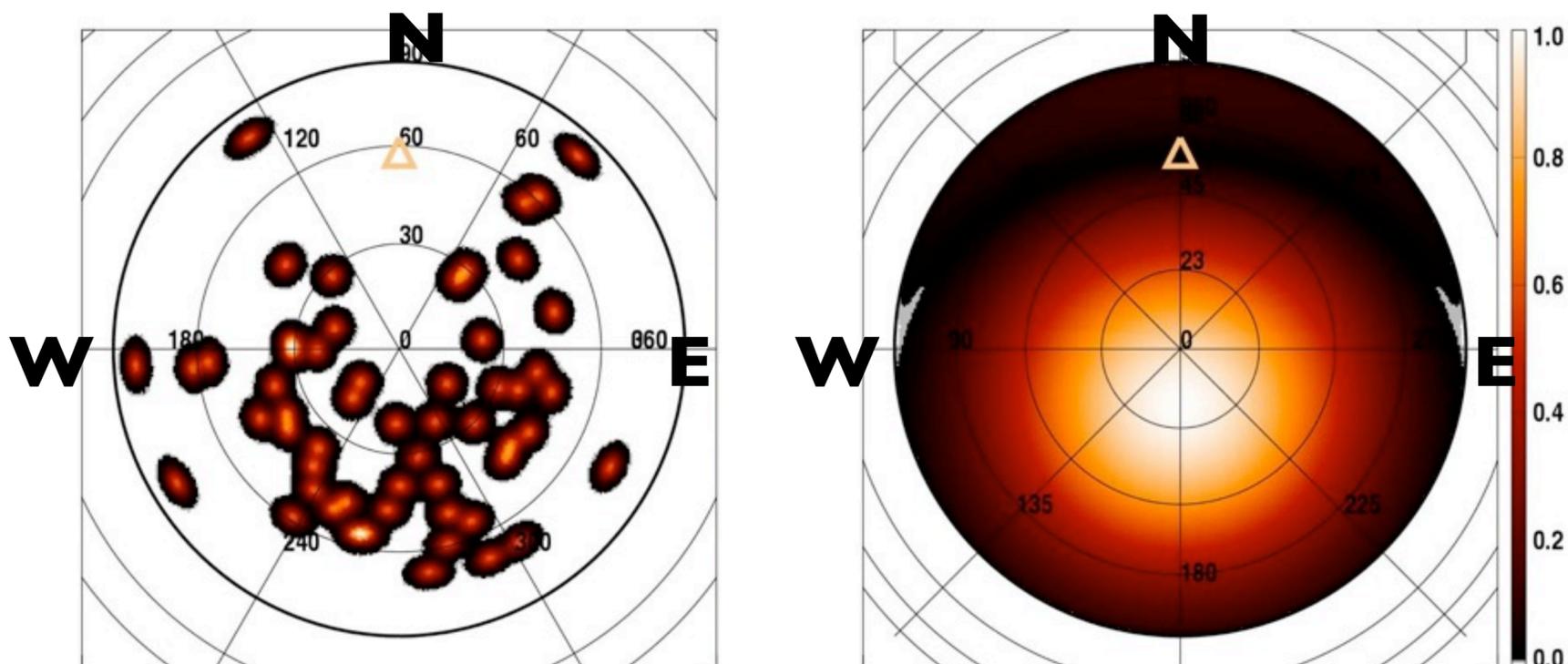
- stations radio 100% autonomes et indépendantes
- espacées de 140 m
- signal échantillonné à 1 GHz sur  $2.5 \mu\text{s}$
- trigger analogique par seuil dans 45-55 MHz
- mesure des polarisations NS et EW
- RAuger I : antenne dipolaire
- RAuger II : antenne Butterfly

# RAugerl-II : self-trigger



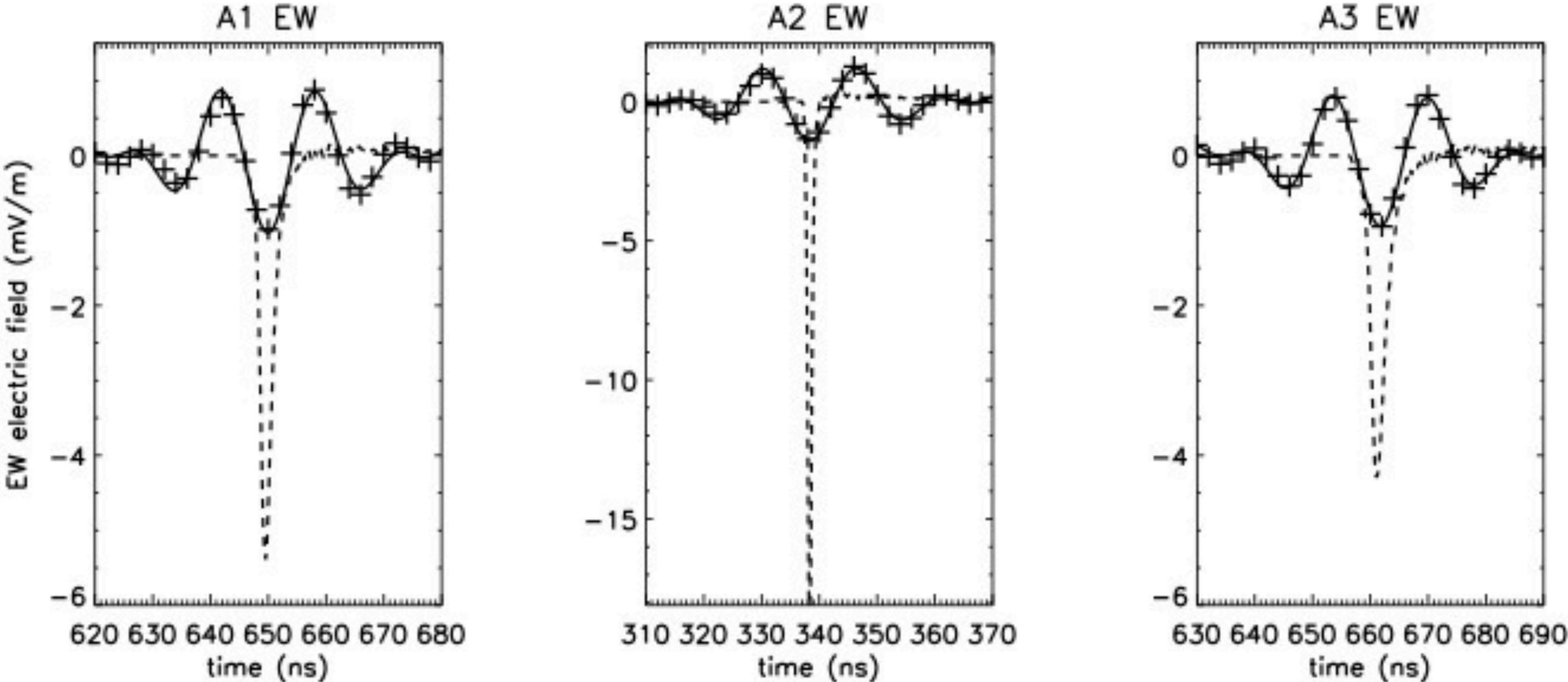
- 65 gerbes détectées (RAugerI)
- 1 coïncidence triple
- influence des conditions météo

$$E \propto n \times B$$



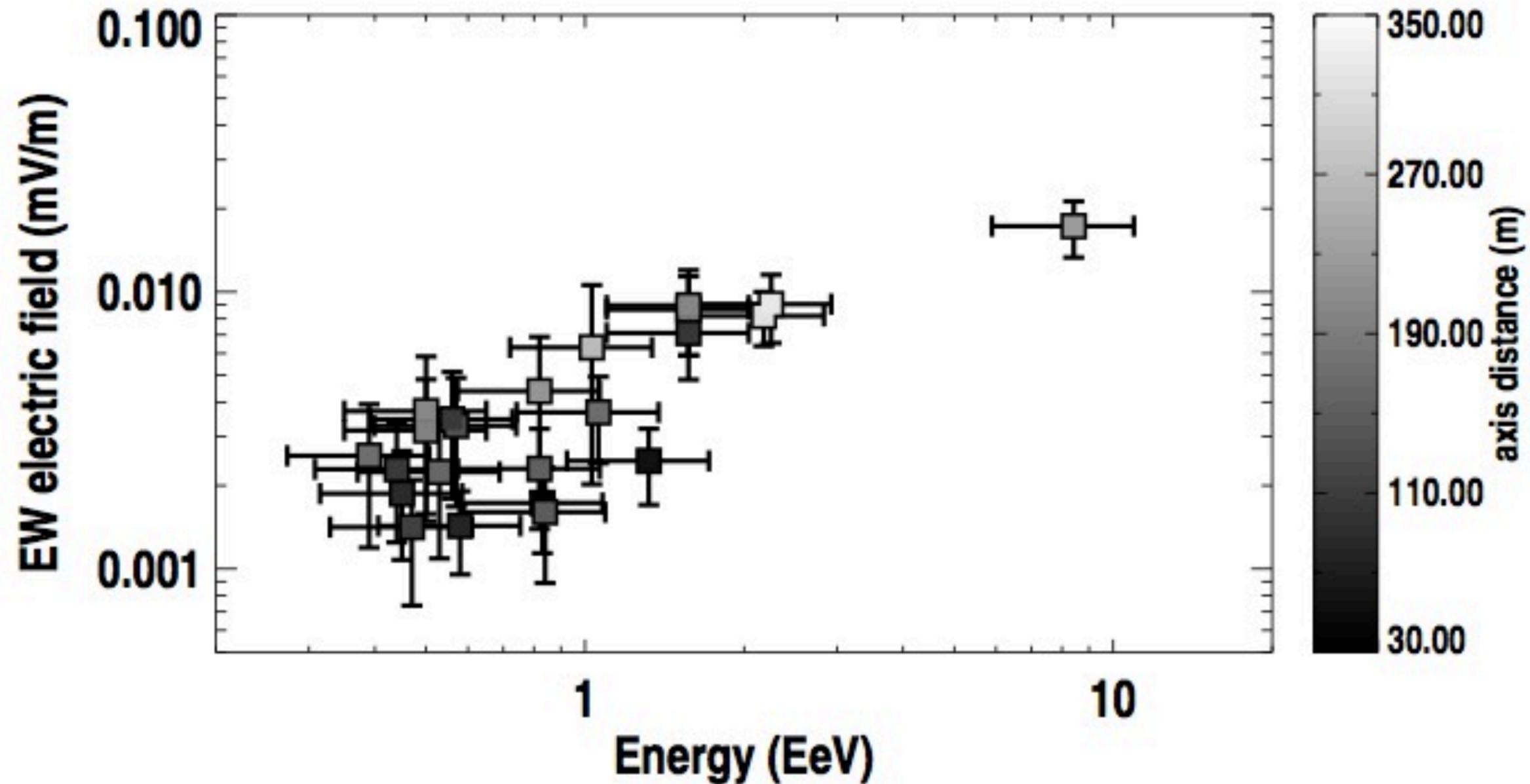
# RAugerl (2007-2010) : self-trigger

coïncidence tripe avec RAugerl : simulation avec SELFAS

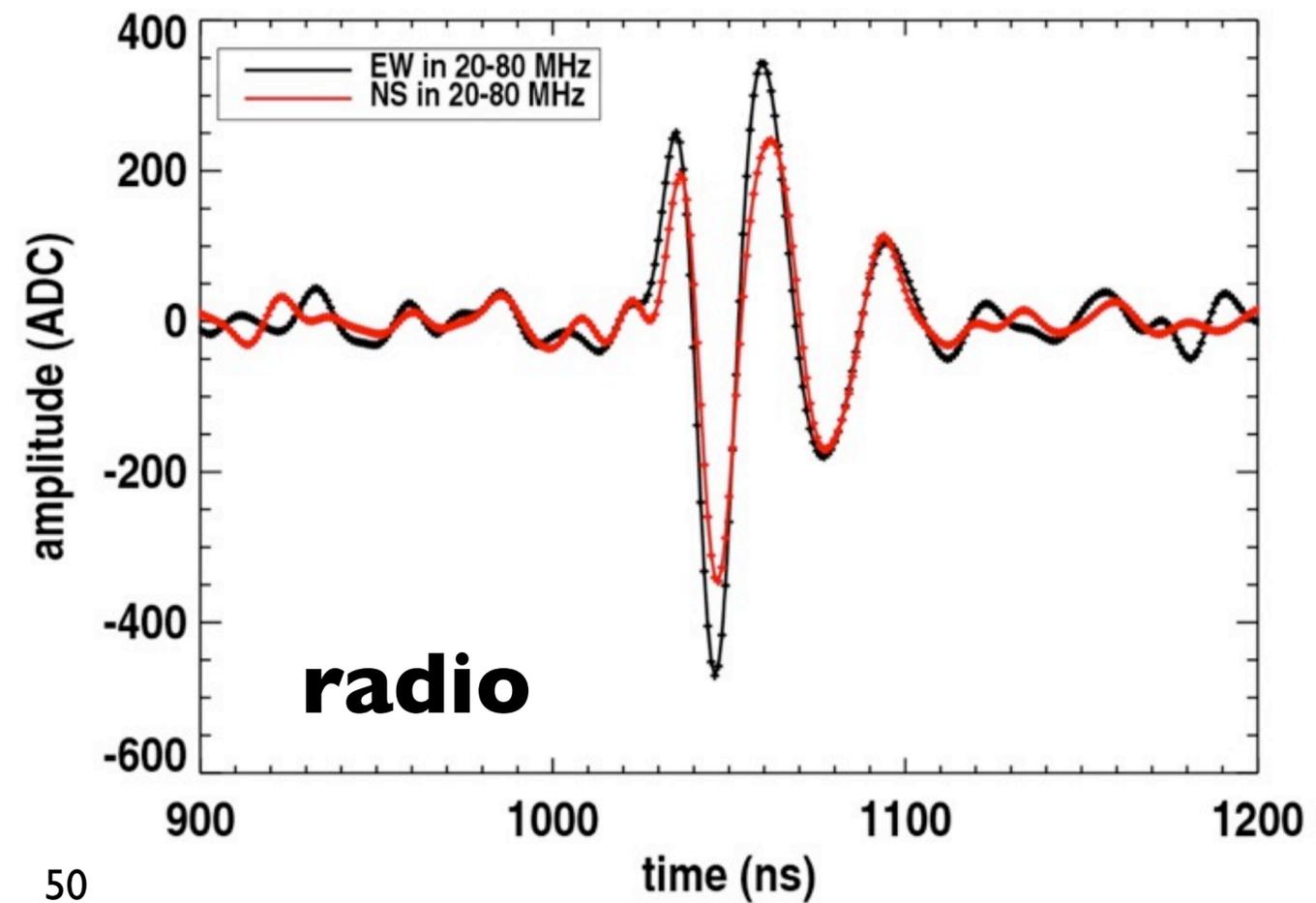
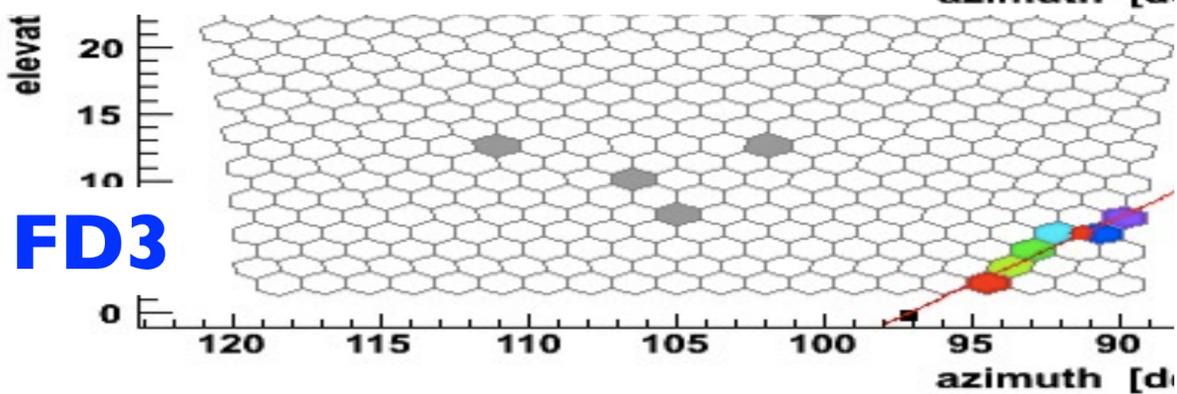
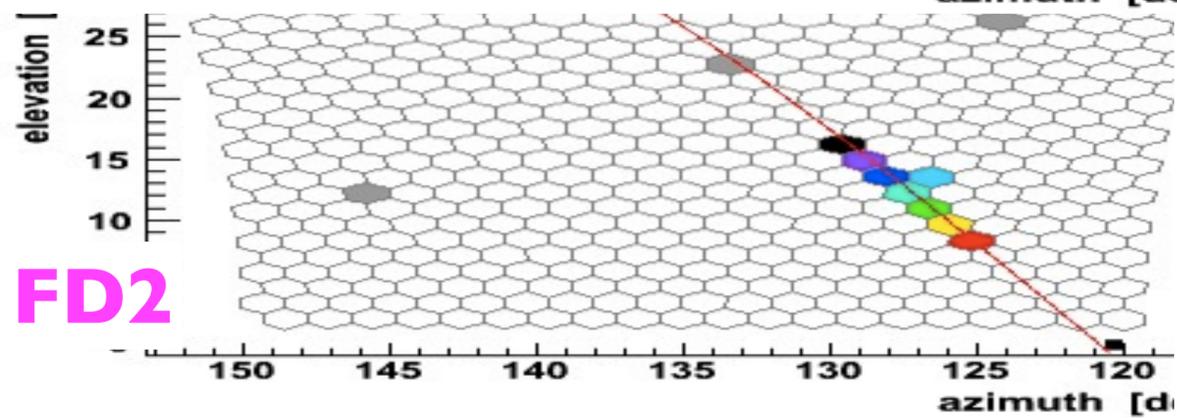
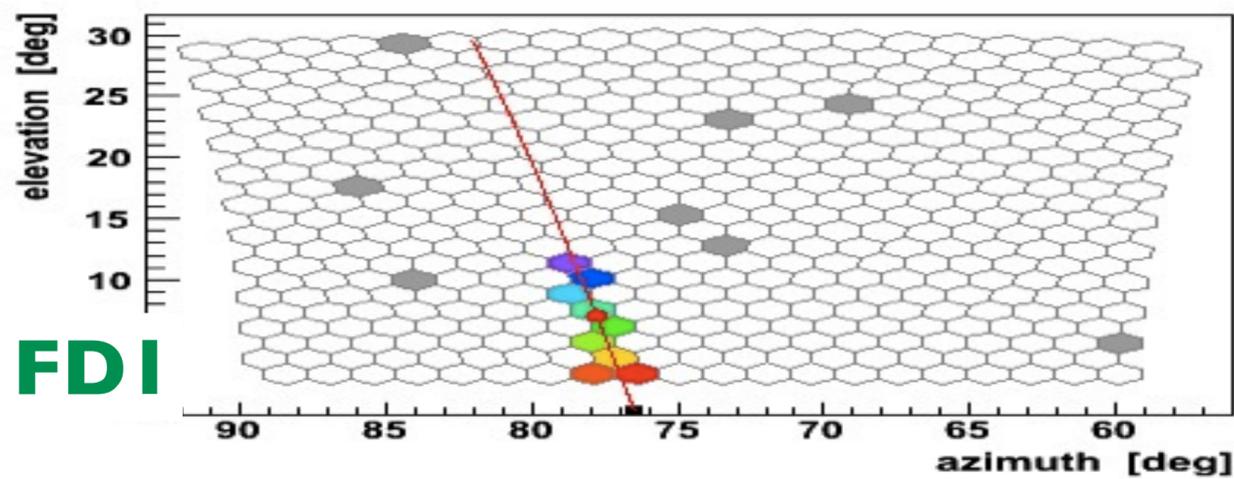
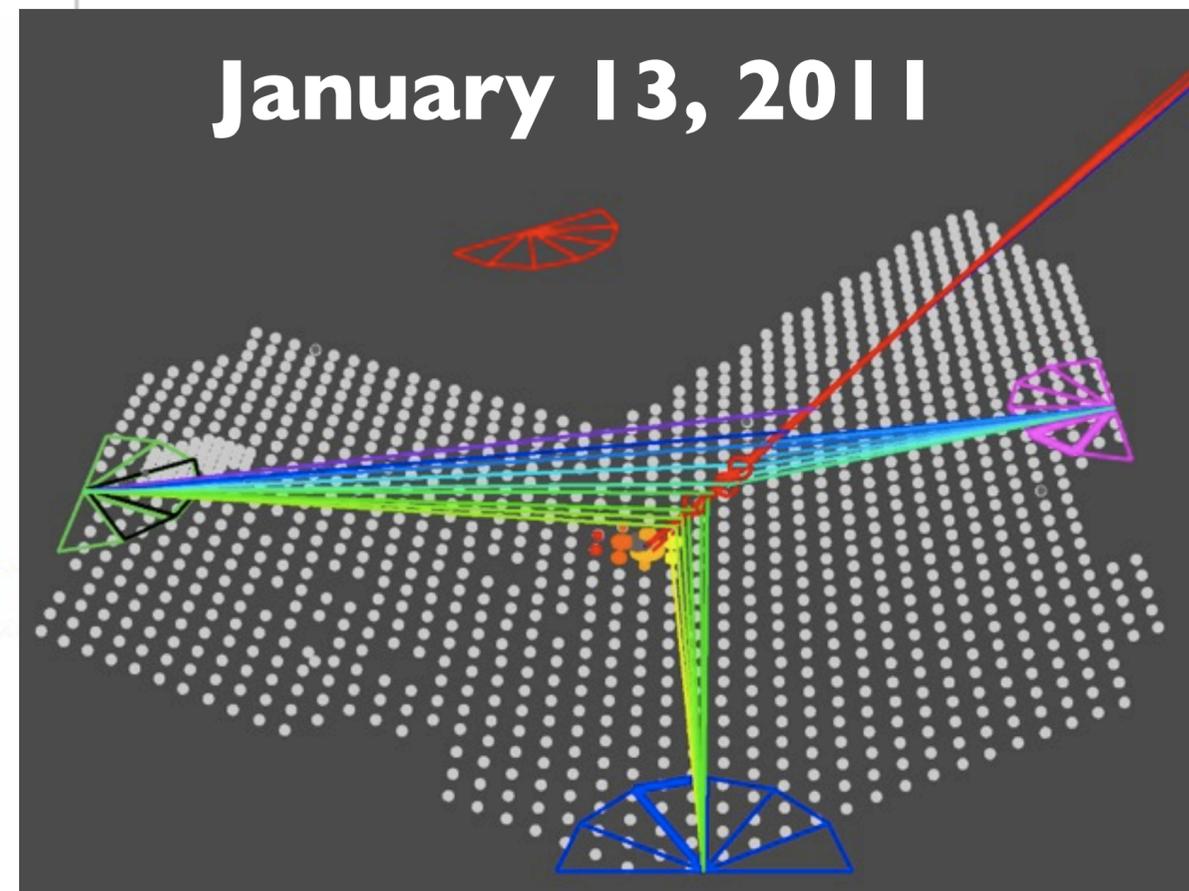
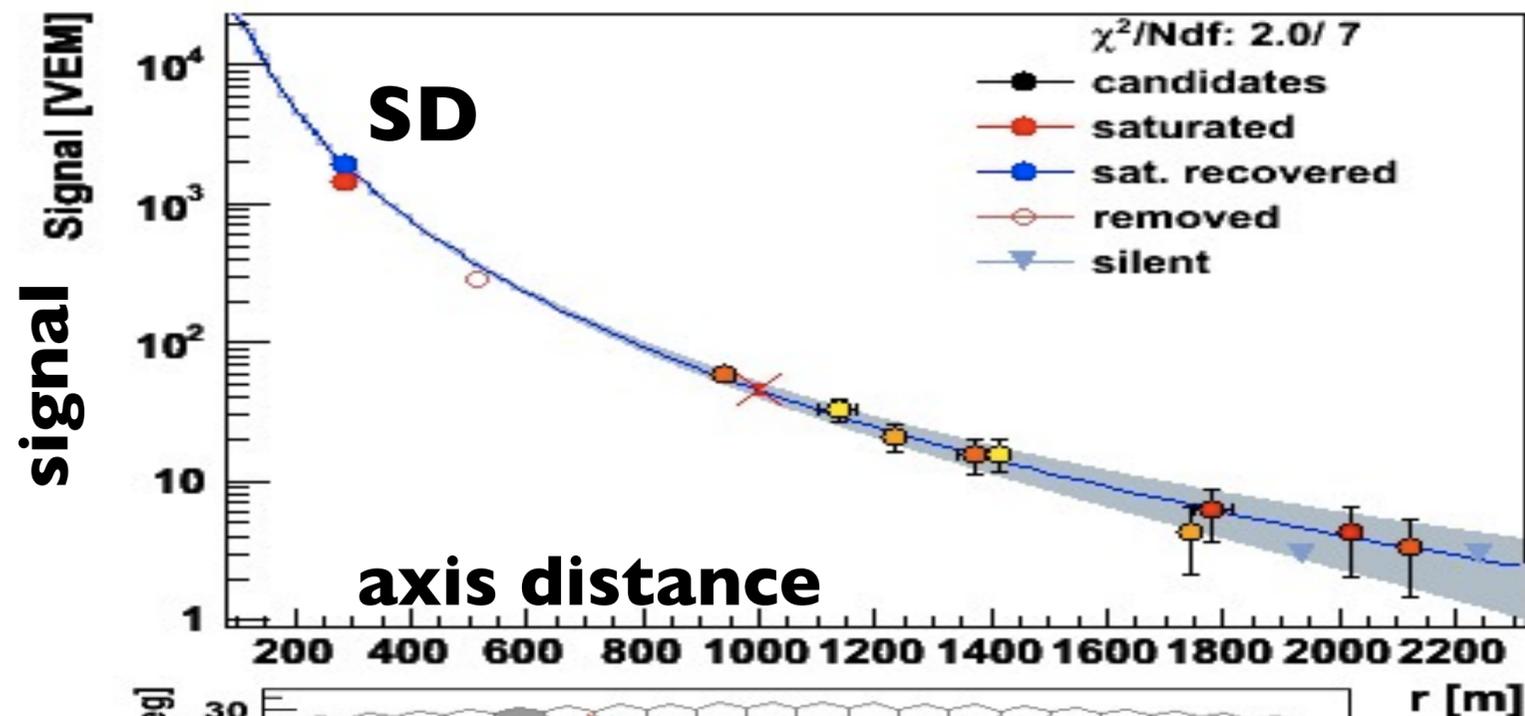


----- simulation pleine bande  
———— simulation 40-80 MHz  
+++++ données

# RAuger1 (2007-2010) : self-trigger

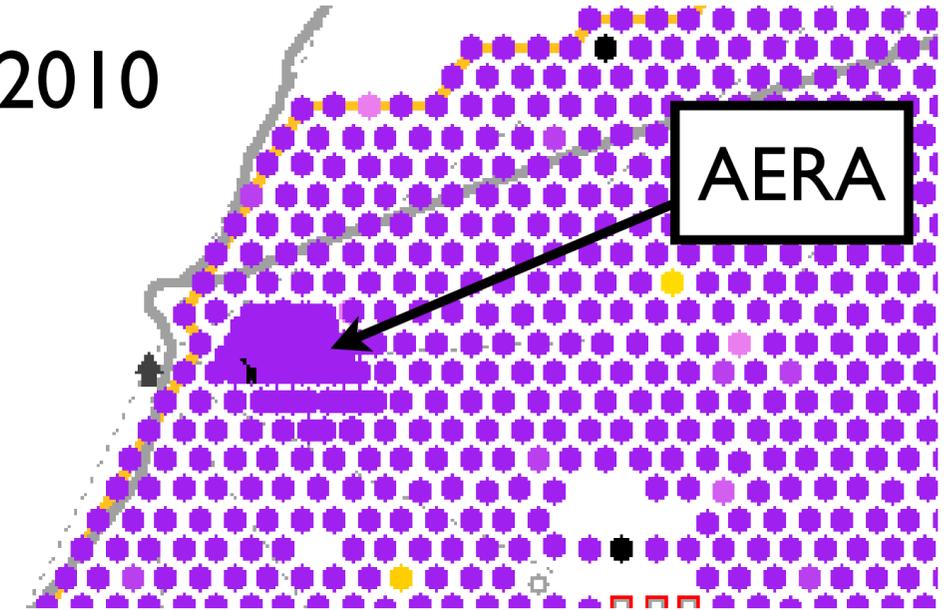
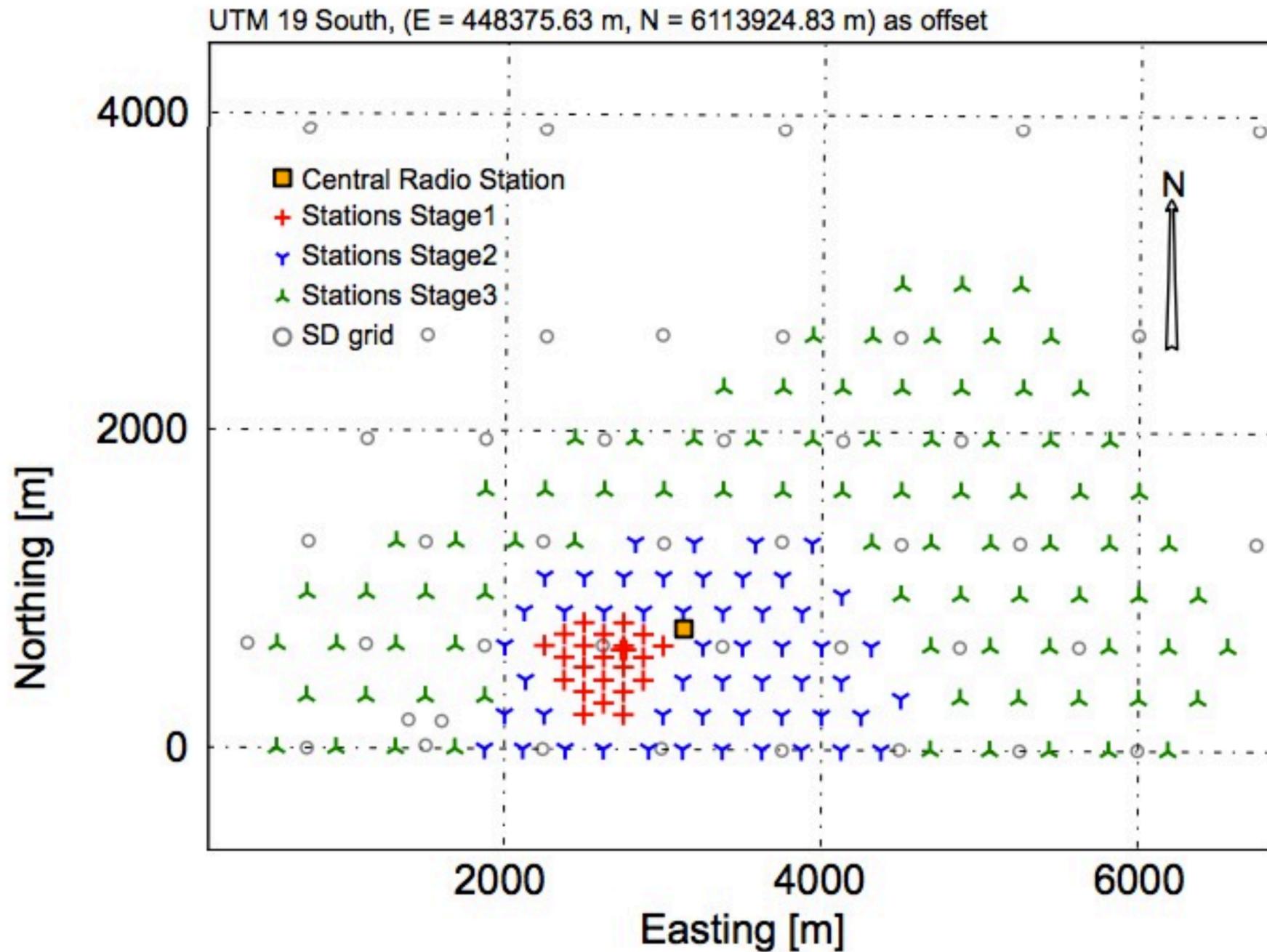


Article de 30 pages, accepté pour publication après révision mineure (19 oct 2012)



# AERA

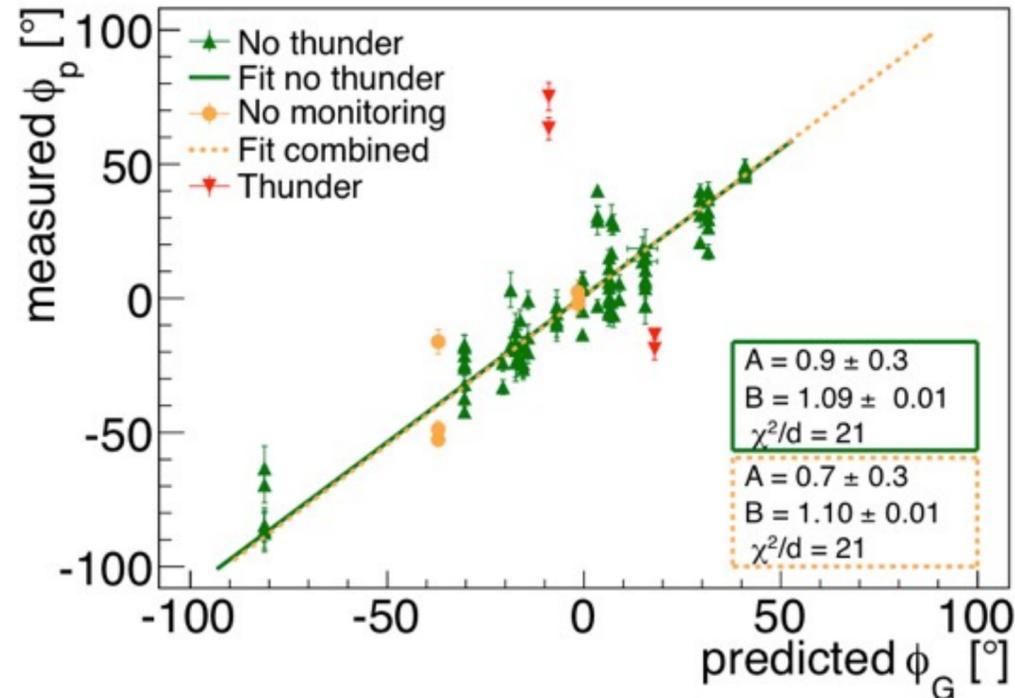
en fonctionnement depuis début 2010



- recouvrement Auger Infill, HEAT, AMIGA
- self-trigger
- trigger externe : SD and FD
- 1000 evts  $>$  1 EeV par an
- co-responsable de la tâche DAQ (notamment trigger central)
- antenne Butterfly en phase 2

# AERA

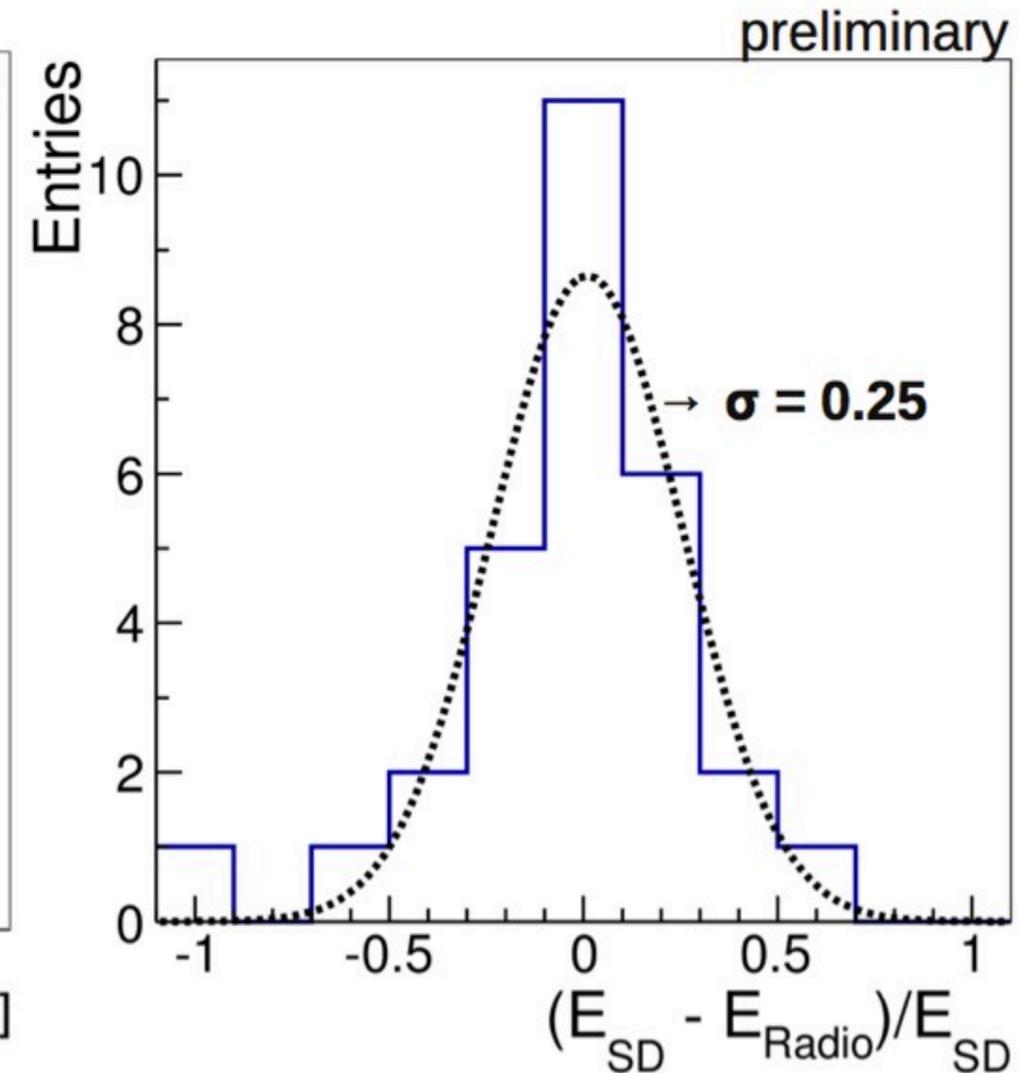
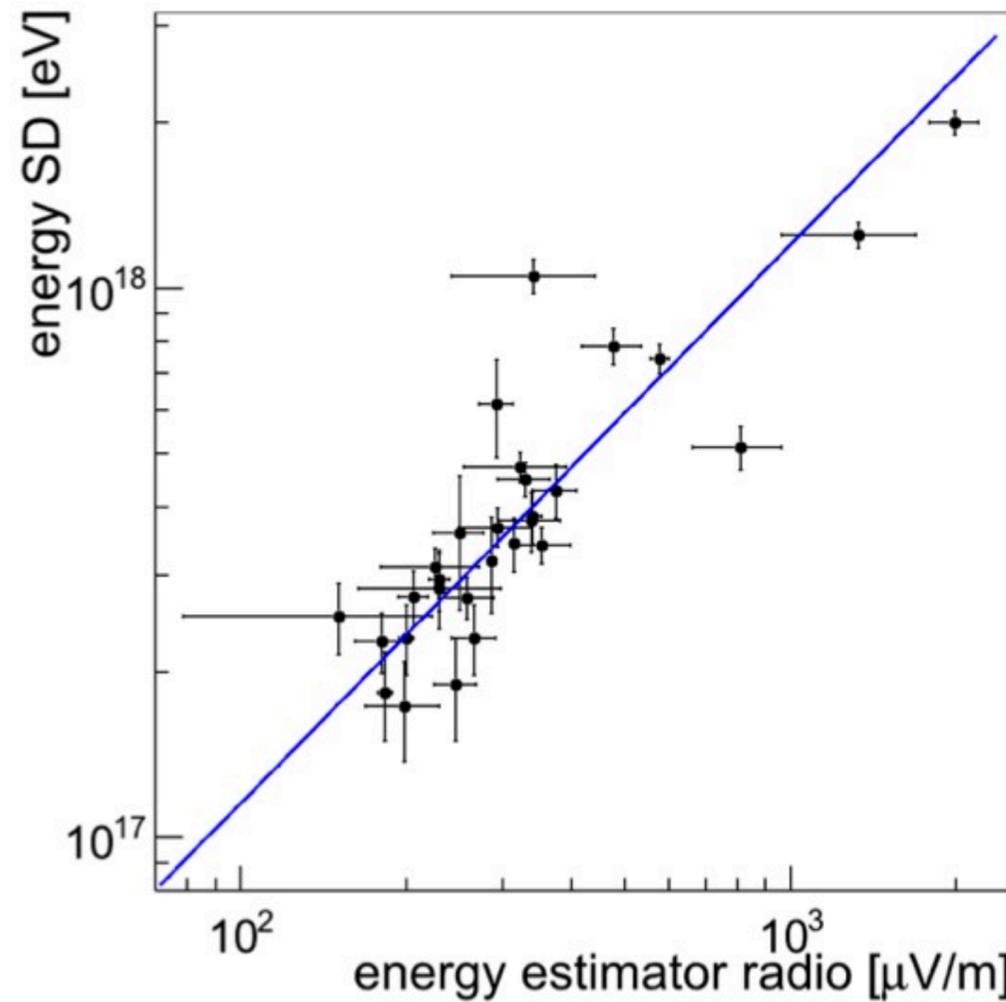
~ 100 gerbes detectées, coïncidences avec SD et FD



$$\mathbf{E} \propto \mathbf{n} \times \mathbf{B}$$

~ 0.55 evts/jour

d'après la simulation : 1-2 evts/jour



Effet géomagnétique dominant mais indication d'une composante radiale ! (~ 10%)

# R&D et Analyse radio

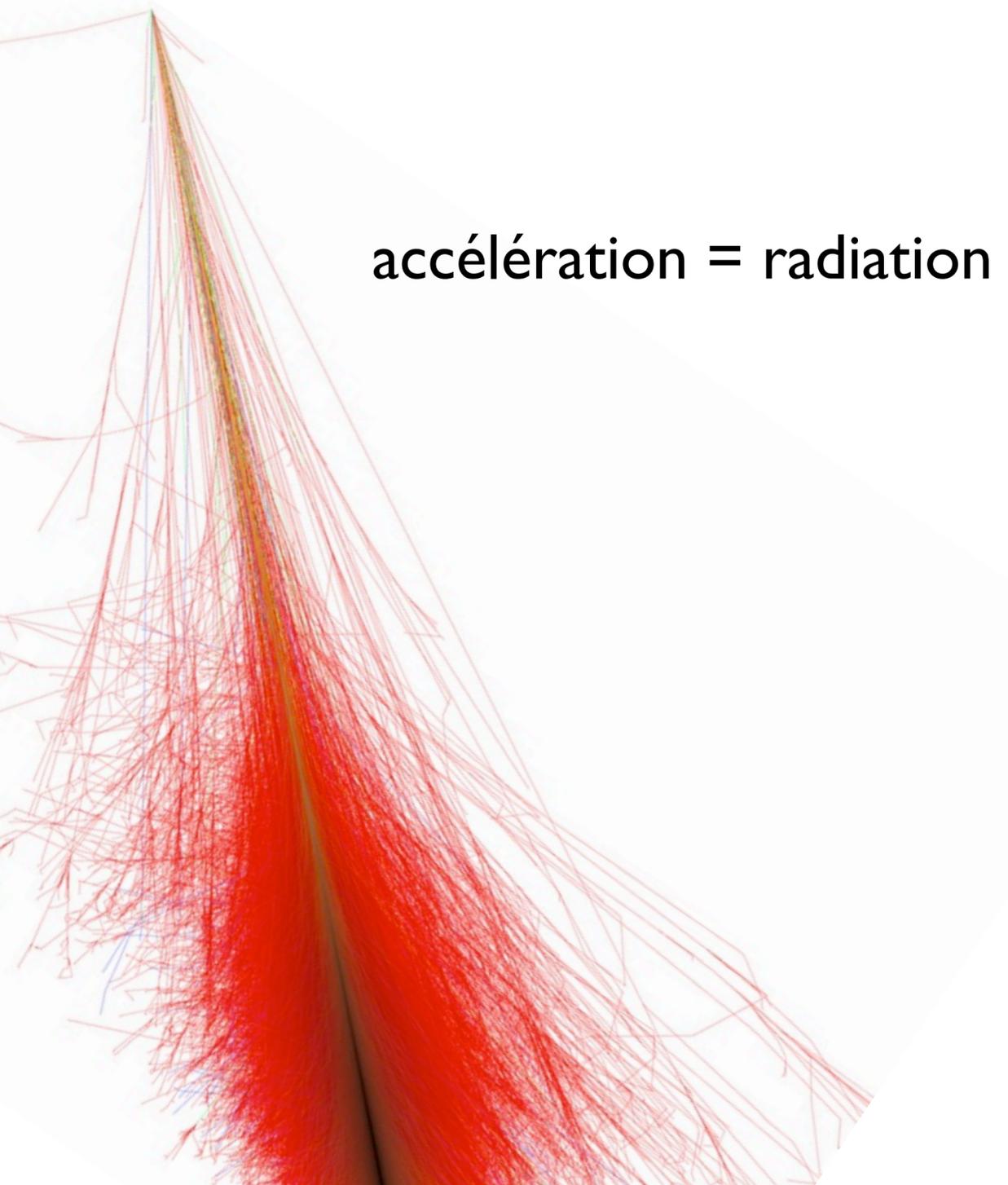
- DAQ : des algorithmes simples permettent des taux d'événements acceptables (localement et au niveau du trigger central)
- le profil exponentiel est, enfin, doucement abandonné pour une fonction plus complexe, sans symétrie radiale
- une composante radiale de polarisation du champ électrique apparaît dans les données ; le mécanisme d'excès de charge crée un champ électrique radial
- l'excès de charge est détectable dans les données de CODALEMA (décalage des cœurs radio/particules), article soumis à APP

**Simulation**

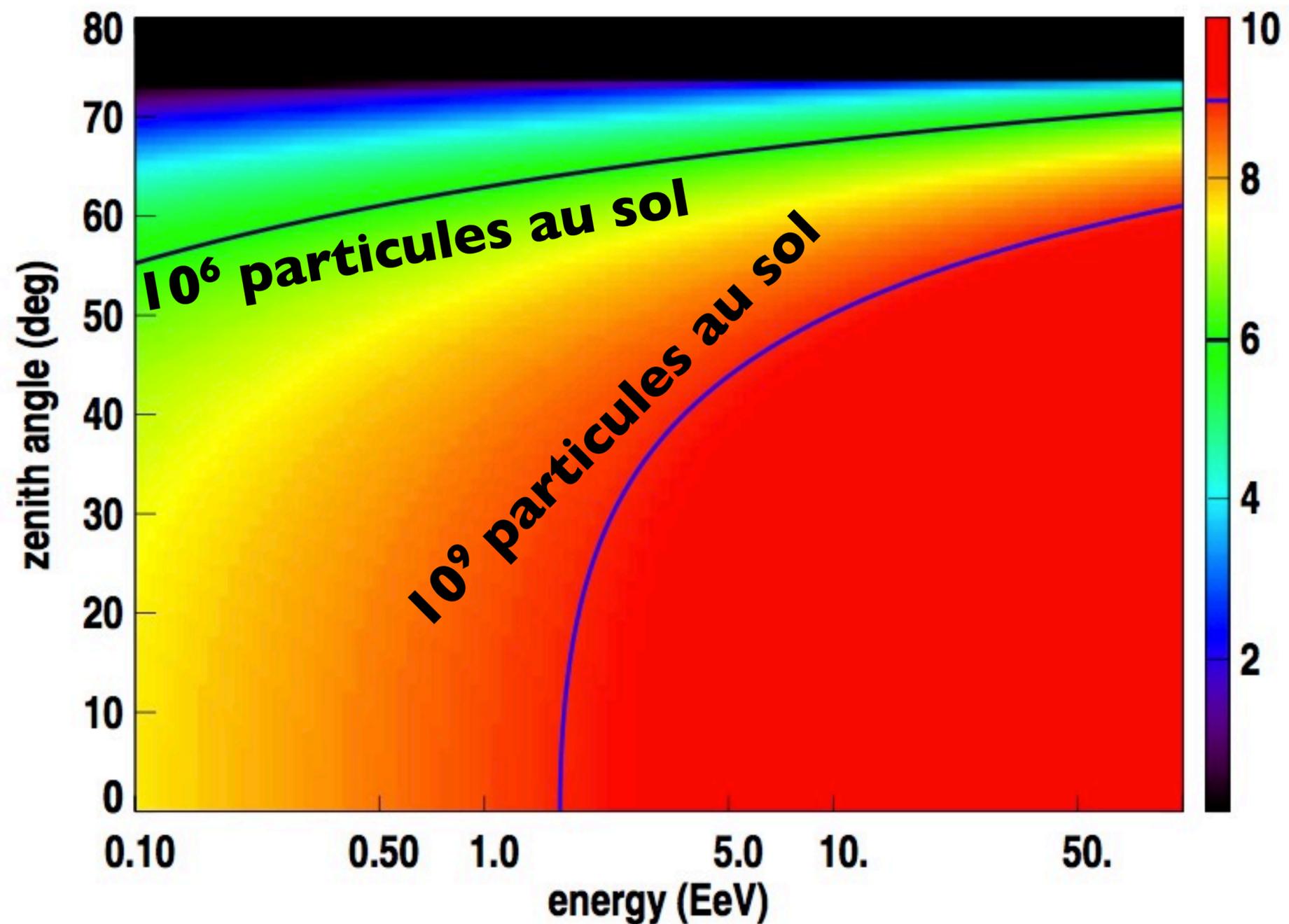


# Prédiction d'un nouveau signal : mort subite de la gerbe

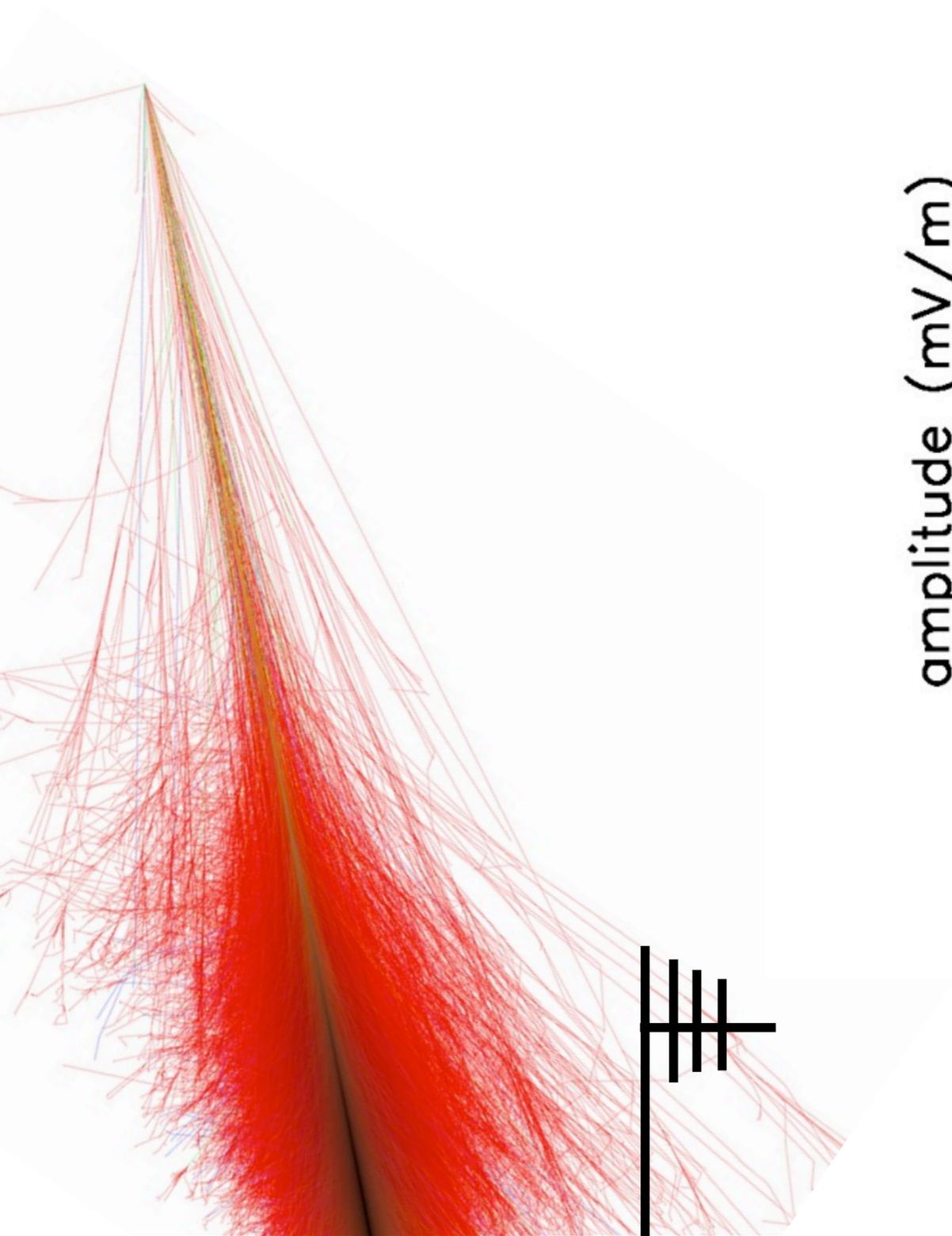
accélération = radiation



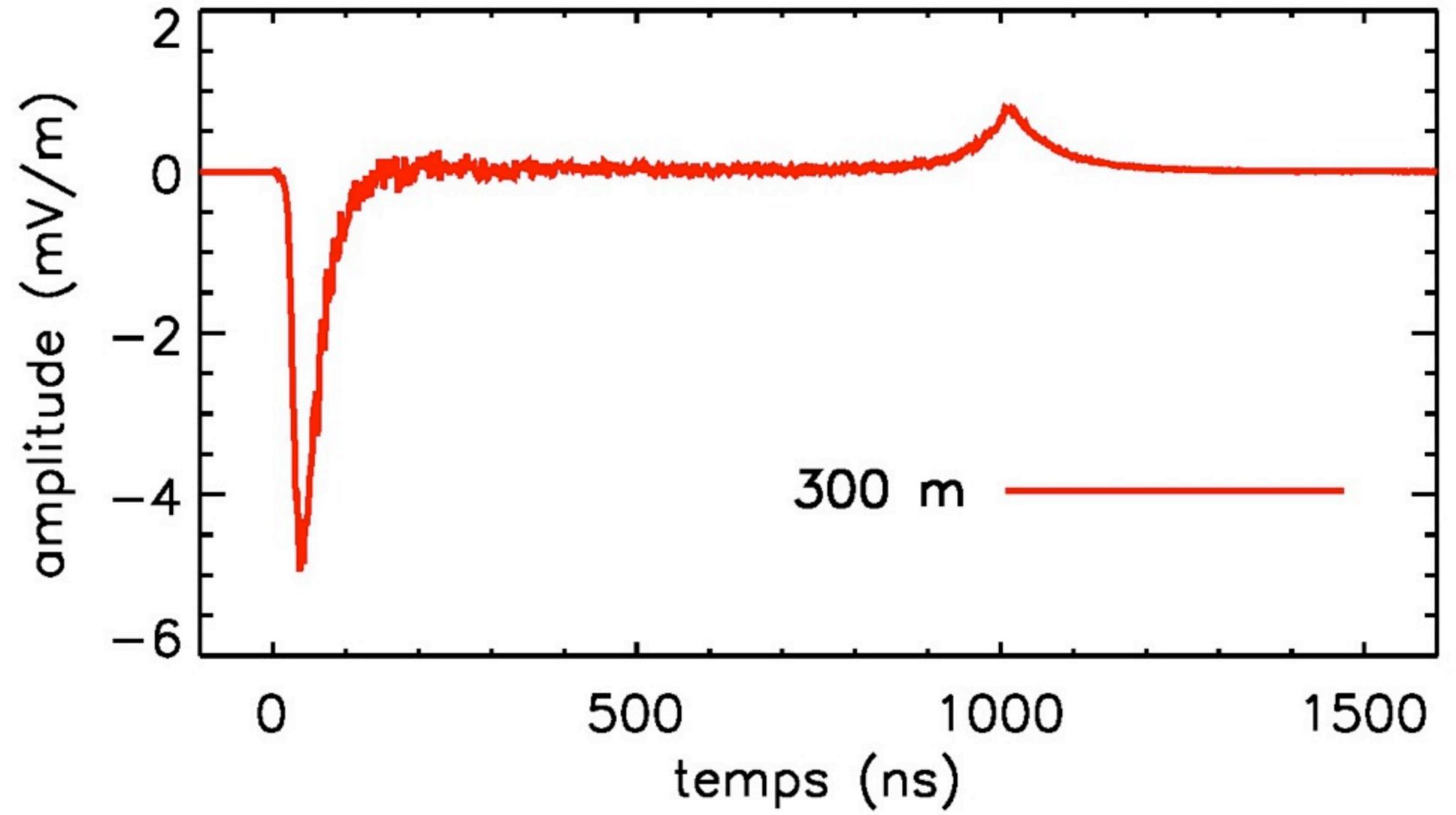
**SOL**



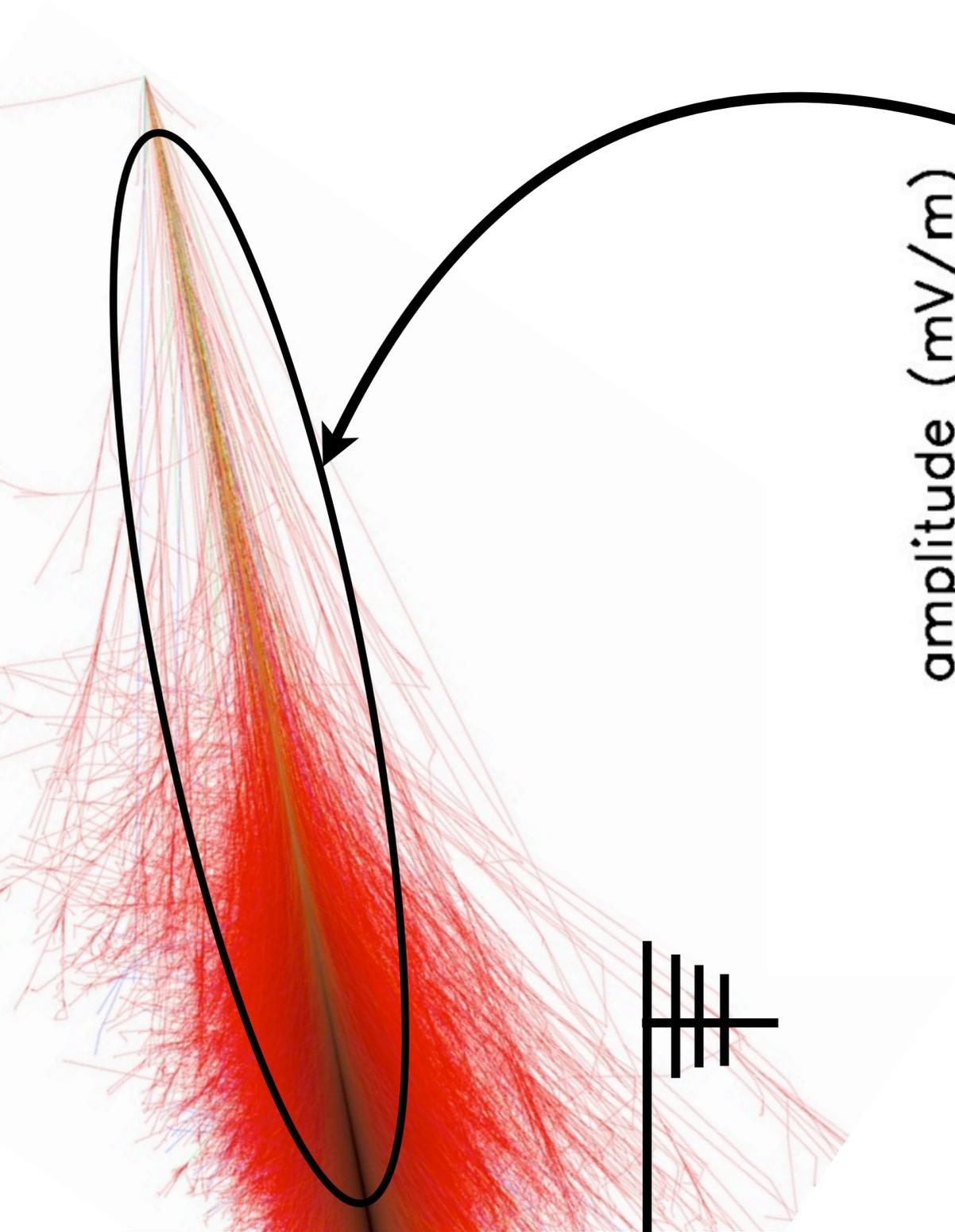
# Mort subite



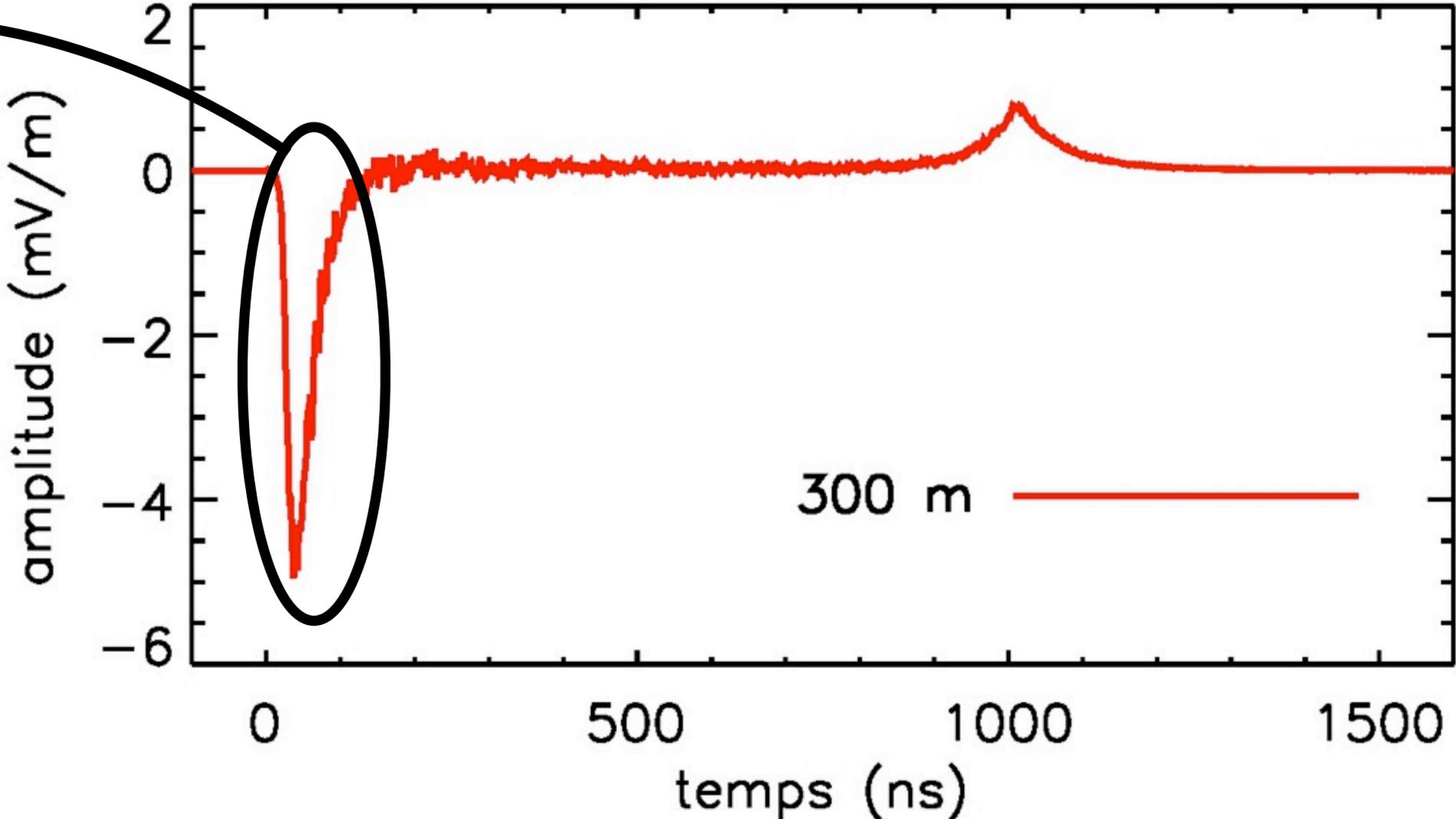
**SOL**



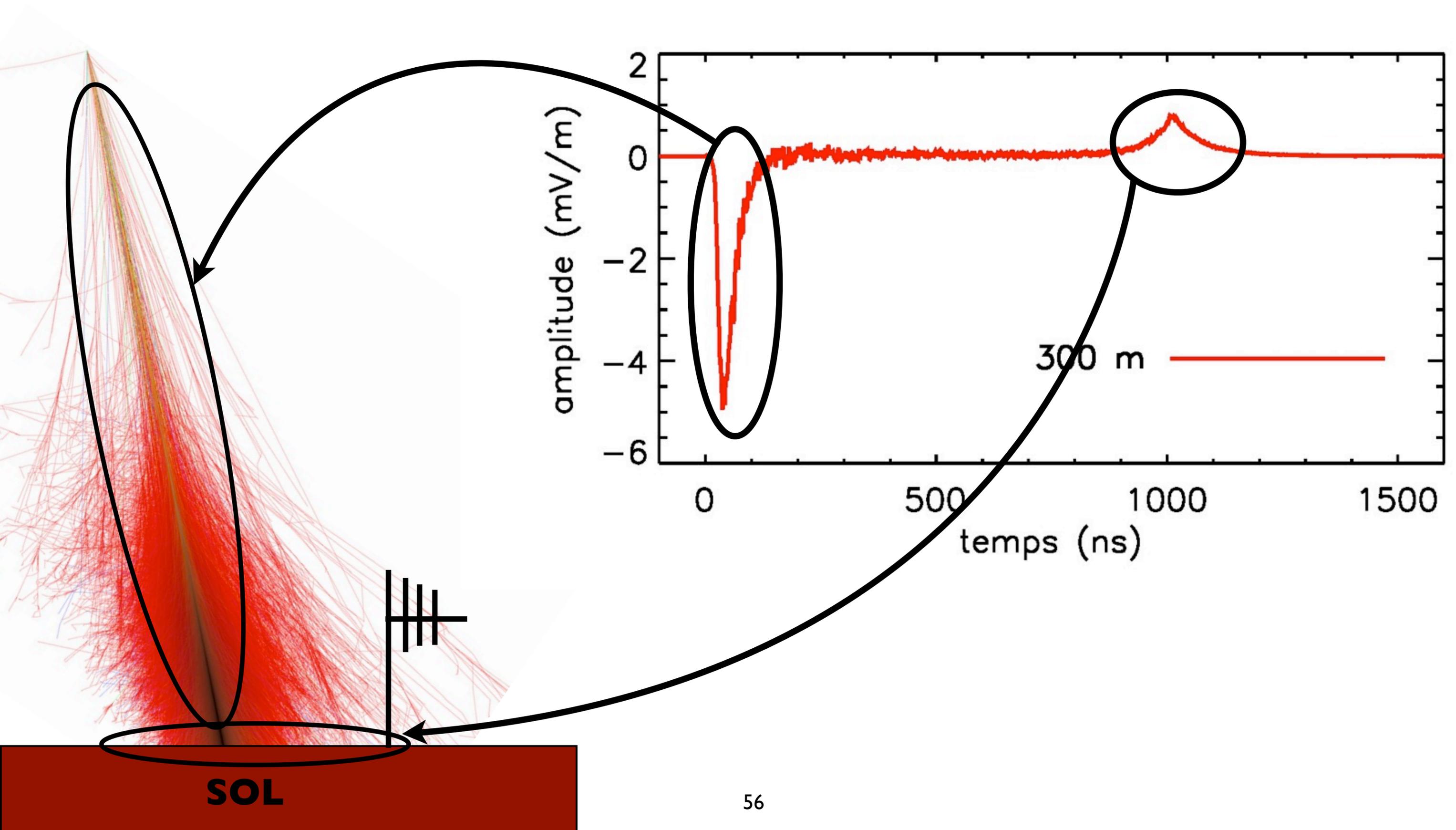
# Mort subite



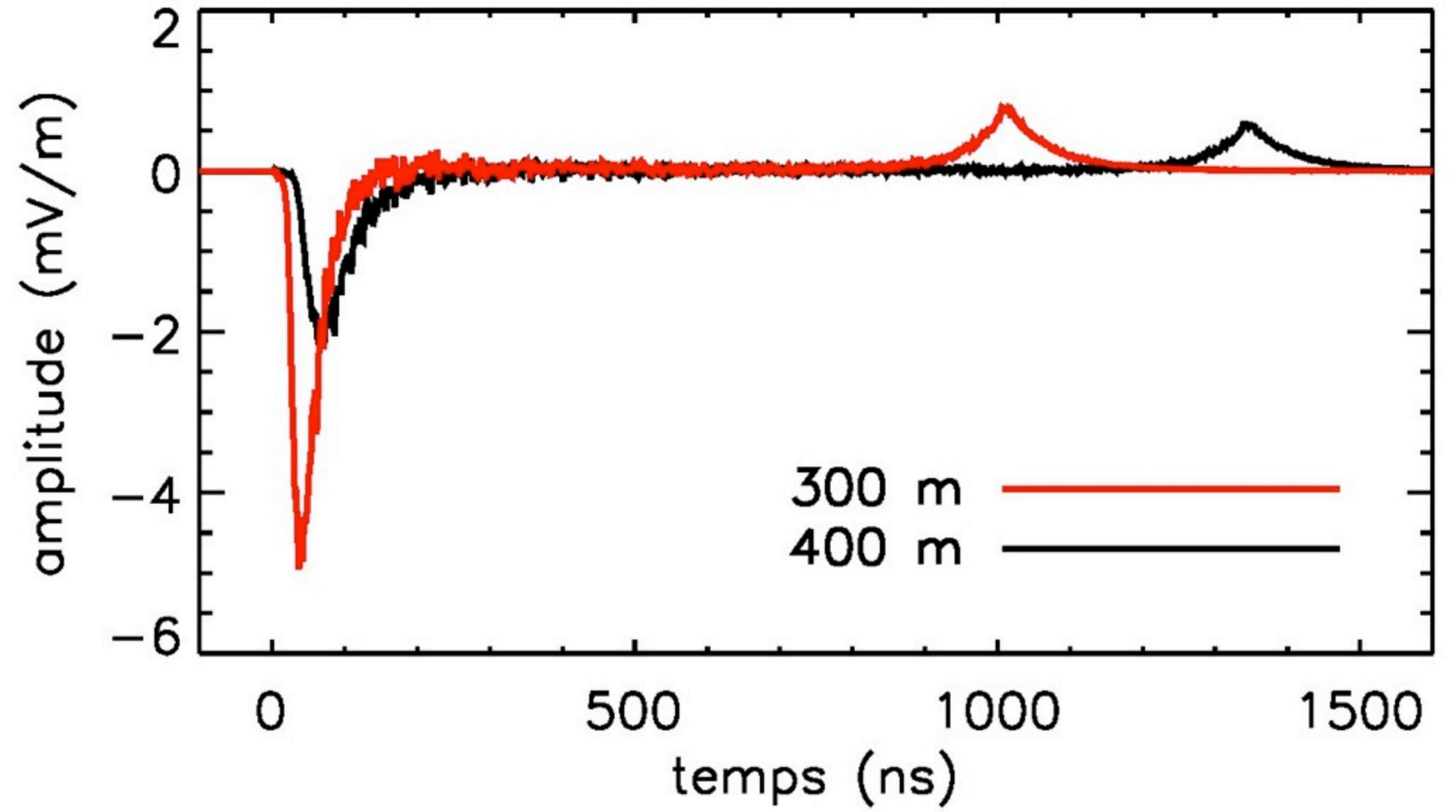
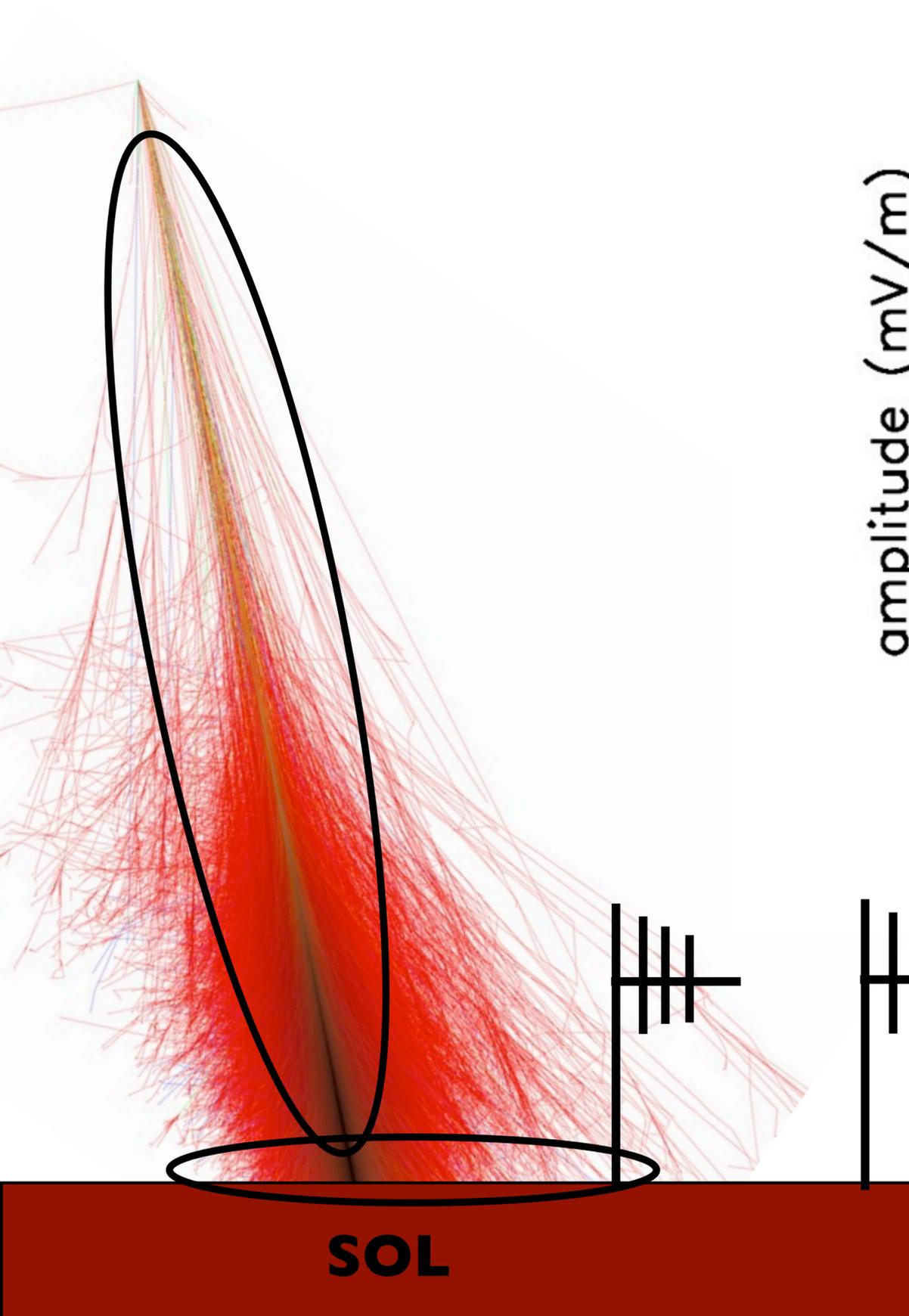
**SOL**



# Mort subite

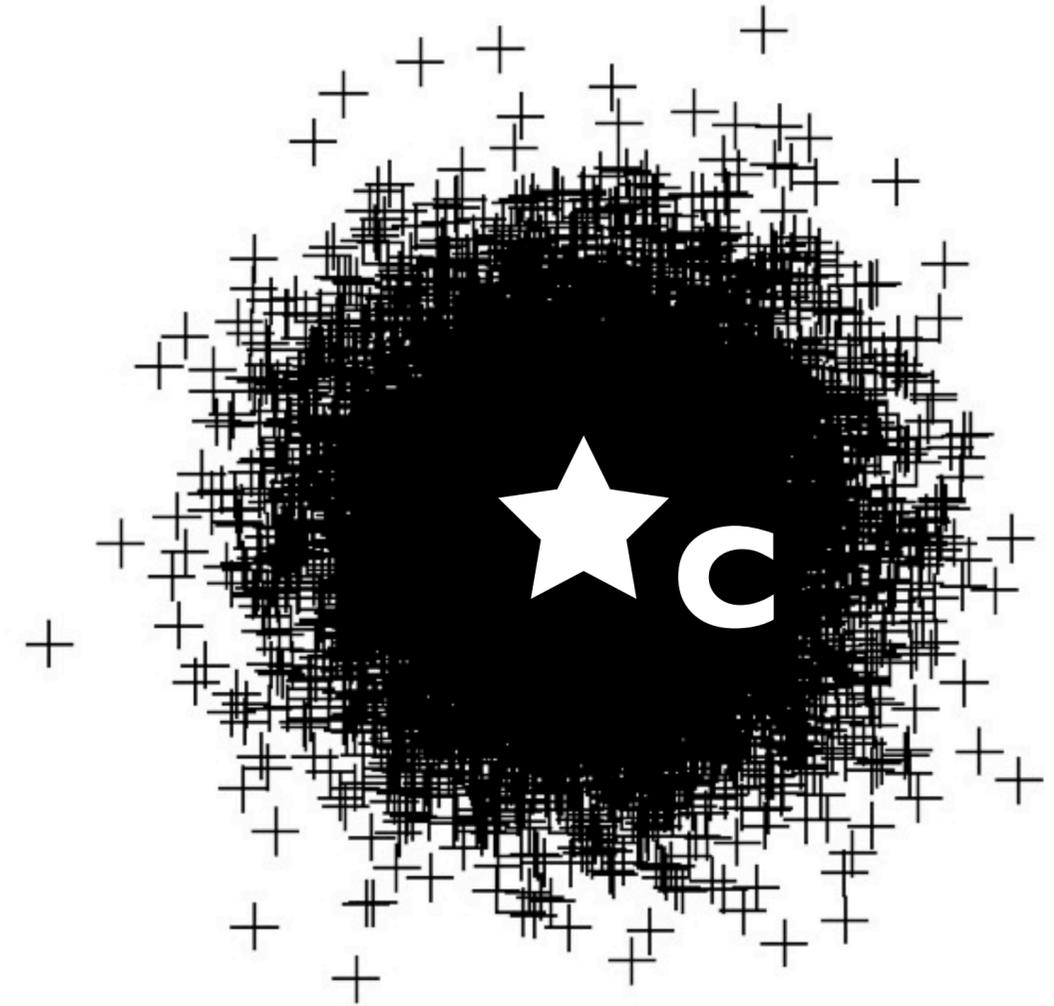
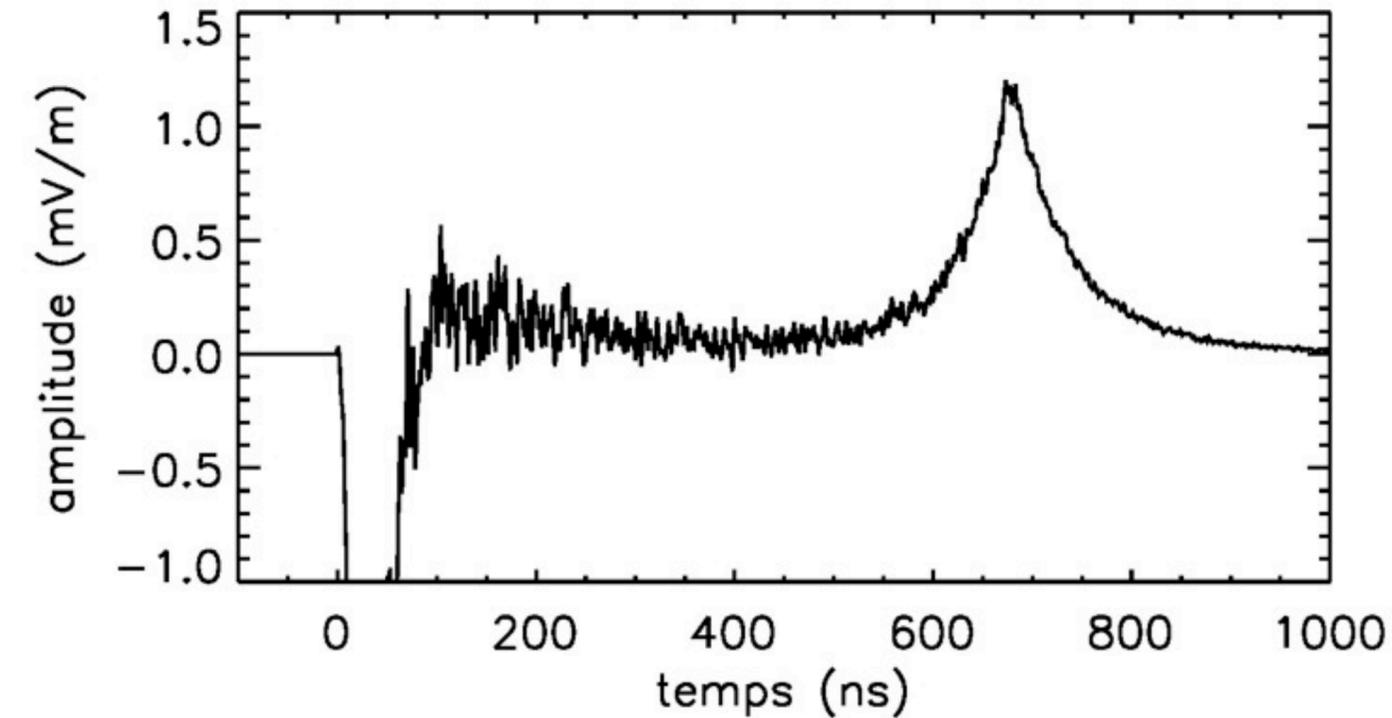


# Mort subite



**SOL**

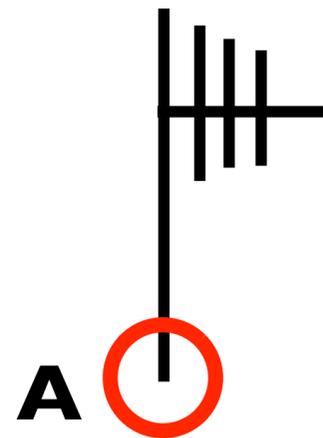
# Mort subite



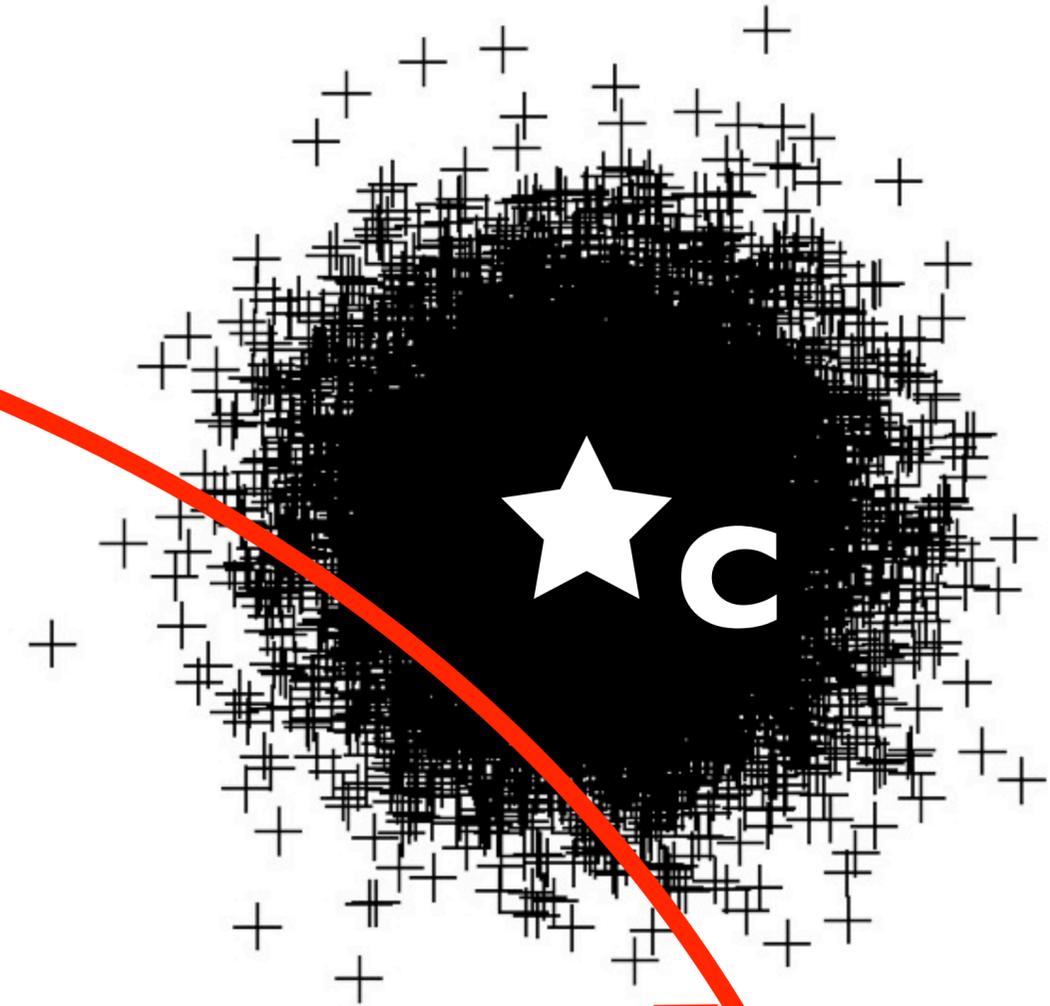
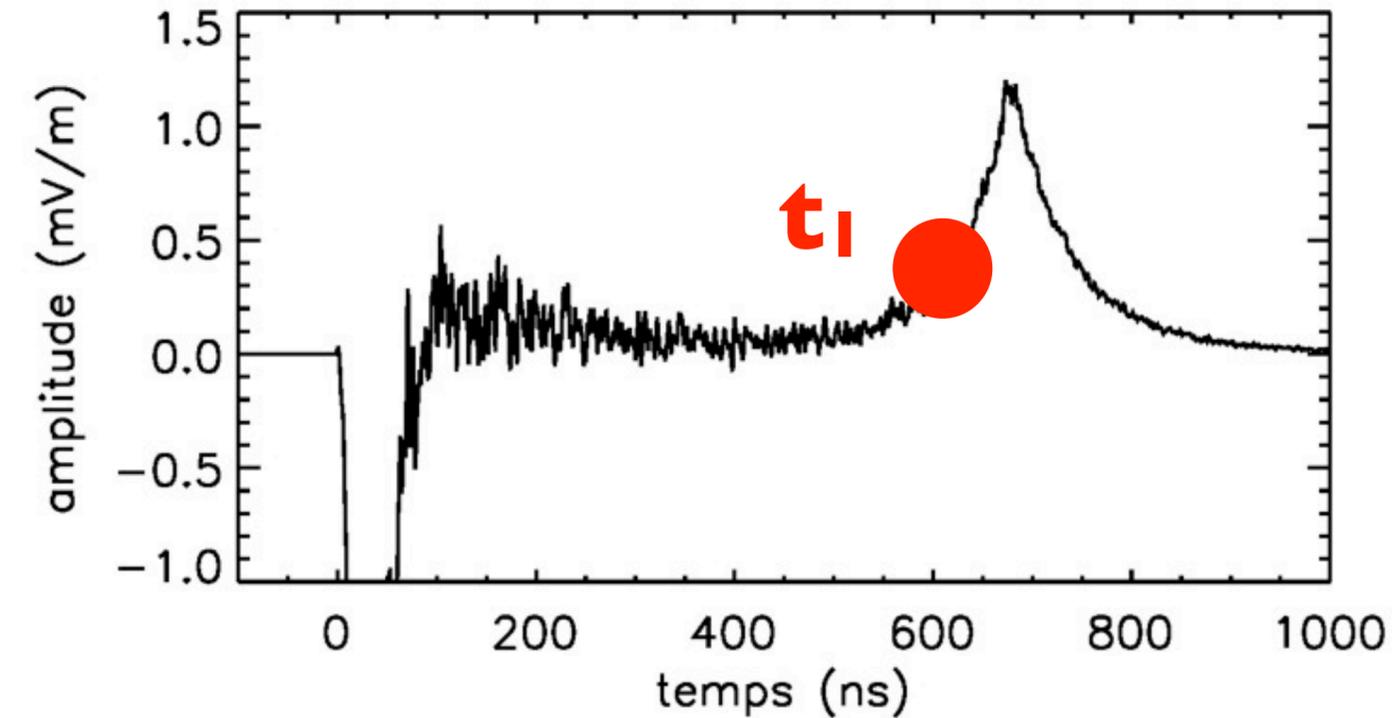
- modèle très simple basé sur la distribution des particules au sol
- fonctionne pour les gerbes verticales et inclinées
- polarisation selon **CA-n**

$$s(t = r/c) \propto \int_0^{2\pi} \mathcal{L}(\rho) d\phi$$

nombre **total** d'e<sup>-</sup> et e<sup>+</sup> !



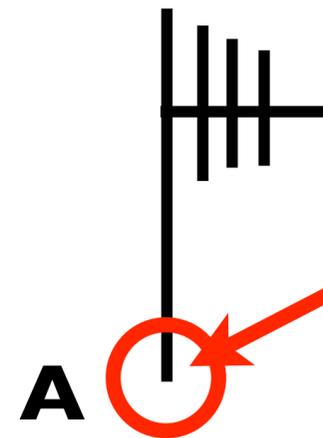
# Mort subite



- modèle très simple basé sur la distribution des particules au sol
- fonctionne pour les gerbes verticales et inclinées
- polarisation selon **CA-n**

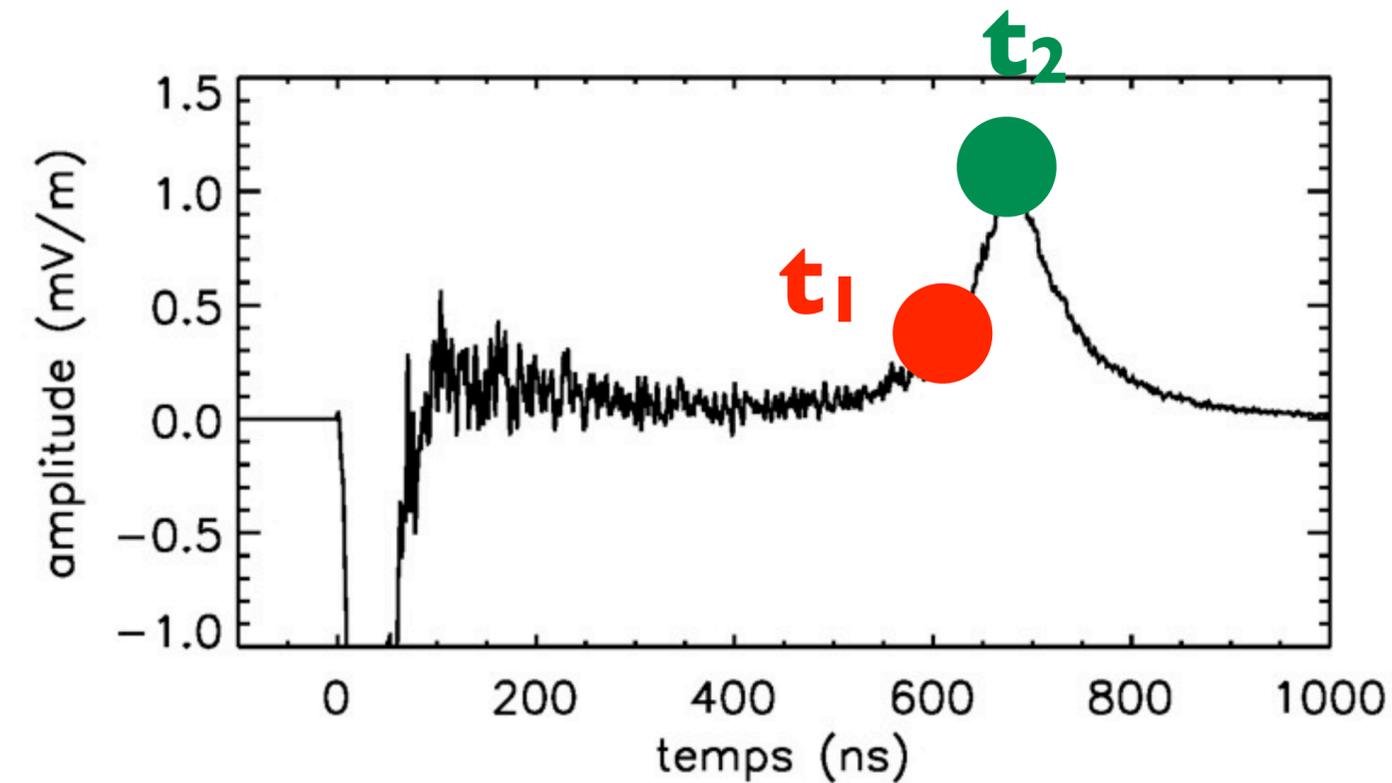
$$s(t = r/c) \propto \int_0^{2\pi} \mathcal{L}(\rho) d\phi$$

nombre **total** d' $e^-$  et  $e^+$  !



$$t_1 = r_1 / c$$

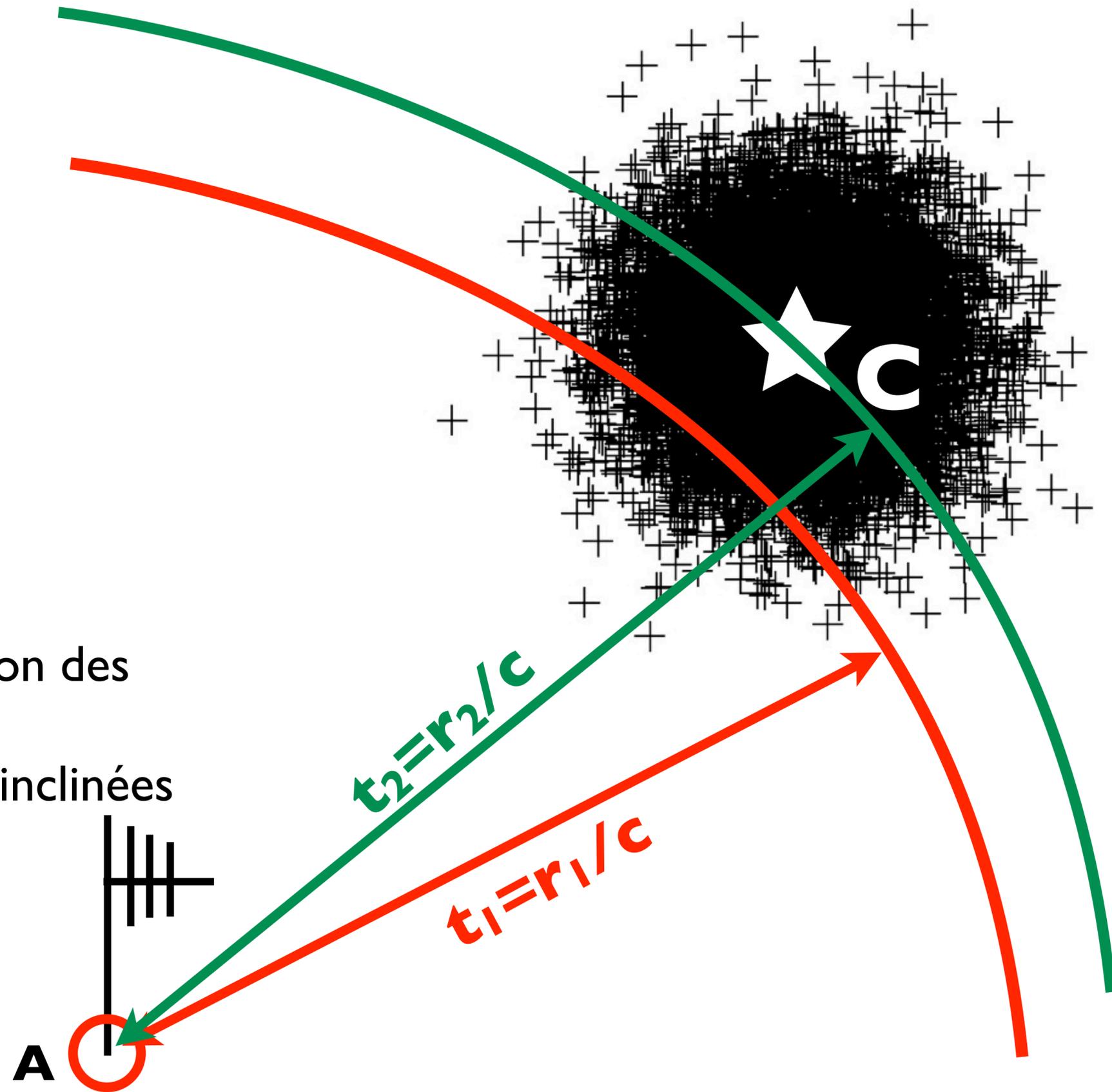
# Mort subite



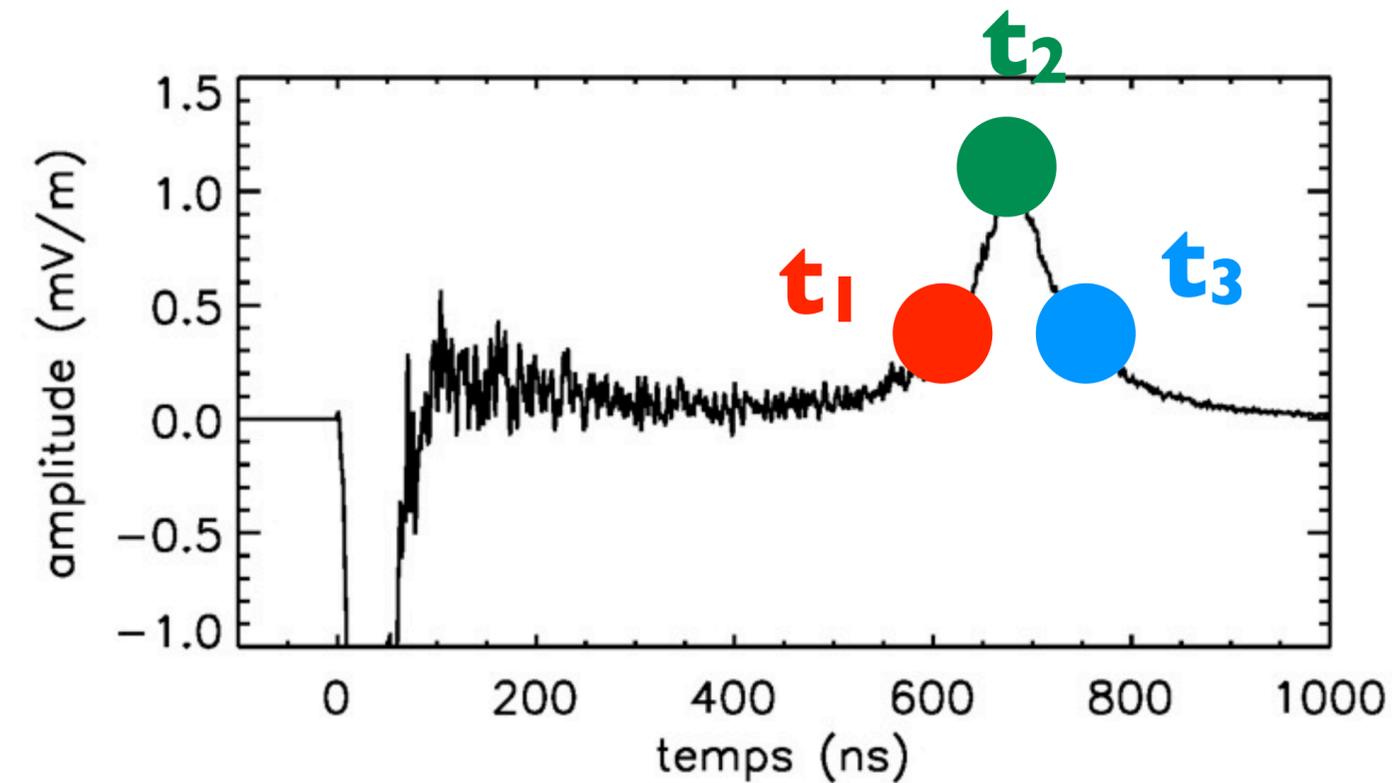
- modèle très simple basé sur la distribution des particules au sol
- fonctionne pour les gerbes verticales et inclinées
- polarisation selon **CA-n**

$$s(t = r/c) \propto \int_0^{2\pi} \mathcal{L}(\rho) d\phi$$

nombre **total** d' $e^-$  et  $e^+$  !



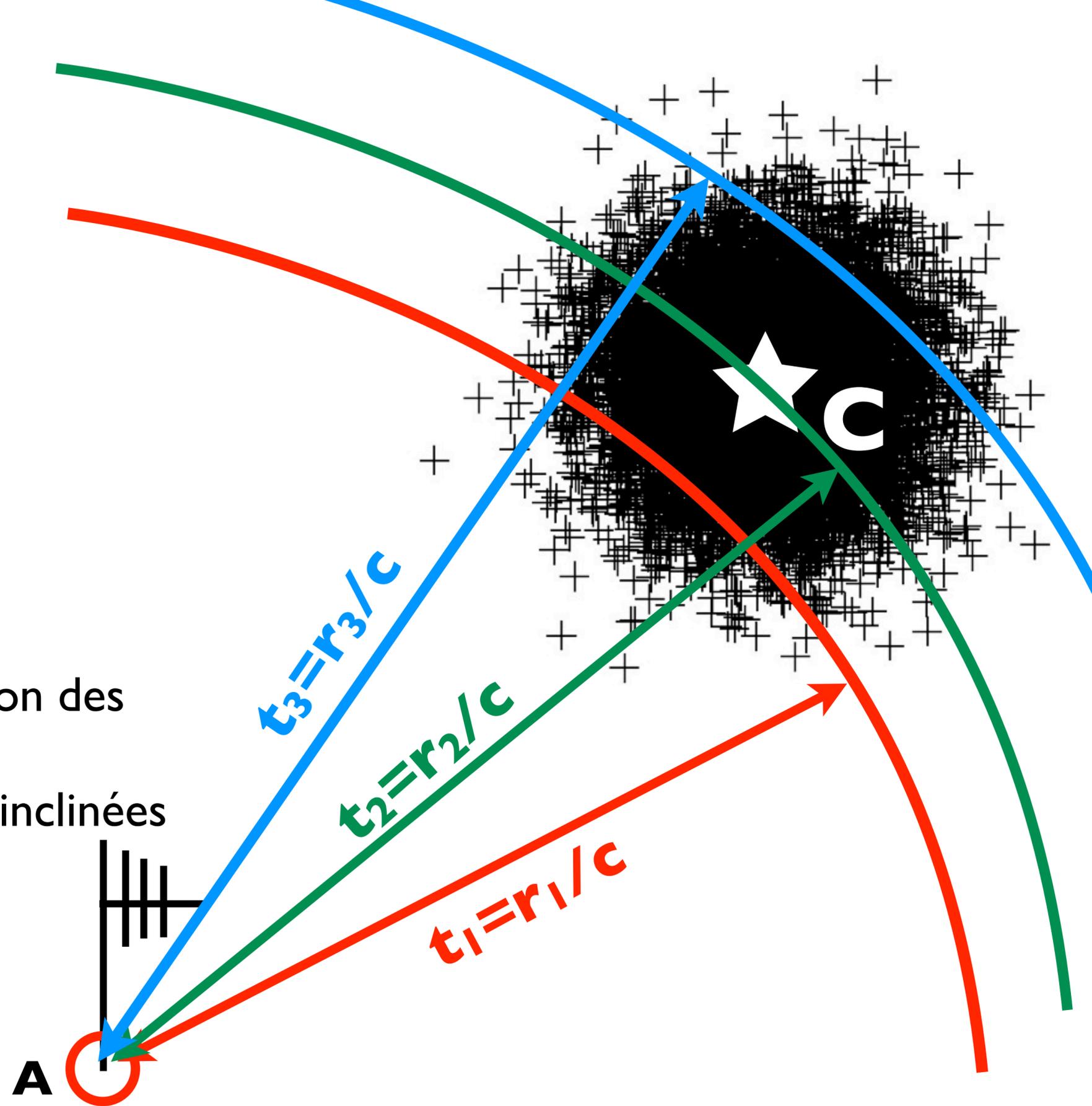
# Mort subite



- modèle très simple basé sur la distribution des particules au sol
- fonctionne pour les gerbes verticales et inclinées
- polarisation selon **CA-n**

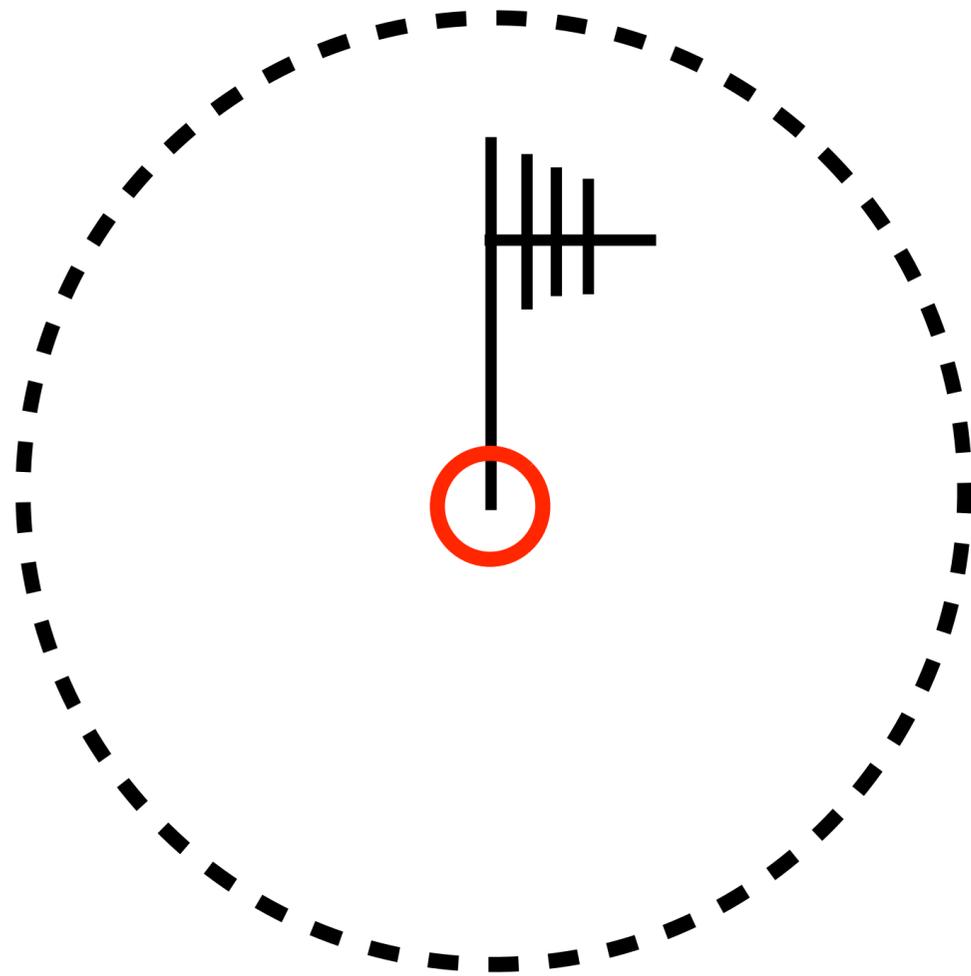
$$s(t = r/c) \propto \int_0^{2\pi} \mathcal{L}(\rho) d\phi$$

nombre **total** d' $e^-$  et  $e^+$  !



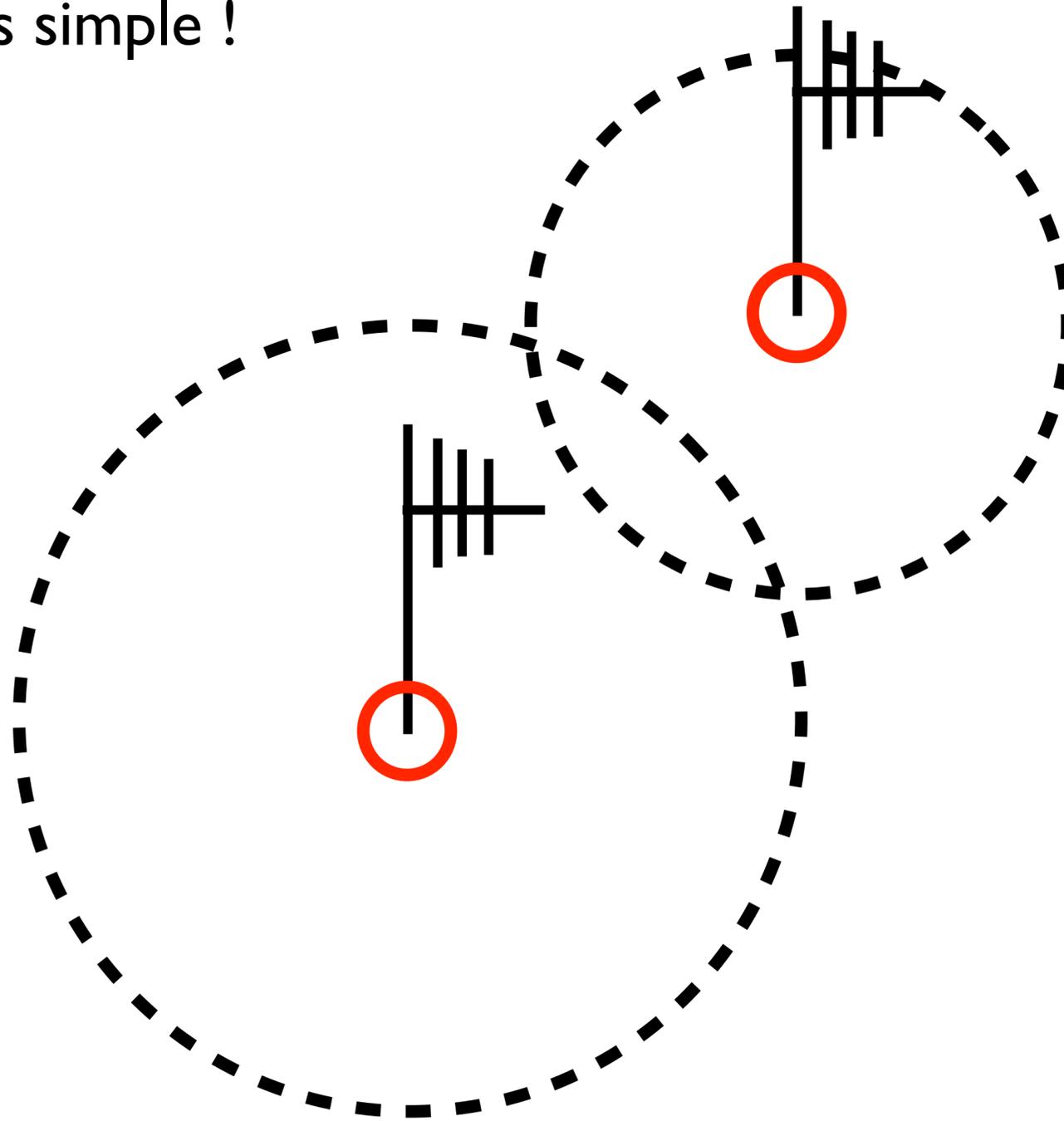
# Mort subite

Reconstruction du  
cœur très simple !



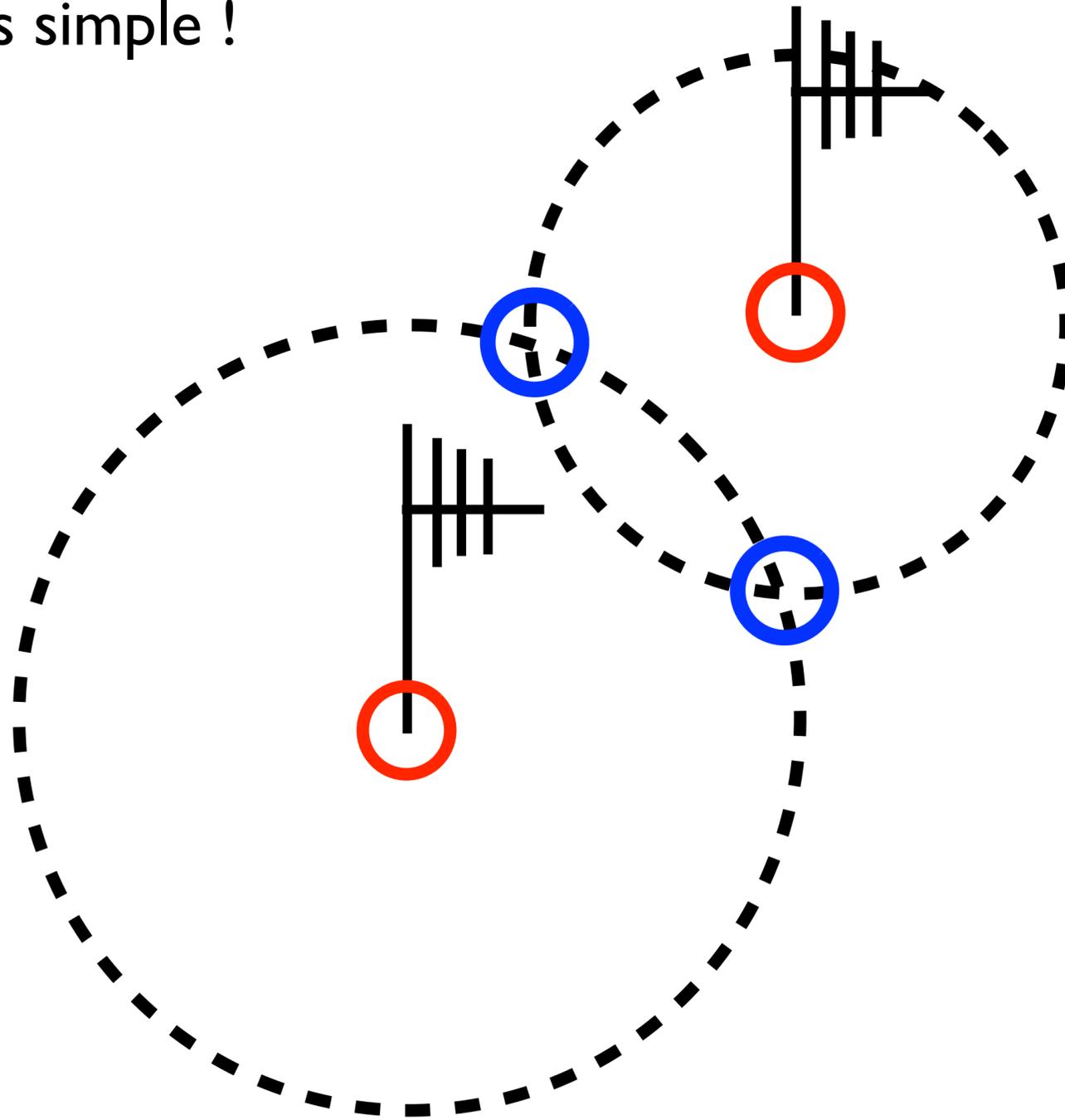
# Mort subite

Reconstruction du cœur très simple !



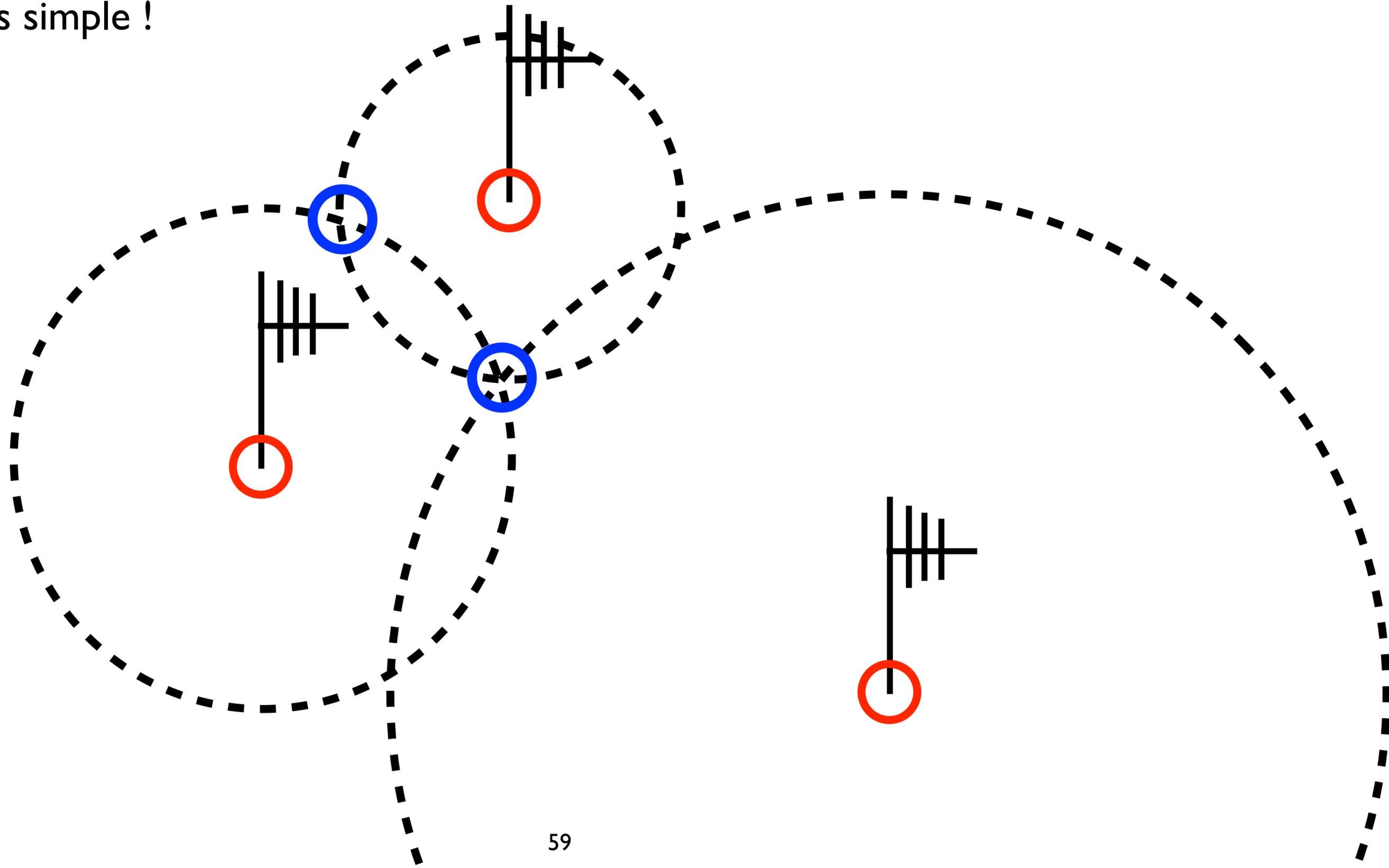
# Mort subite

Reconstruction du cœur très simple !



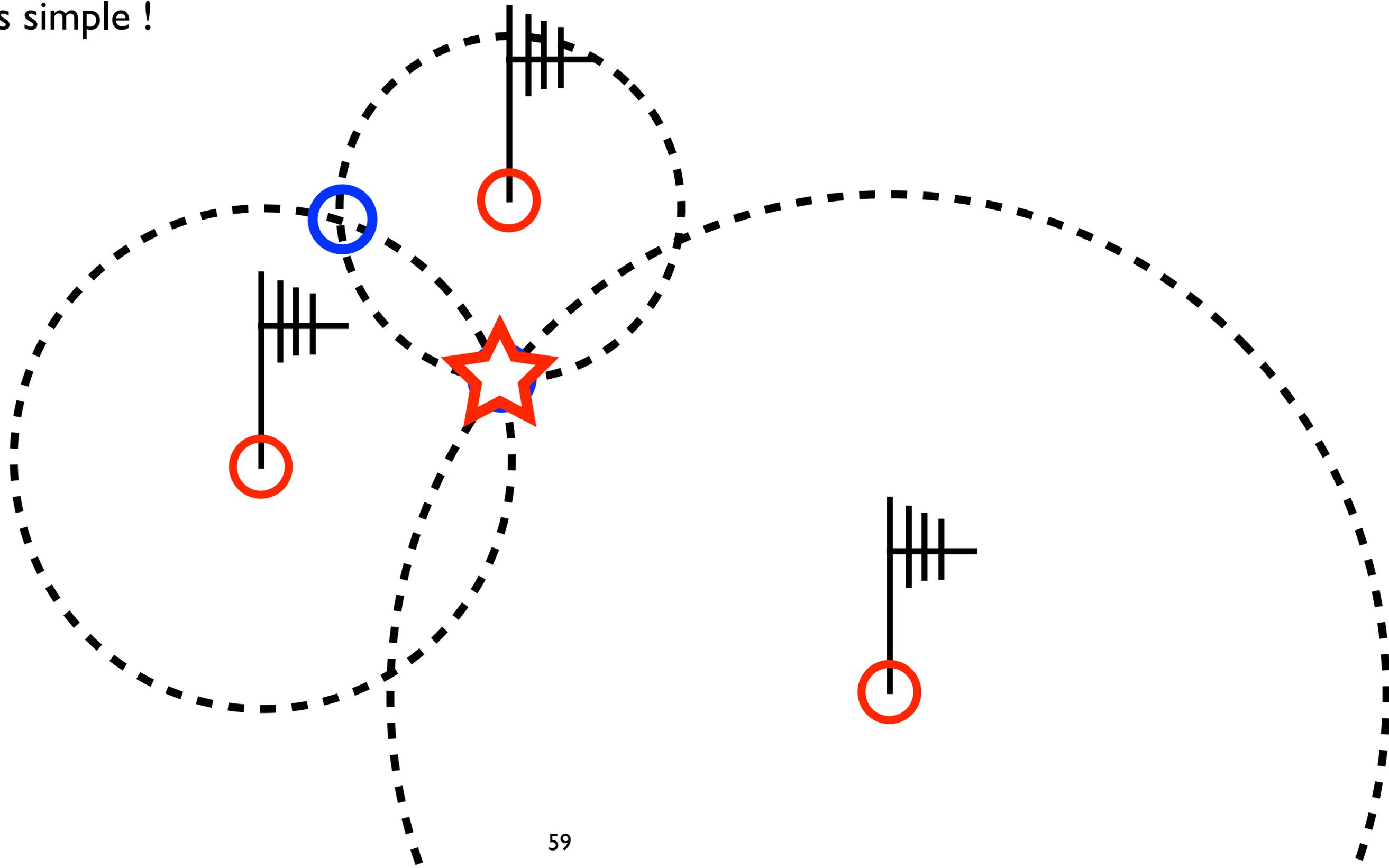
# Mort subite

Reconstruction du cœur très simple !

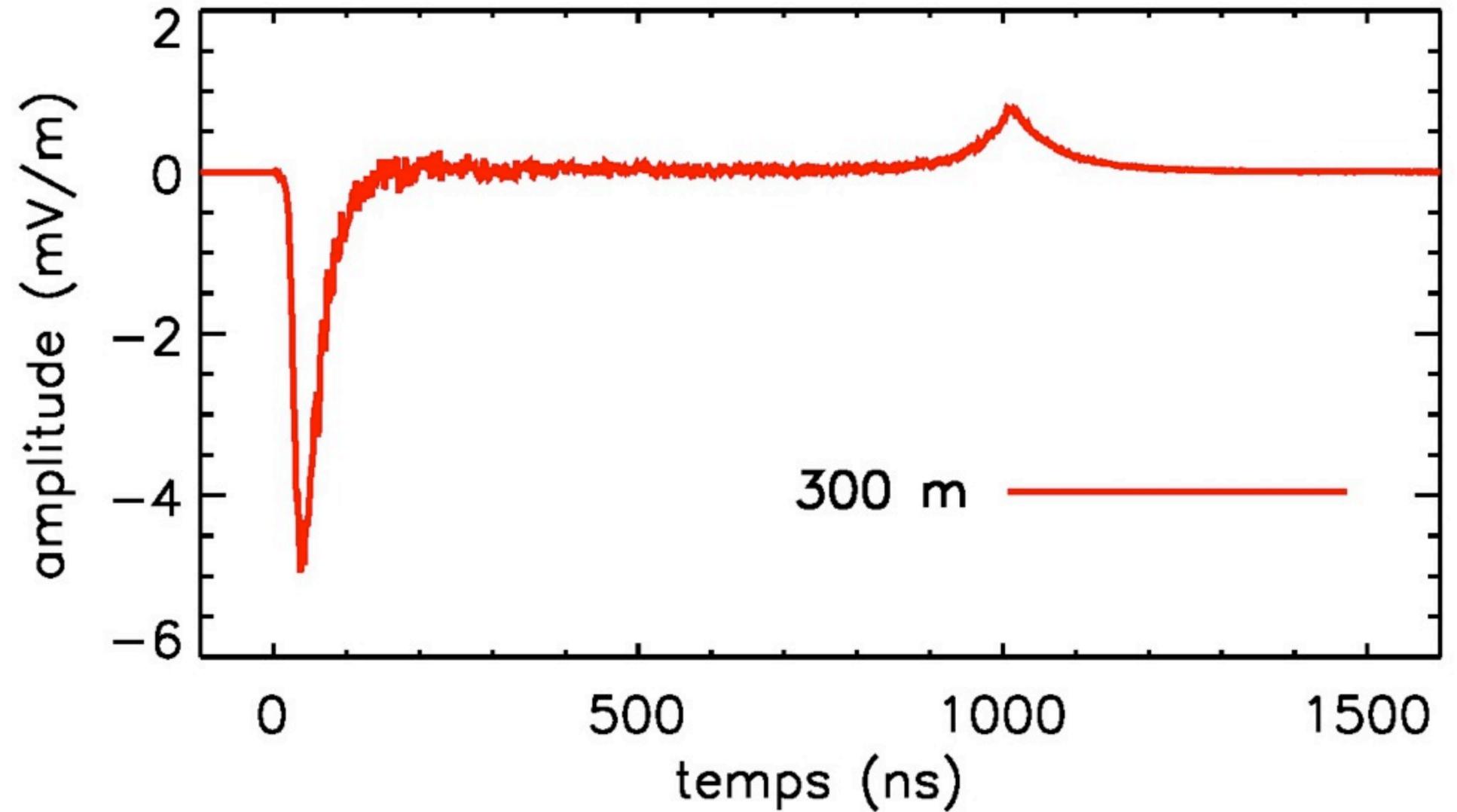
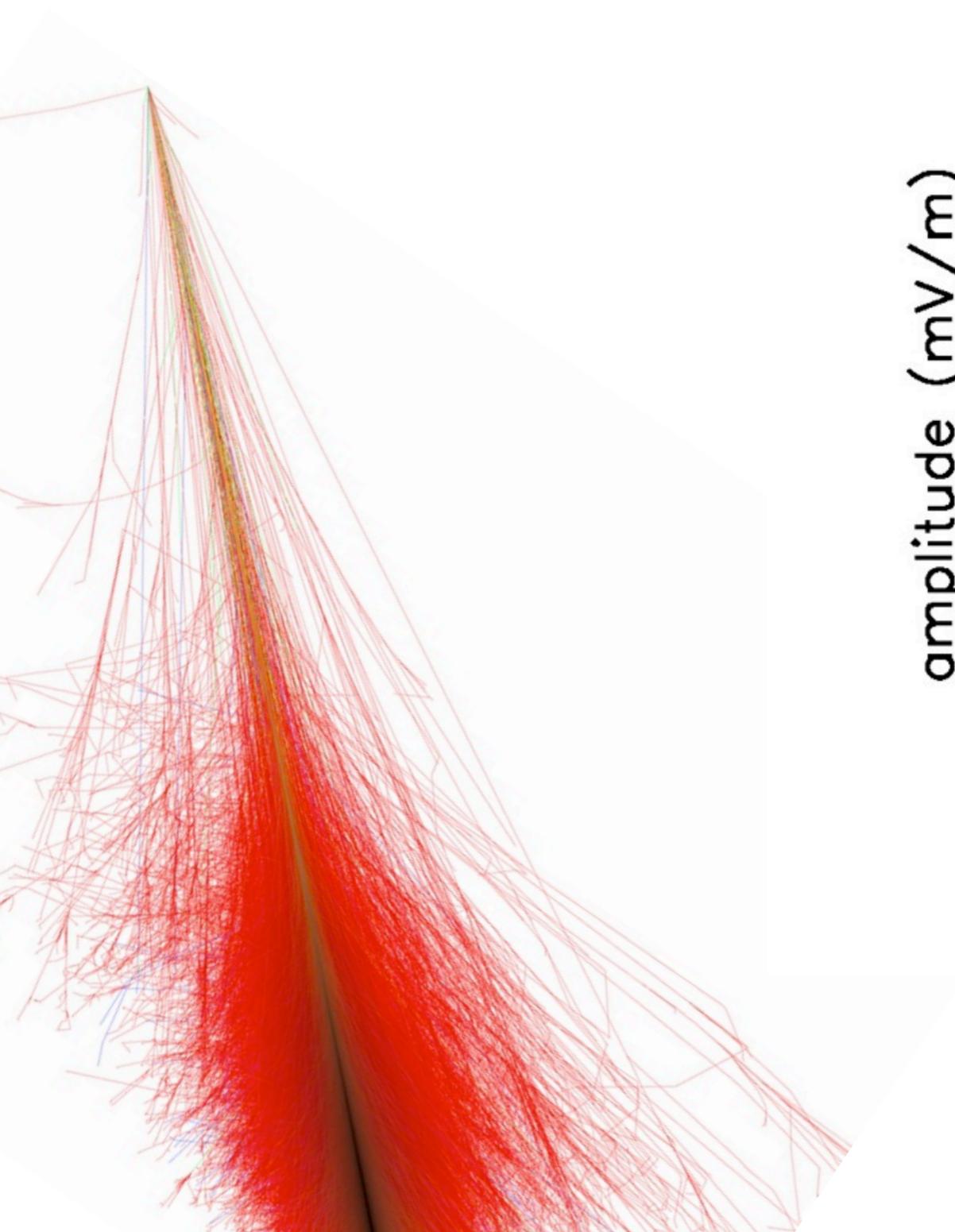


# Mort subite

Reconstruction du cœur très simple !

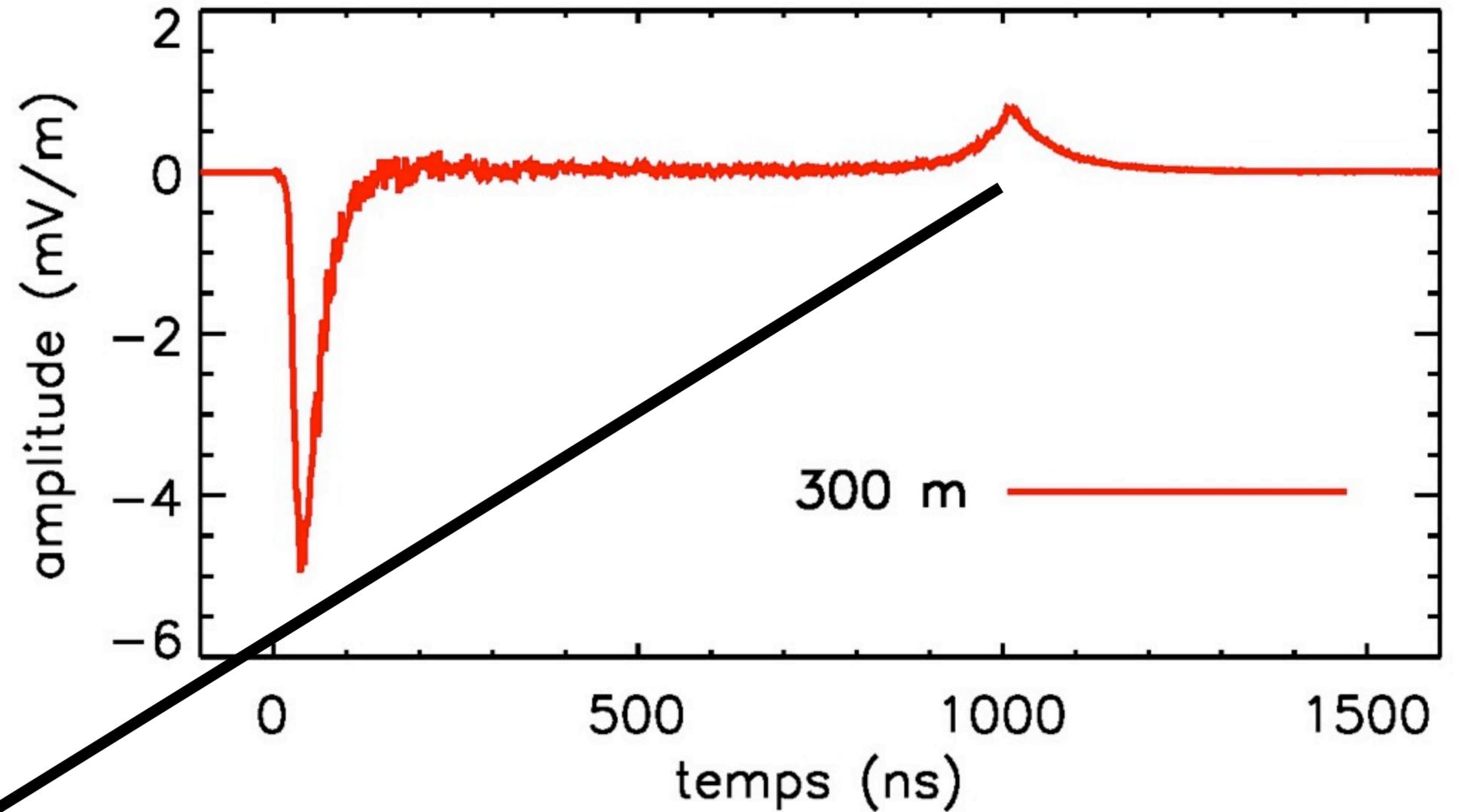
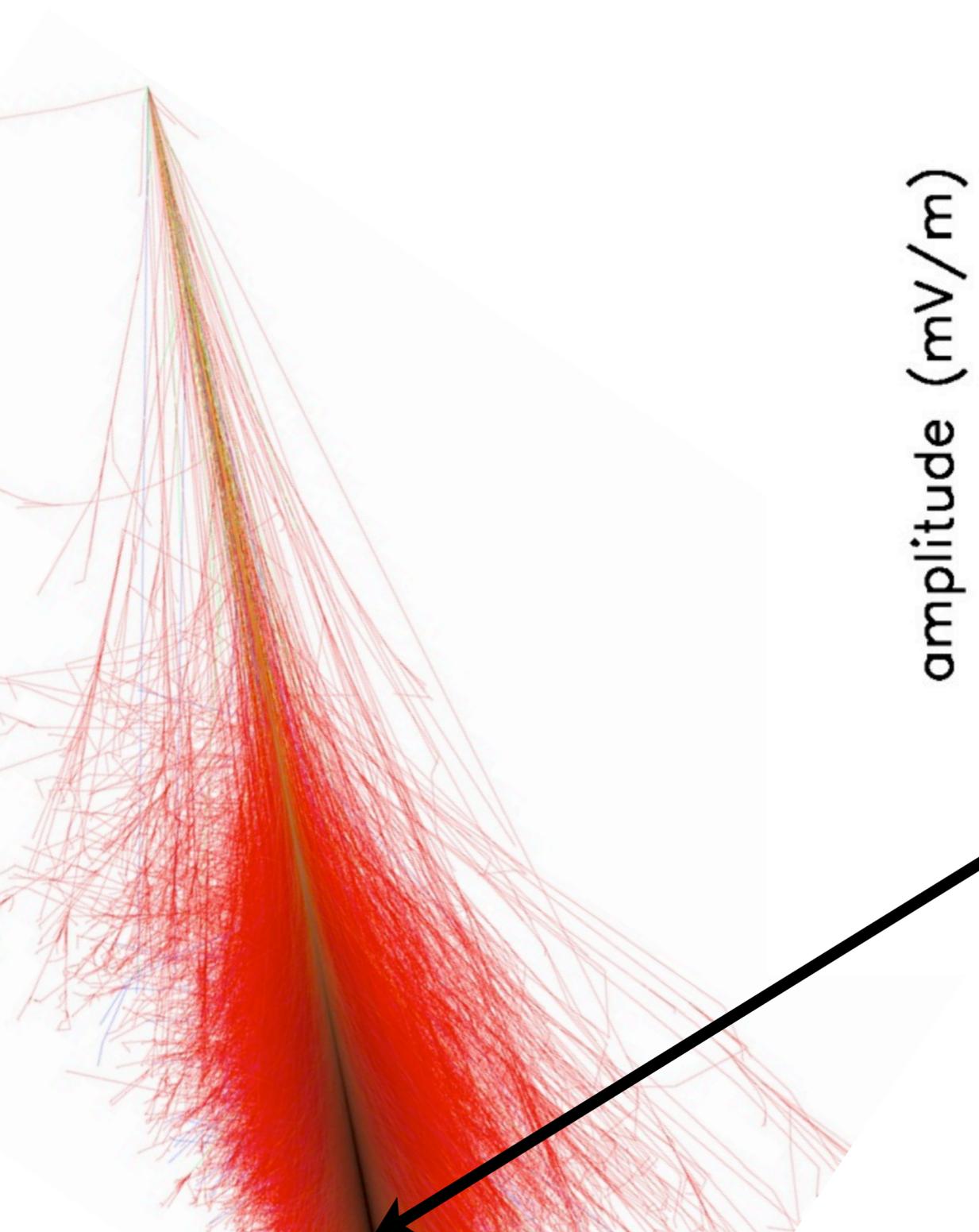


# Mort subite : datation absolue !



correspondance bijective entre le temps dans l'antenne  
et le déroulement de la gerbe

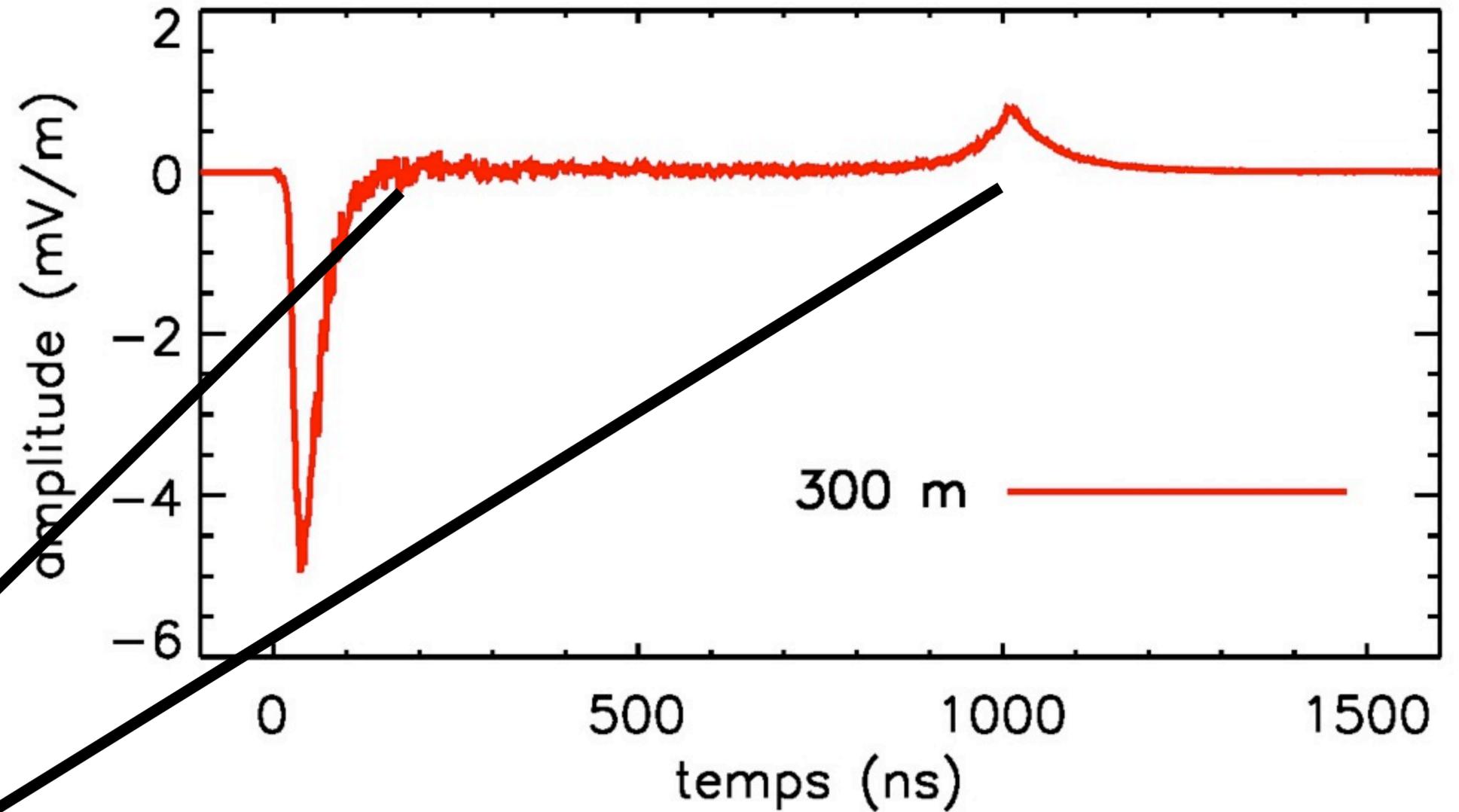
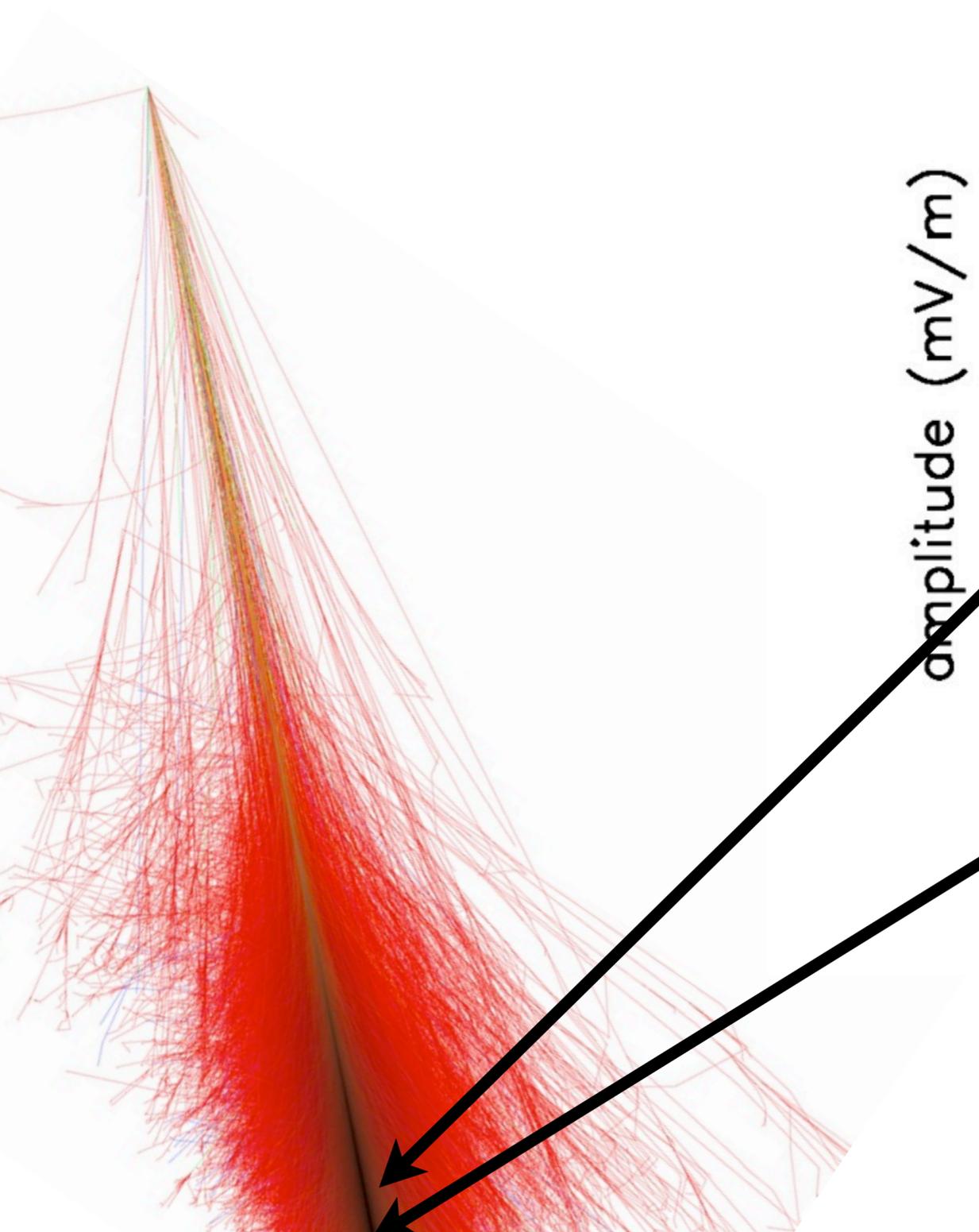
# Mort subite : datation absolue !



correspondance bijective entre le temps dans l'antenne  
et le déroulement de la gerbe

**SOL**

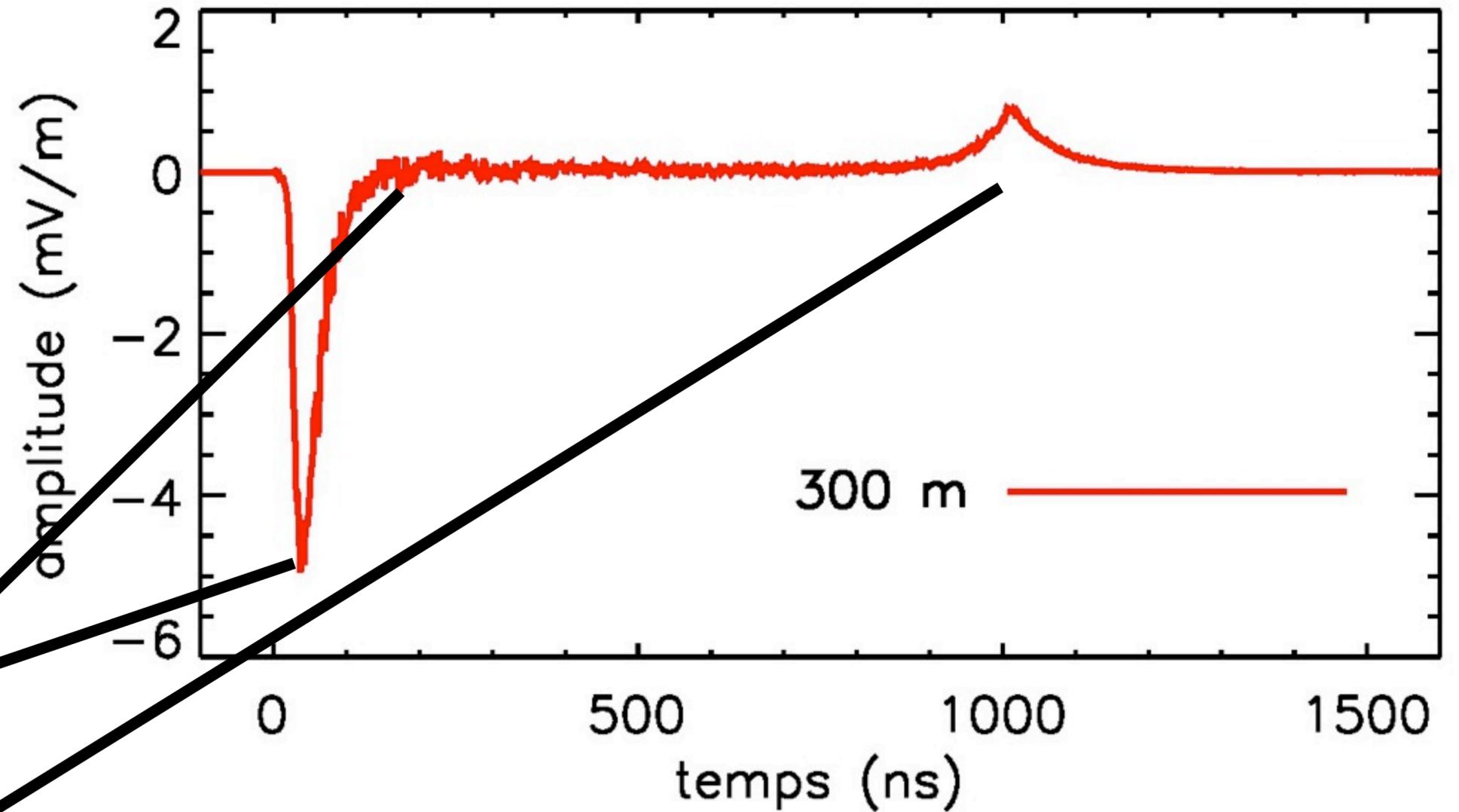
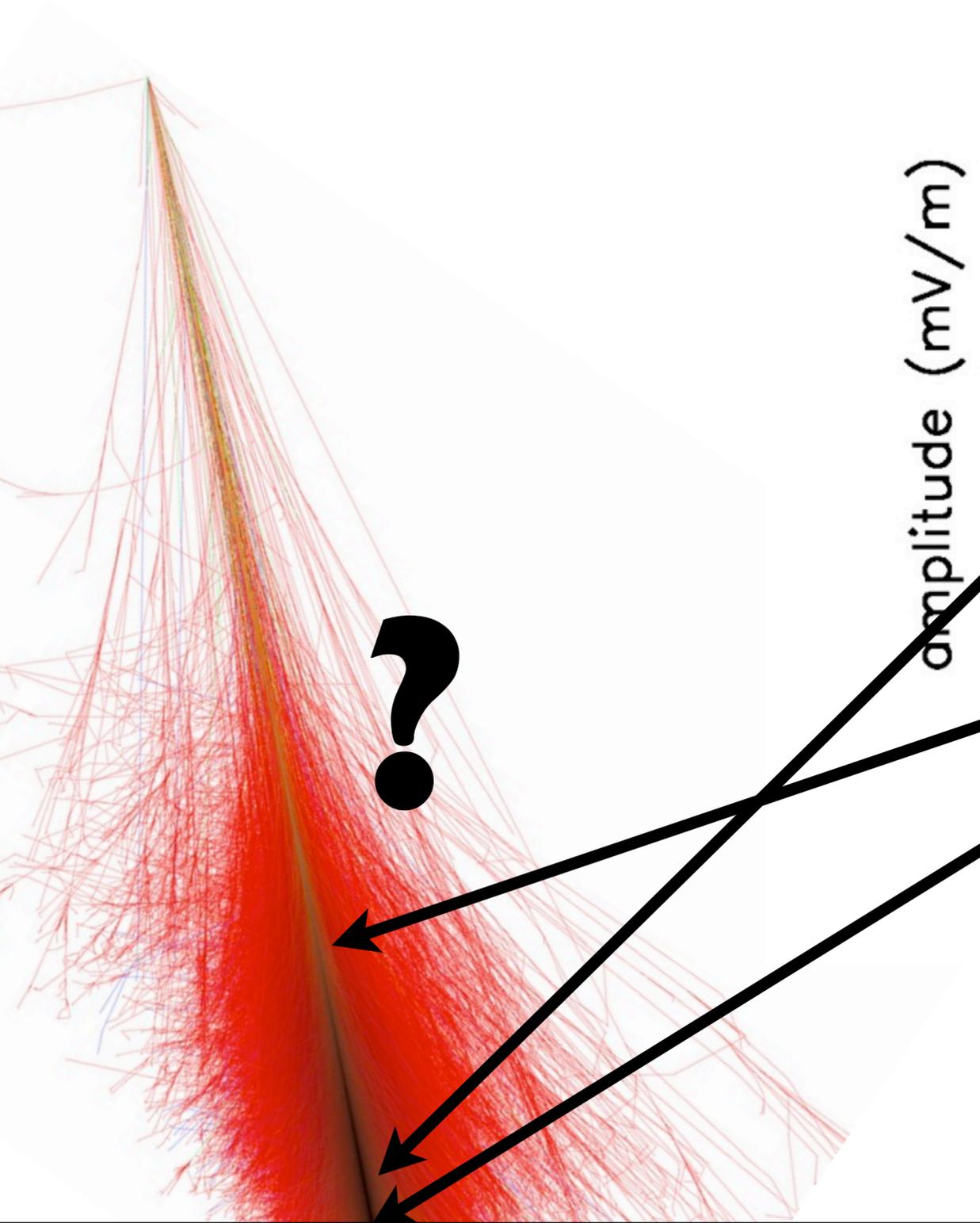
# Mort subite : datation absolue !



correspondance bijective entre le temps dans l'antenne  
et le déroulement de la gerbe

**SOL**

# Mort subite : datation absolue !

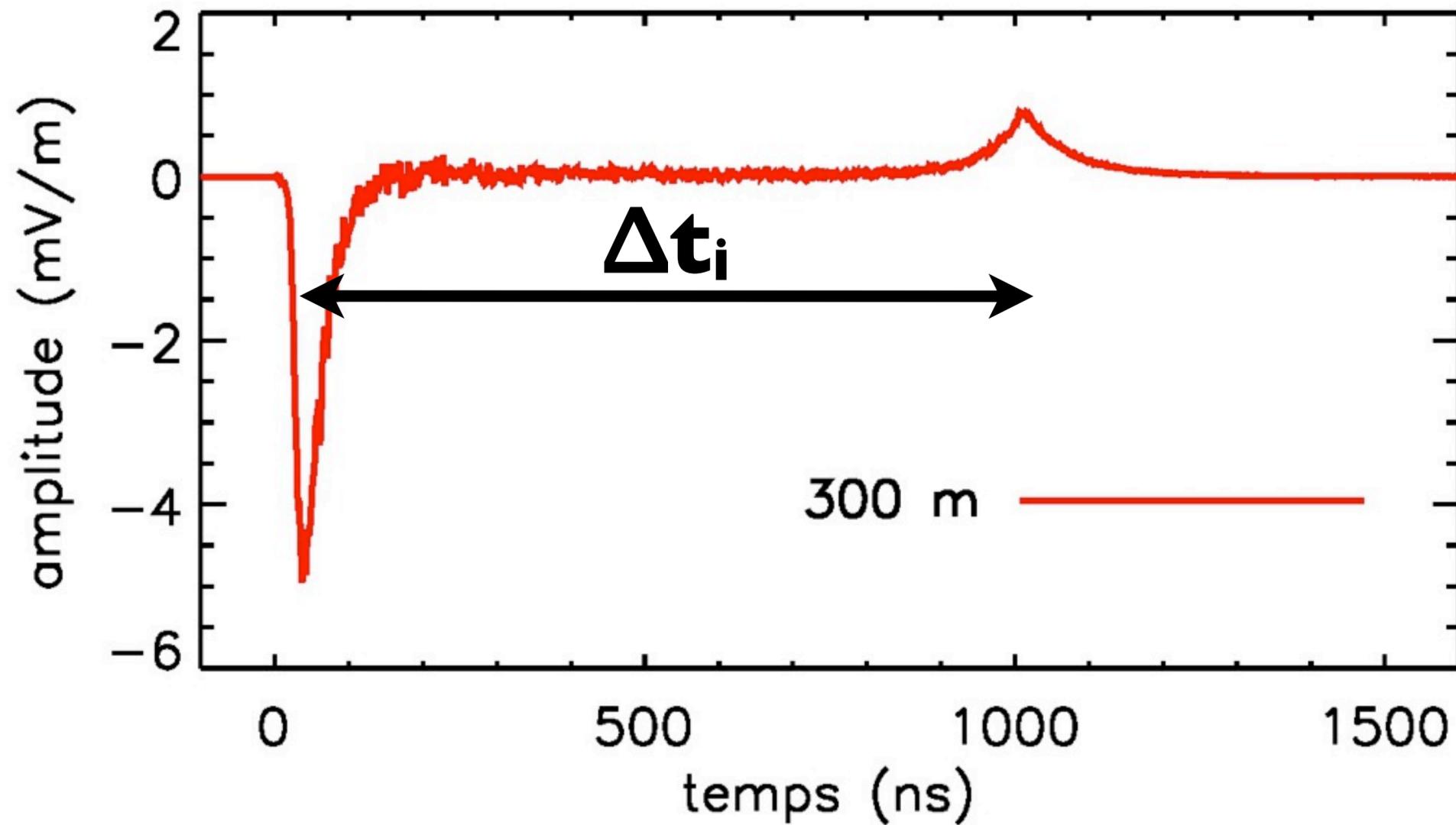


correspondance bijective entre le temps dans l'antenne  
et le déroulement de la gerbe

**SOL**

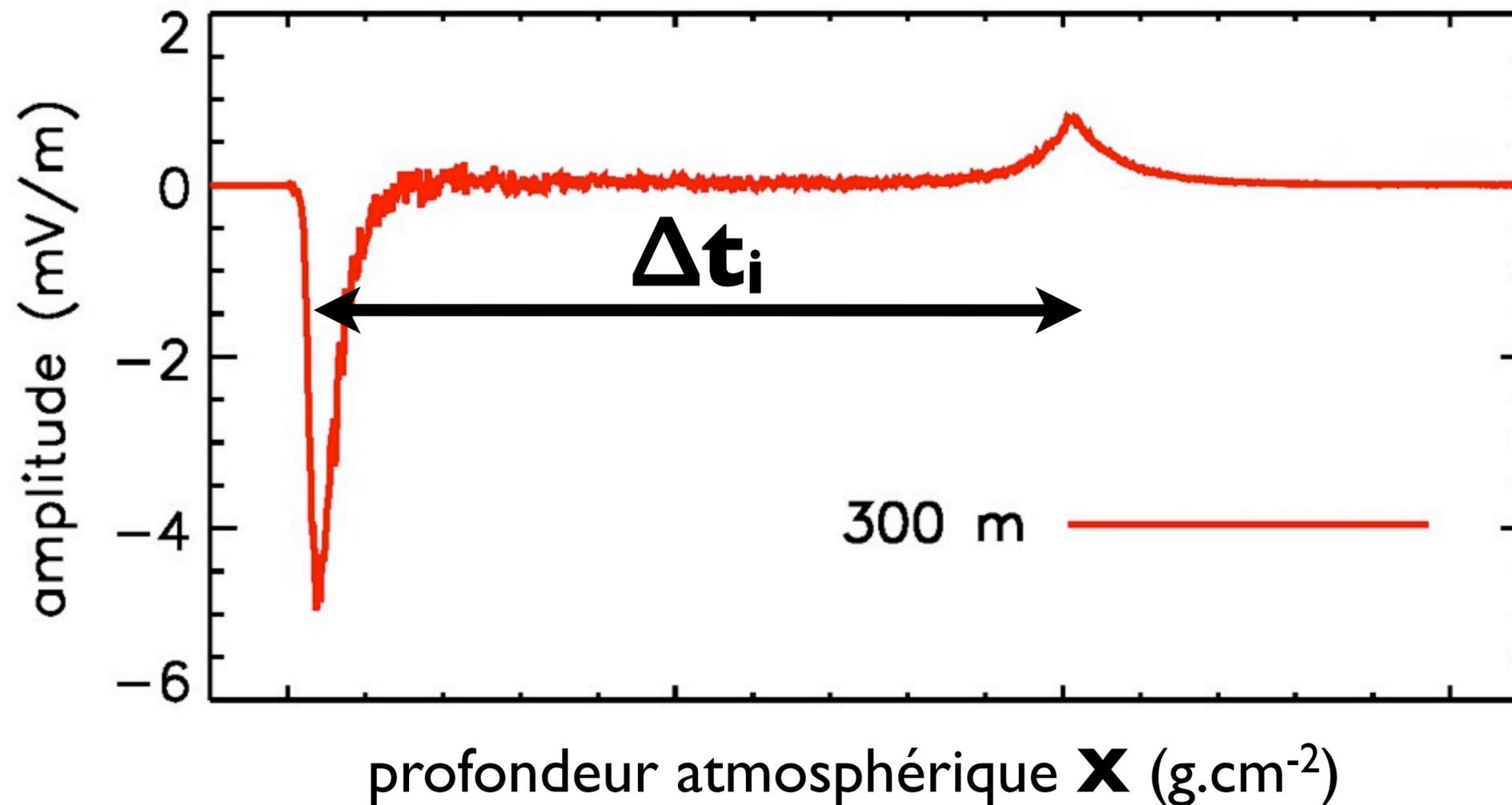
# Mort subite

$$\ell(t_i) = \frac{c^2 \Delta t_i^2 - 2c \Delta t_i \|\mathbf{CA}\|}{2(c \Delta t_i - \|\mathbf{CA}\| - \mathbf{CA} \cdot \mathbf{n})}, \text{ avec } \Delta t_i = t_{\text{SDP}}^{\text{max}} - t_i \text{ et } \mathbf{n} = (\sin \theta \cos \phi, \sin \theta \sin \phi, \cos \theta).$$



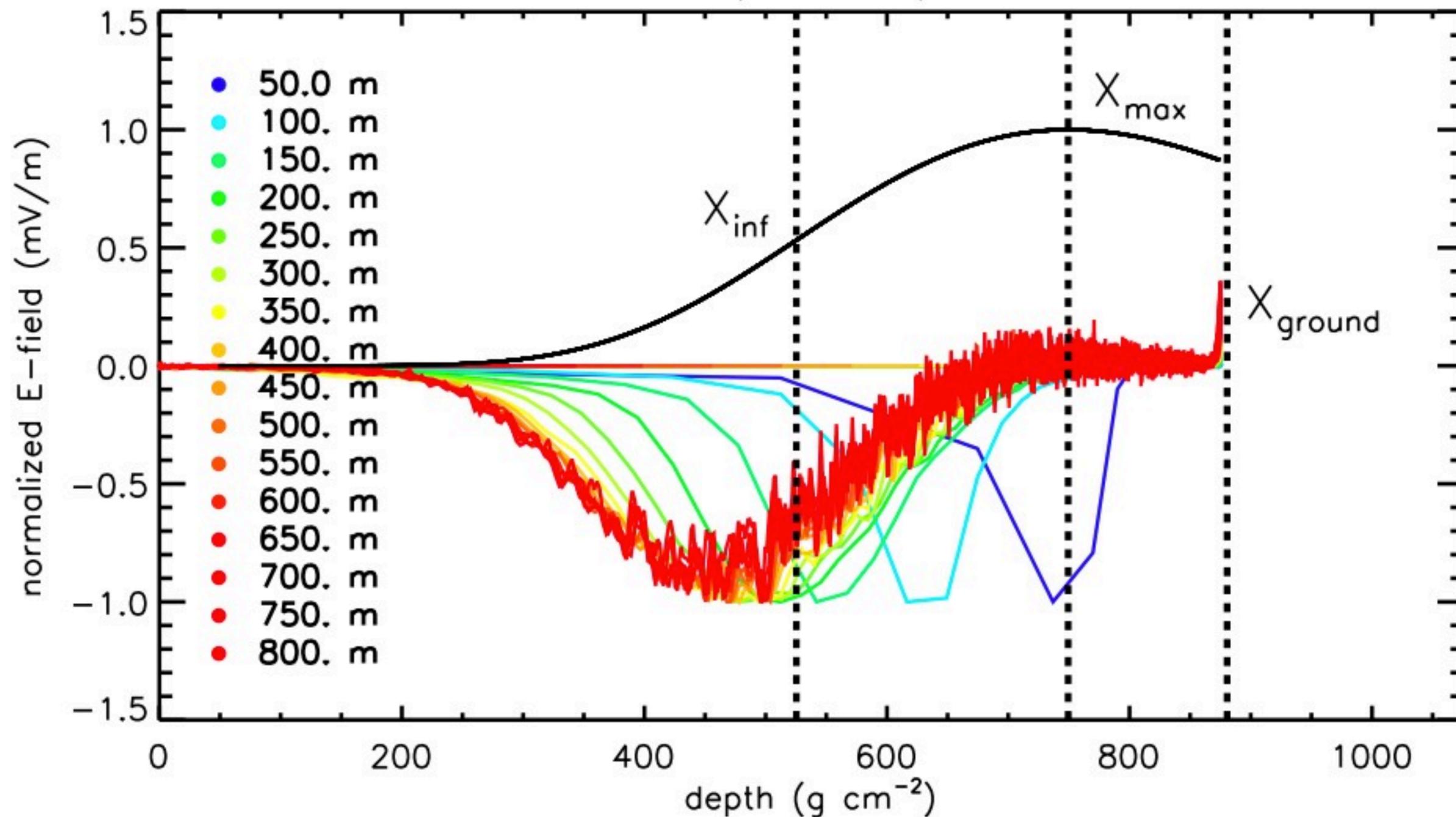
# Mort subite

$$\ell(t_i) = \frac{c^2 \Delta t_i^2 - 2c \Delta t_i \|\mathbf{CA}\|}{2(c \Delta t_i - \|\mathbf{CA}\| - \mathbf{CA} \cdot \mathbf{n})}, \text{ avec } \Delta t_i = t_{\text{SDP}}^{\text{max}} - t_i \text{ et } \mathbf{n} = (\sin \theta \cos \phi, \sin \theta \sin \phi, \cos \theta).$$



# Mort subite

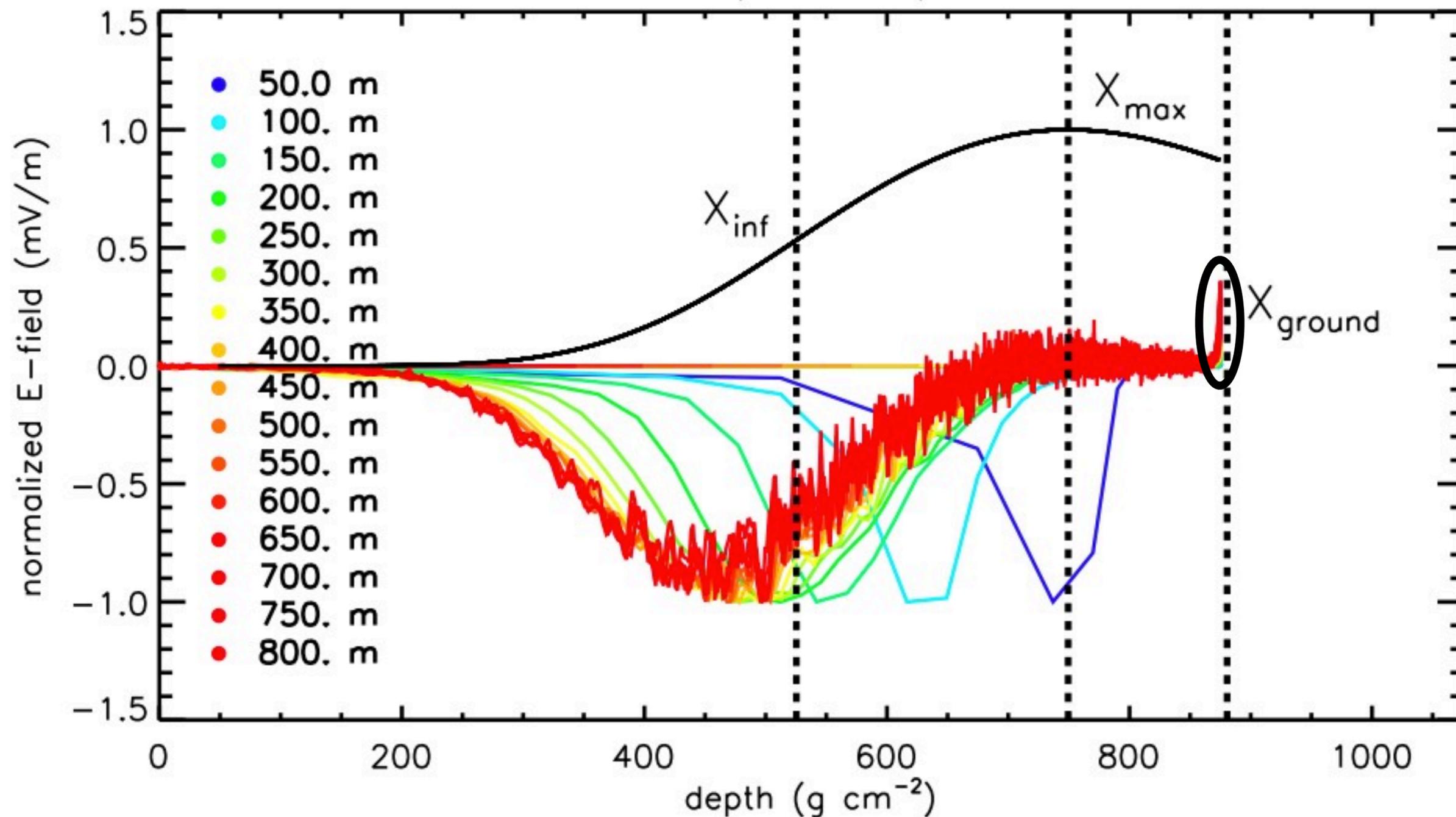
1 EeV, vertical, EW



**Indication que le moment du maximum de production de champ électrique dans la gerbe ne serait PAS le  $X_{\max}$ , comme habituellement supposé**

# Mort subite

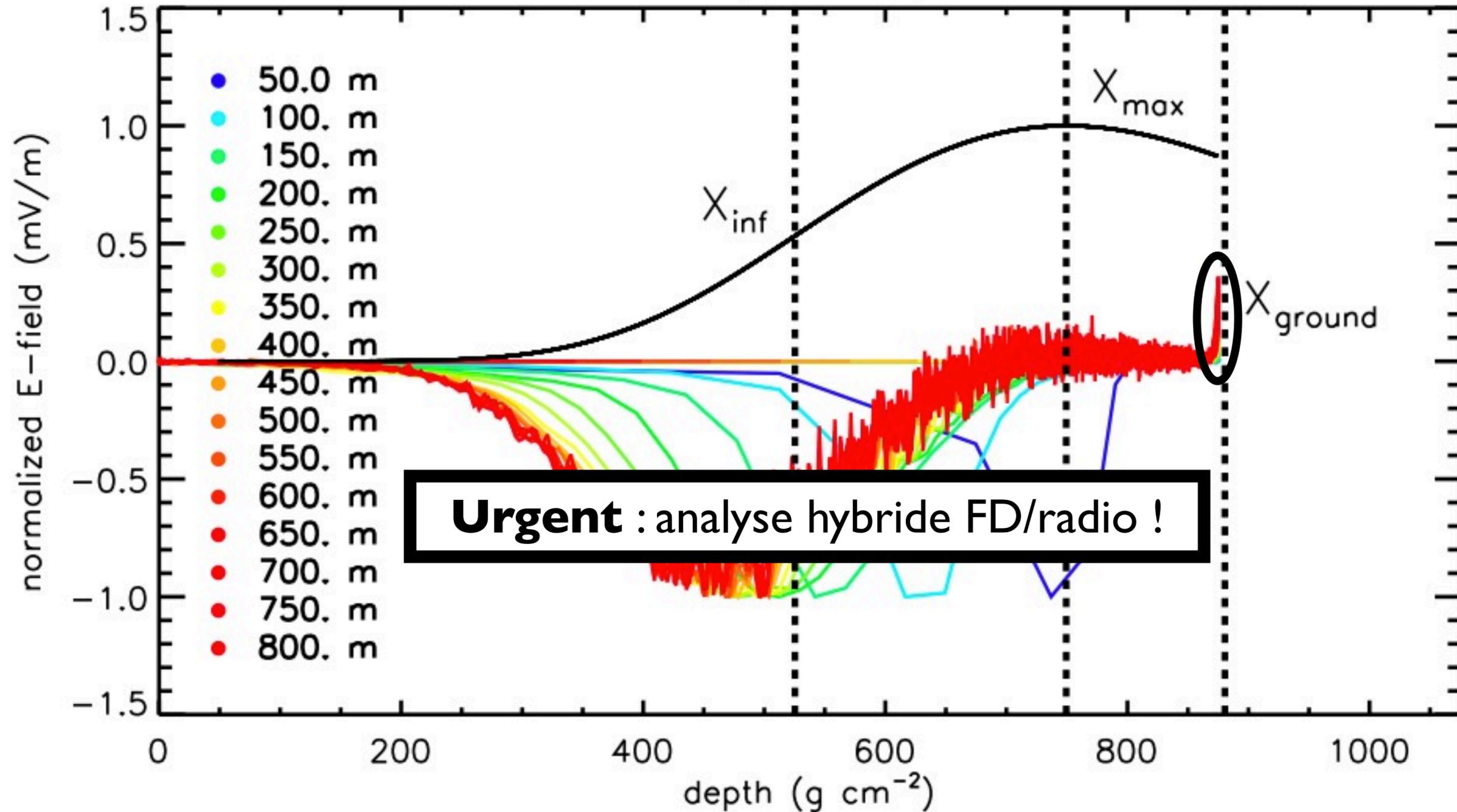
1 EeV, vertical, EW



**Indication que le moment du maximum de production de champ électrique dans la gerbe ne serait PAS le  $X_{\max}$ , comme habituellement supposé**

# Mort subite

1 EeV, vertical, EW

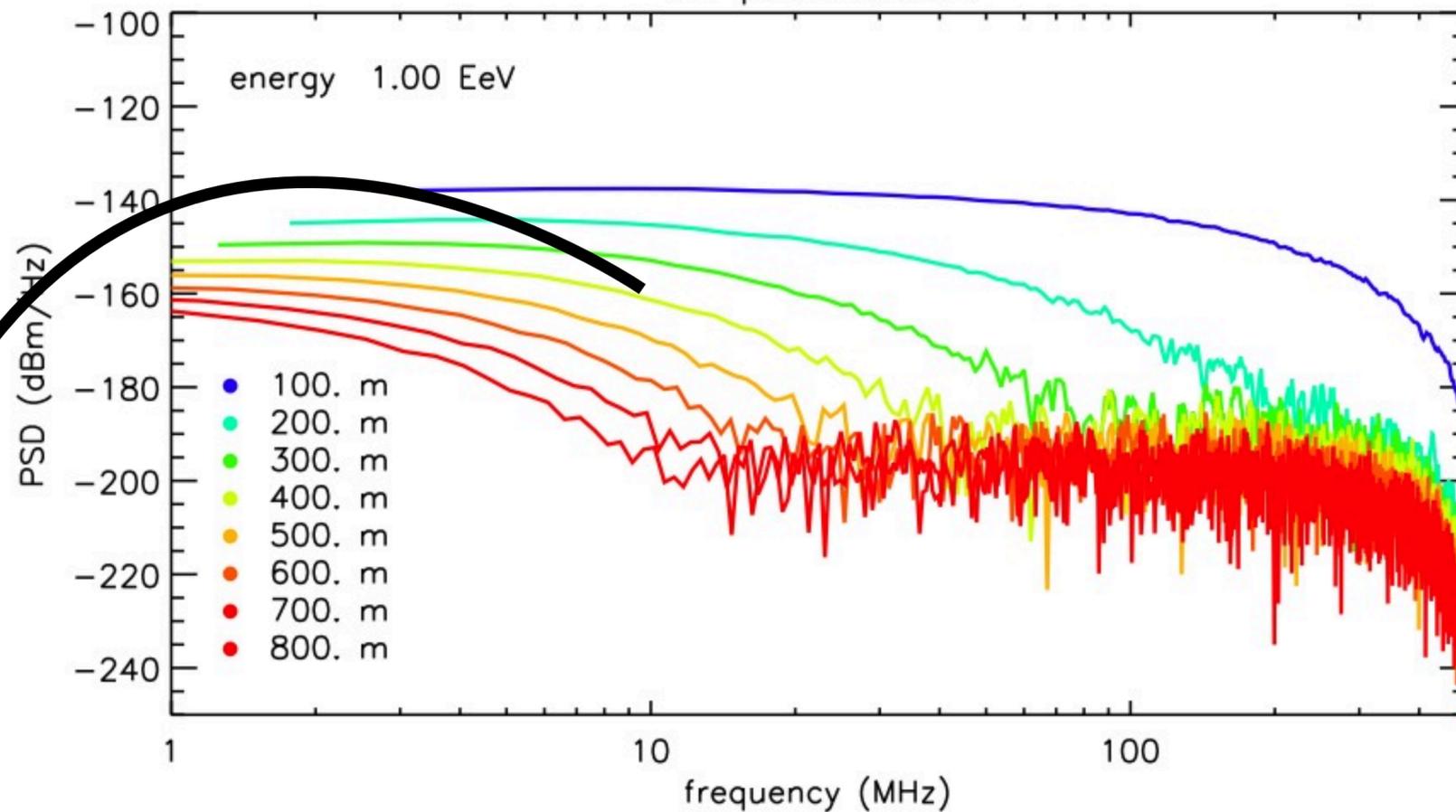


**Urgent** : analyse hybride FD/radio !

**Indication que le moment du maximum de production de champ électrique dans la gerbe ne serait PAS le X<sub>max</sub>, comme habituellement supposé**

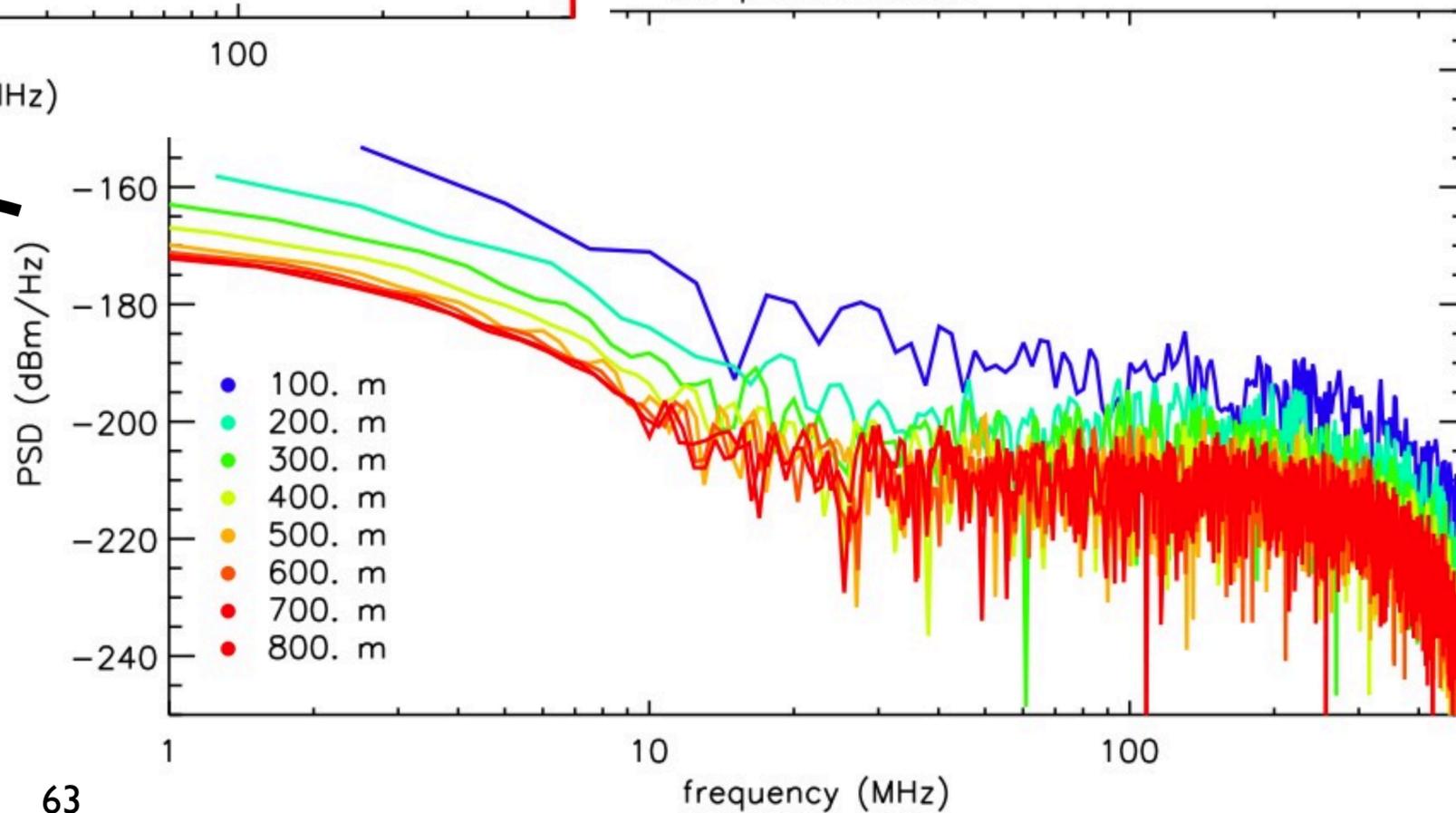
# Mort subite

EW polarization



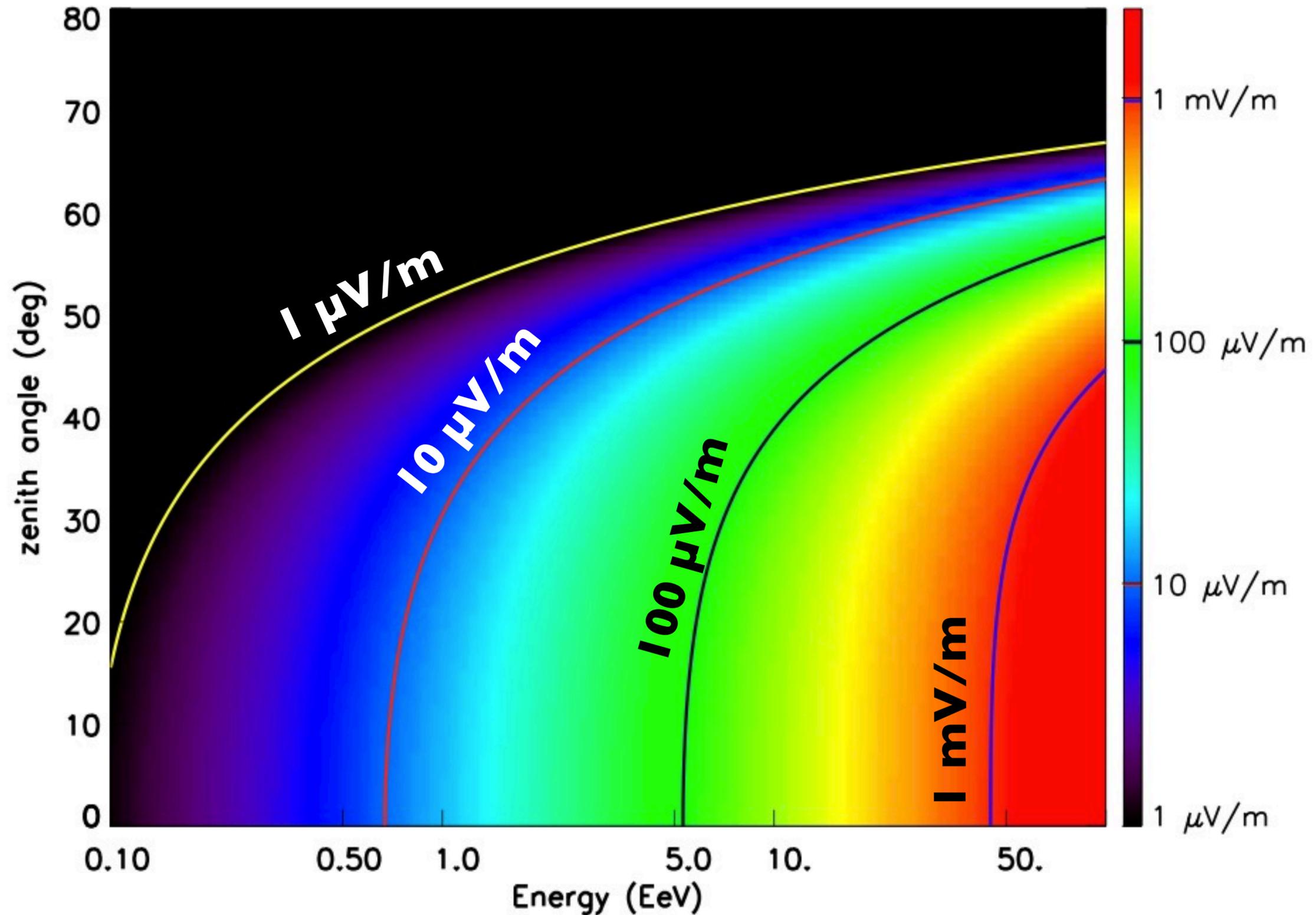
Forme indépendante de d !  
signal en dessous de 20 MHz

EW polarization



# Mort subite

**Amplitude**  
proportionnelle à  $E$ ,  
inversement  
proportionnelle à  $d_{\text{cœur}}$



calculé pour le site d'Auger (1400 m), antenne à 100 m à l'est du cœur, polarisation EW

# Mort subite

<b>signal principal</b>	<b>signal de mort subite</b>
dépend de la distance à l'axe	dépend de la distance au cœur
polarisation <b><math>\mathbf{n} \times \mathbf{B}</math></b> au 1er ordre	polarisation selon <b><math>\mathbf{CA-n}</math></b>
entre 1 MHz et $\sim$ GHz	en dessous de 20 MHz
datation relative	datation absolue dans la trace
on supposait : production à $X_{\max}$	indique une production à $X < X_{\max}$

le signal de mort subite est a priori détectable : amplitude suffisante, polarisation verticale  
article soumis le 5 octobre 2012

# Simulation

- SELFAS est un code de simulation reconnu internationalement (Astropart.Phys. 35 (2012) 733-741)
- le code a permis de comprendre le décalage de cœurs (radio vs particules, article soumis)
- la signal de mort subite contient un très grand nombre d'informations sur la gerbe et le primaire (article soumis)
- besoin de développer une antenne dédiée (polarisation verticale, basses fréquences et bonne sensibilité dans les directions horizontales)
- étude de la contribution au GHz dans SELFAS par K. Louédec, LPSC
- convergence des différents codes sur le marché

# Conclusion et perspectives

Objectif scientifique : identifier les sources et la nature des rayons cosmiques à ultra-haute énergie

- comprendre la coupure dans le spectre : GZK ou extinction des sources ?
- priorité : estimer la composition événement par événement
- obtenir des cartes du ciel selon la nature du primaire
- pour cela, on améliore Auger (TA en fait autant)
  - ◆ améliorer l'électronique du SD
  - ◆ améliorer le FD
  - ◆ contraindre la nature du primaire en détectant spécifiquement les composantes muonique et électromagnétique
  - ◆ AMIGA : les muons
  - ◆ radio MHz et GHz : les  $e^+/e^-$
- les taux de pannes actuelles dans Auger permettent encore 10 ans d'exploitation

# Conclusion et perspectives

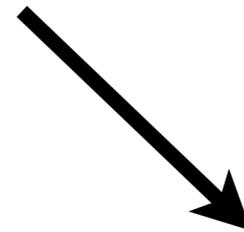
Objectif scientifique : identifier les sources et la nature des rayons cosmiques à ultra-haute énergie

Finance Board Auger début septembre 2012

but : obtenir de l'argent pour les améliorations d'Auger à prévoir pour **2015**

calendrier : fournir un rapport pour **juin 2013**

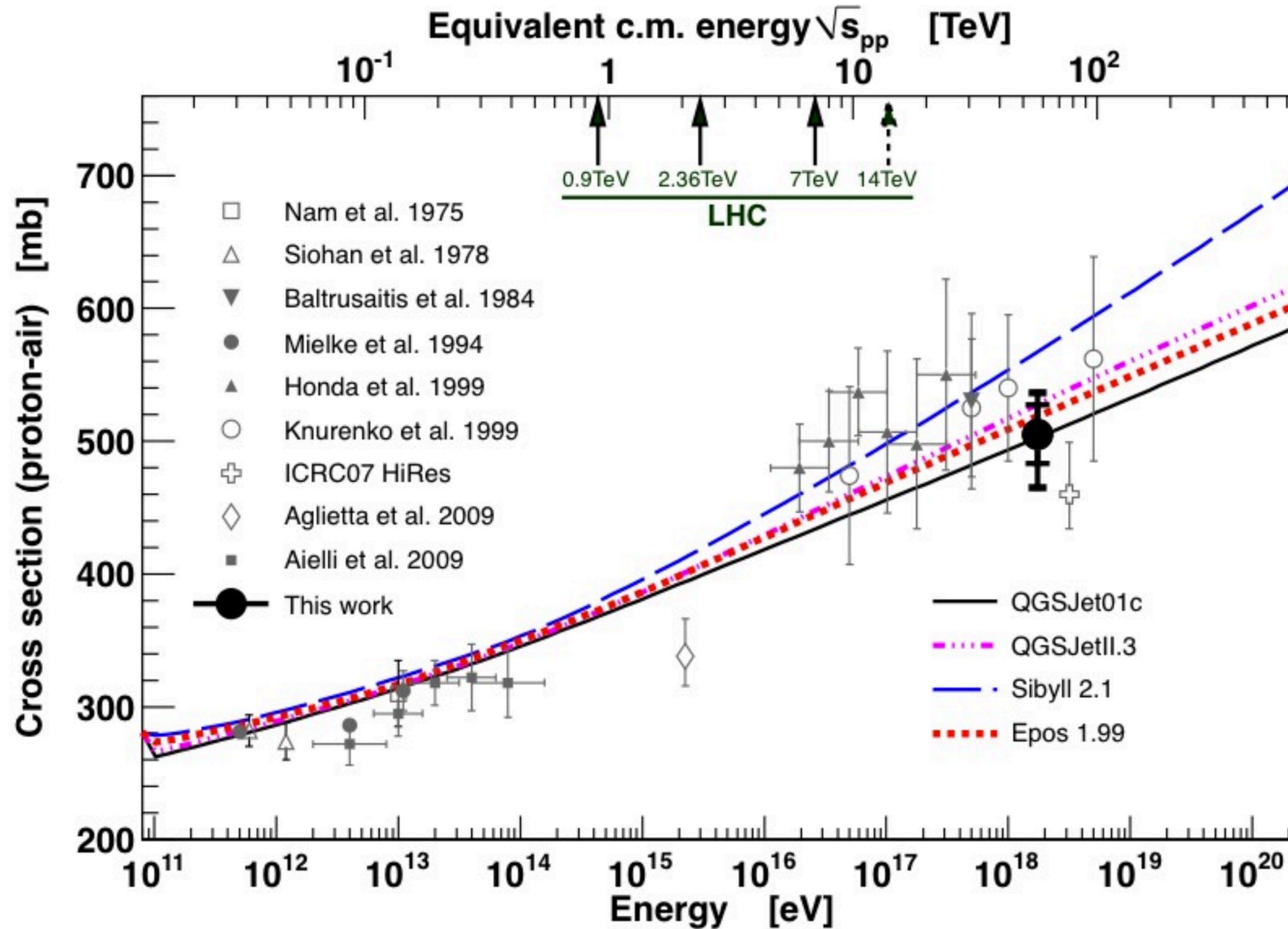
- ◆ contraindre la nature du primaire en détectant spécifiquement les composantes muonique et électromagnétique



le signal radio n'est dû qu'aux  $e^-$  et  $e^+$  de la gerbe  
le signal de mort subite permet d'estimer  $N_{\text{tot}}$  au niveau du sol

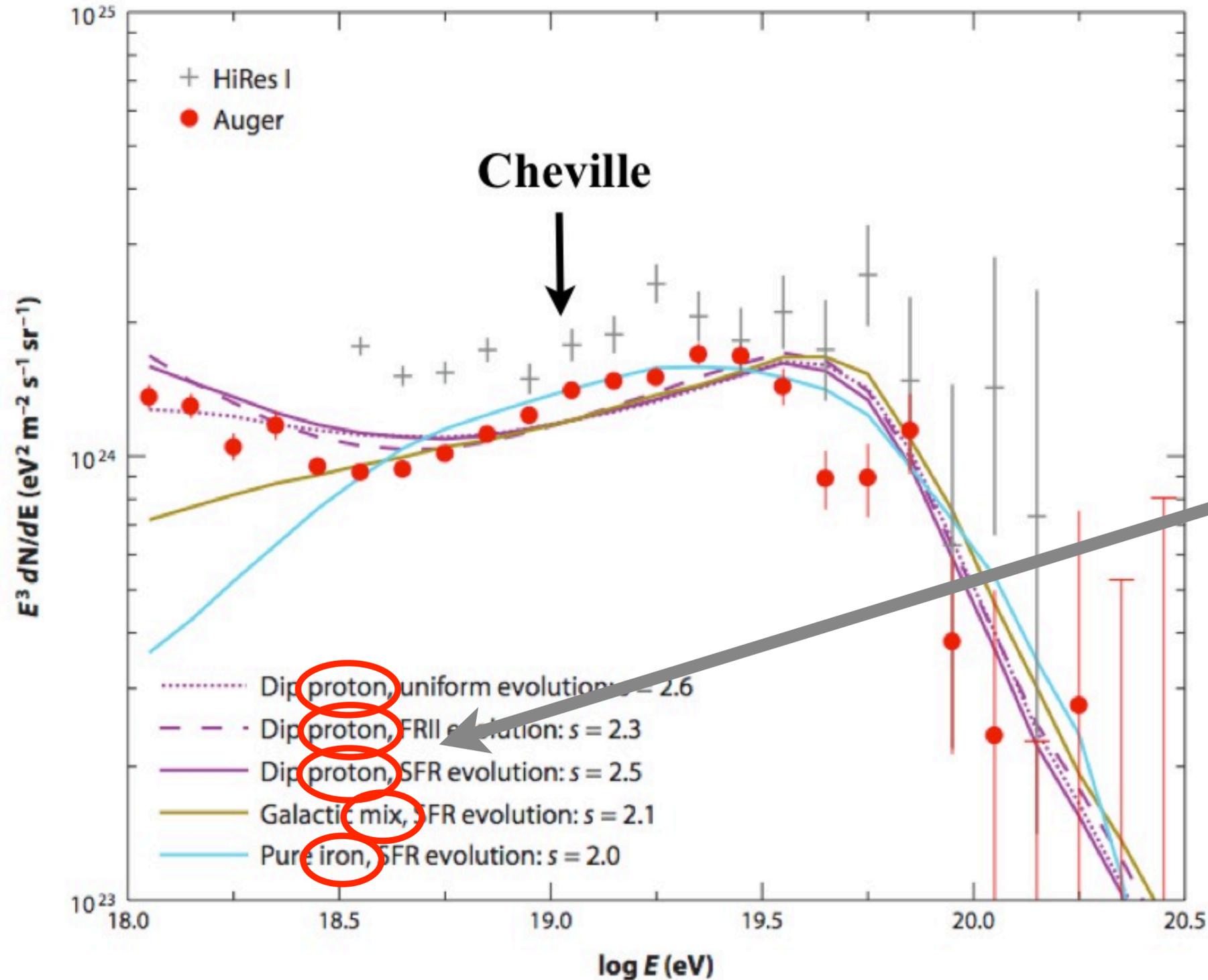


systematic uncertainties assume <0.5% photons and <25% He



$$\sigma_{p\text{-Air}} = (505 \pm 22_{\text{stat}} \left( {}_{-34}^{+26} \right)_{\text{sys}}) \text{ mb}$$

# Composition



la composition est  
essentielle pour  
discriminer les modèles !!

Kumiko Kotera and Angela V Olinto. The Astrophysics of Ultrahigh-Energy Cosmic Rays.  
A49CH04-Olinto ARI 23 June 2011.

# Directions d'arrivée, recherche des sources

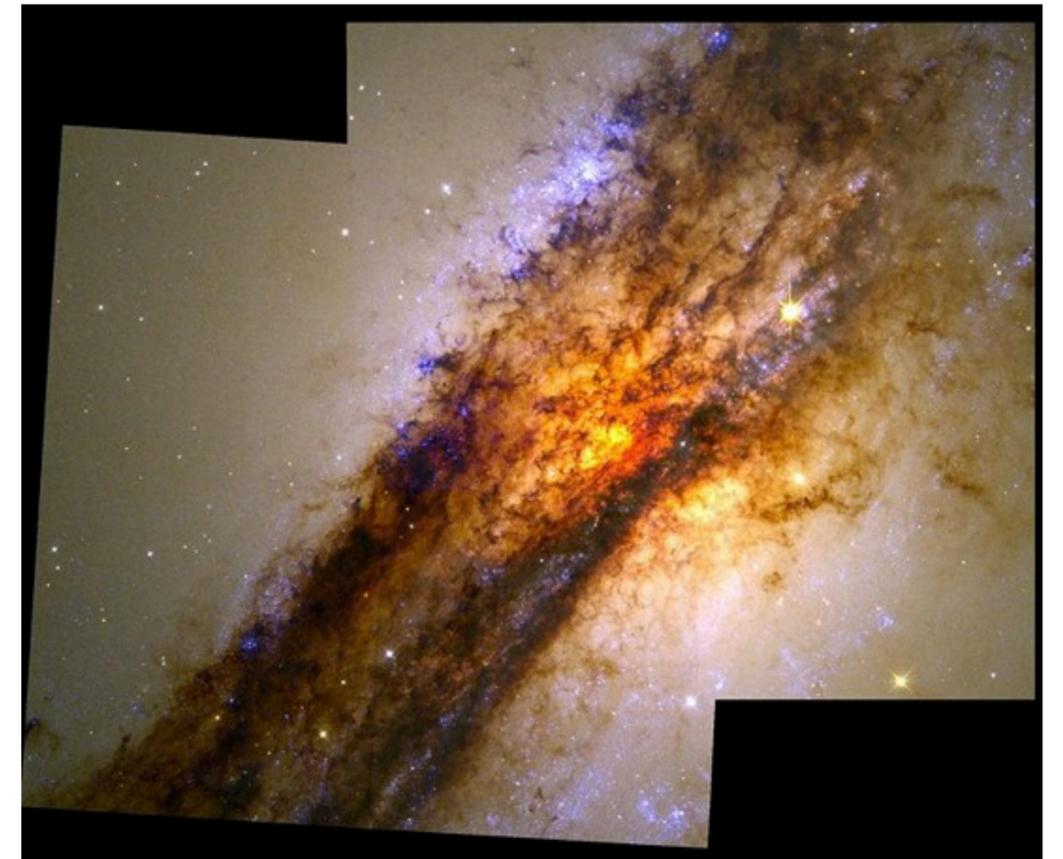
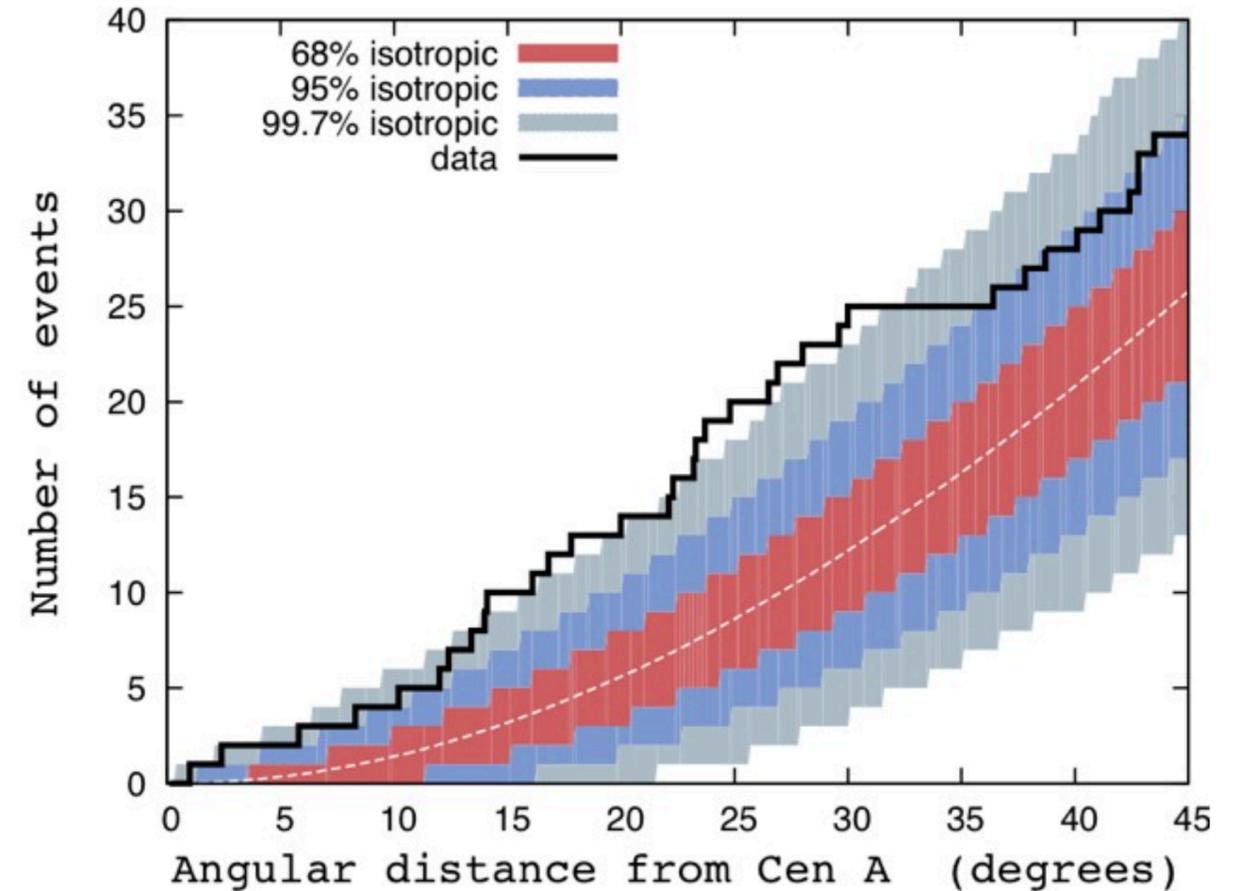
Source potentielle ? Centaurus A

Le plus grand écart au cas isotrope correspond à la direction de Centaurus A (3 Mpc)

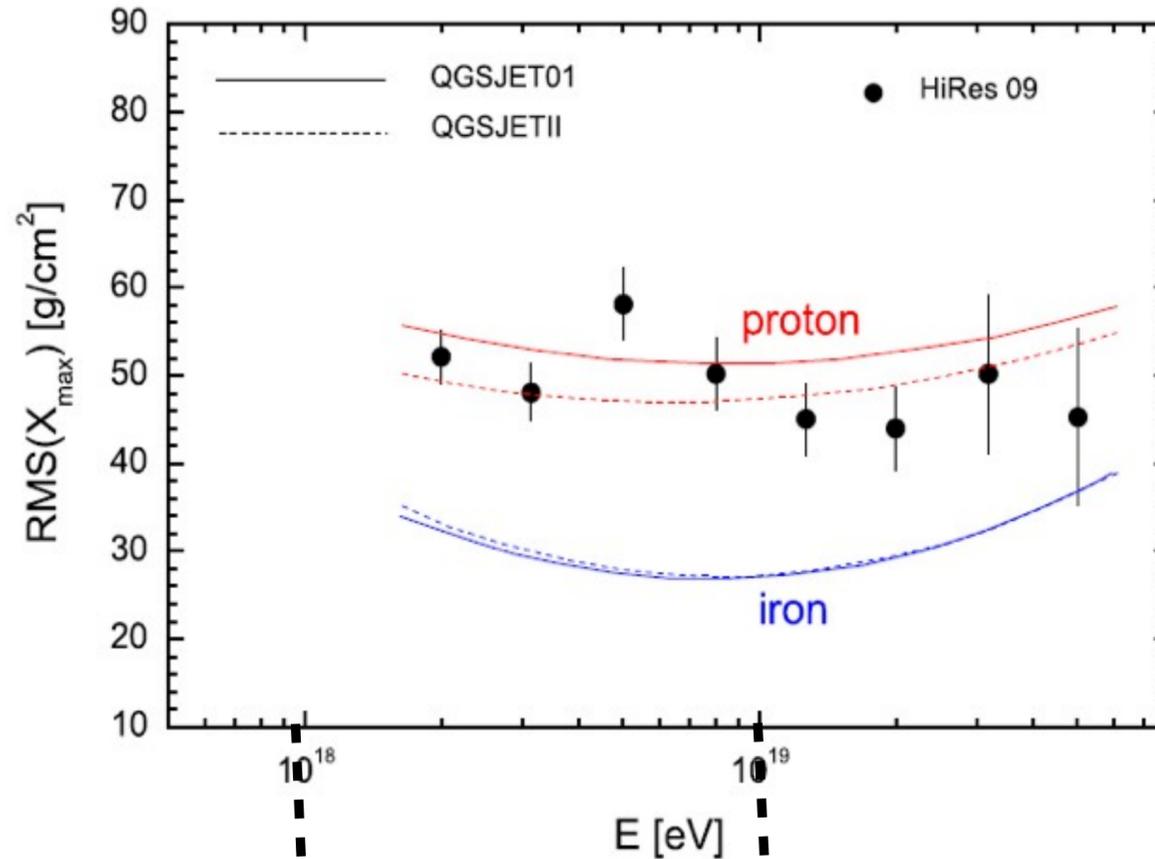
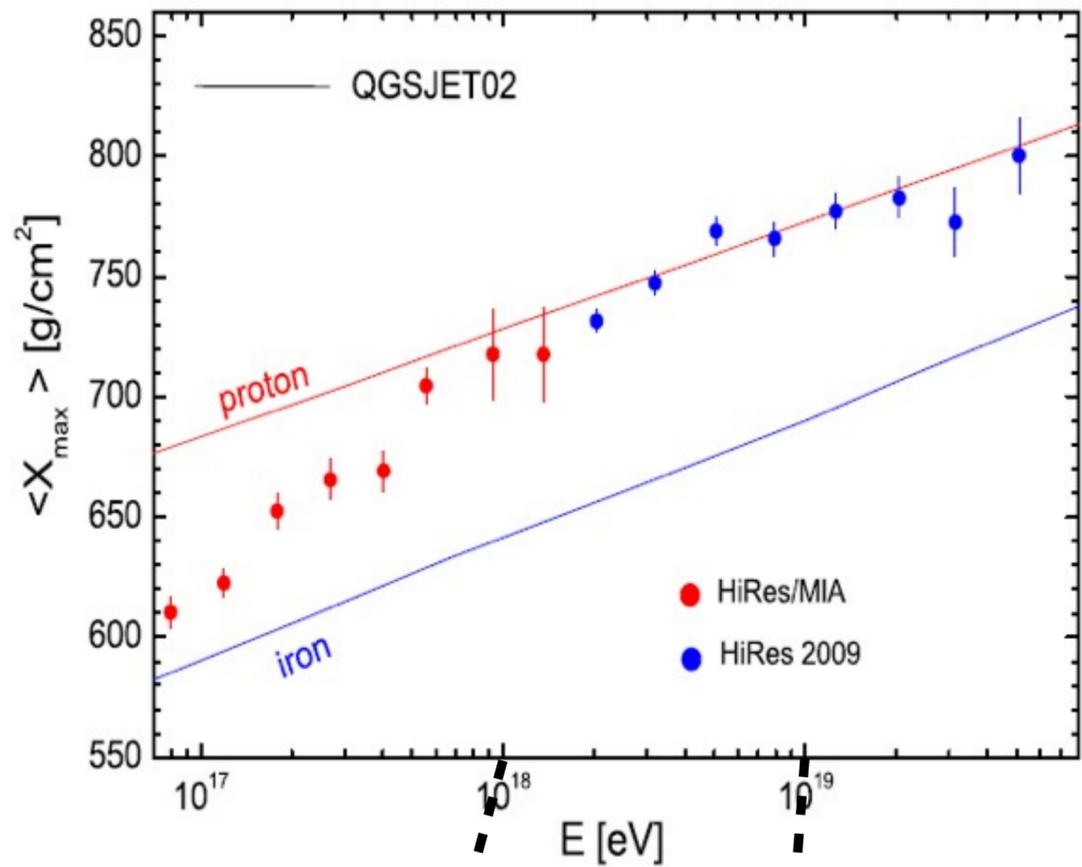
Pour tous les événements tels que  $E > 55 \text{ EeV}$ , 18.8% d'entre eux sont à moins de  $18^\circ$  de CenA (pour 4.7% attendus)

Plus grand écart :  $n_{\text{obs}}=19$ ,  $n_{\text{exp}}=7.6$  (à  $24^\circ$ )

test de KS : compatible avec isotropie avec une probabilité de 4% (mais sur des données non indépendantes)

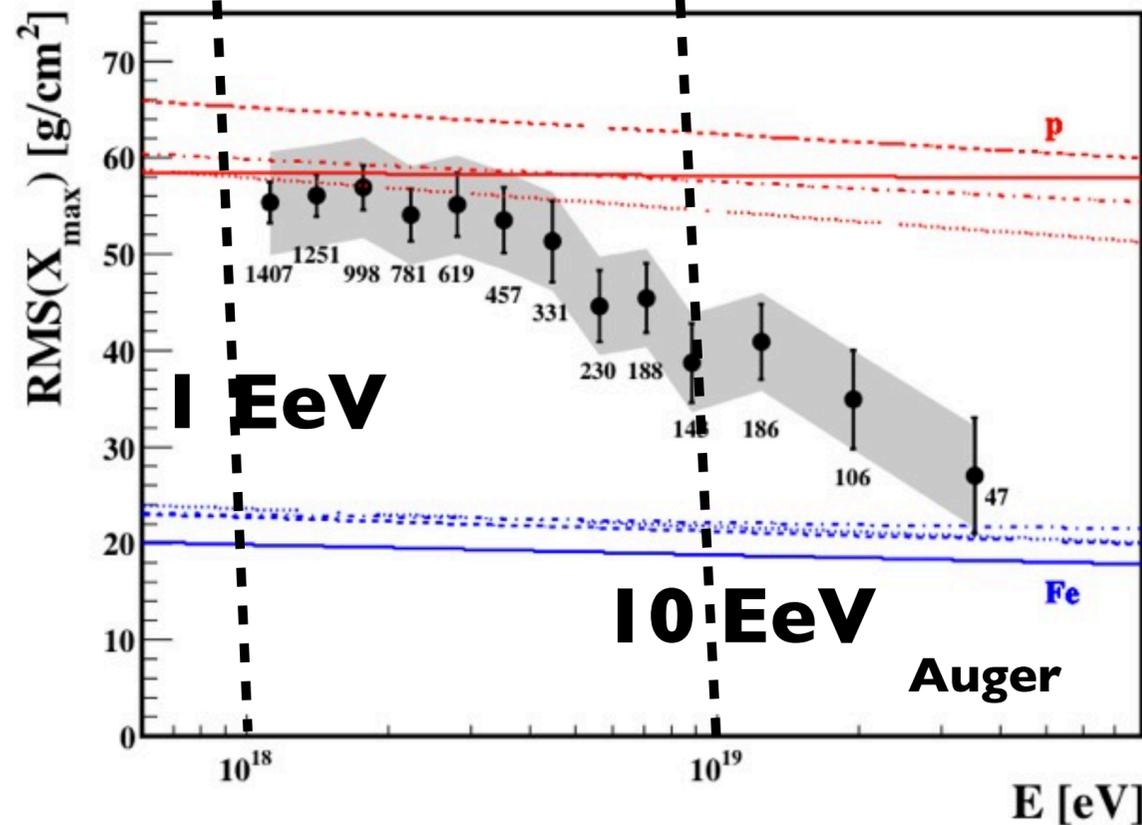
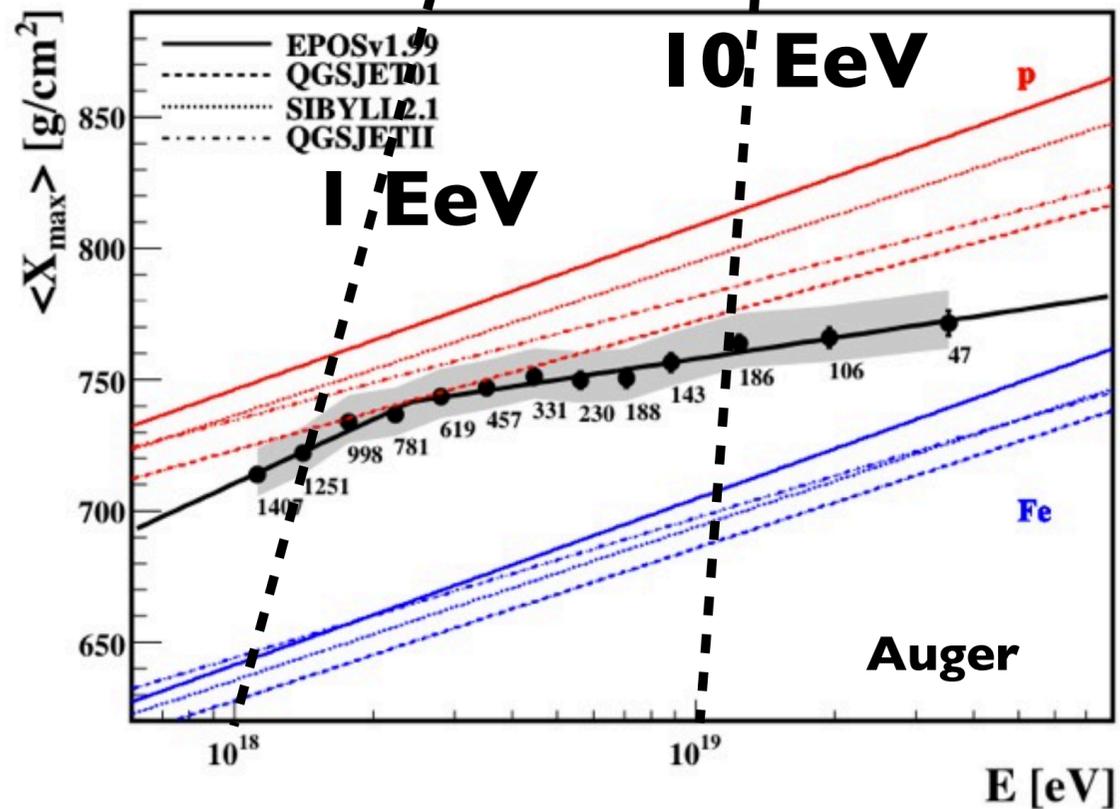


# Composition

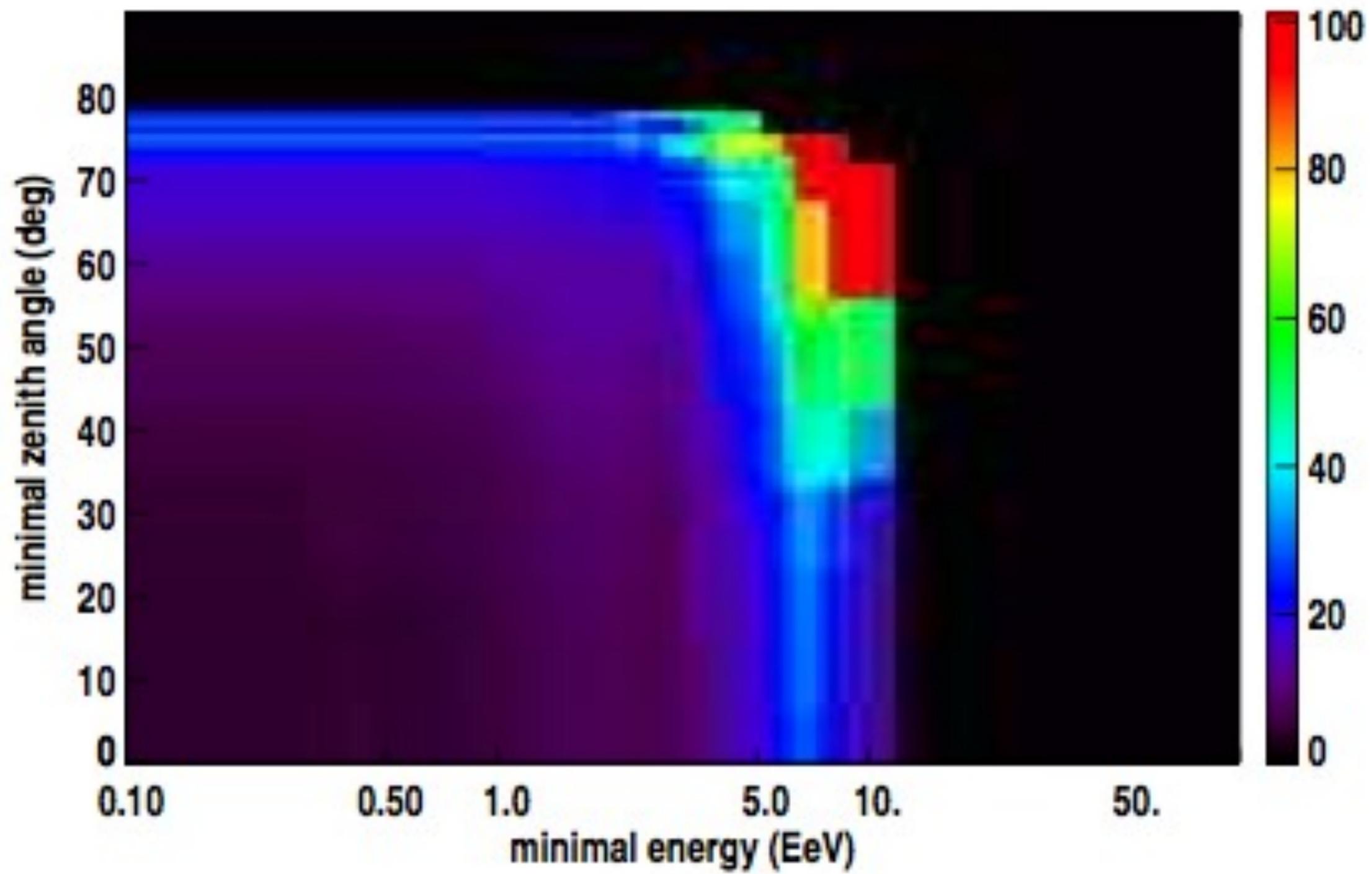


HiRes : **proton**

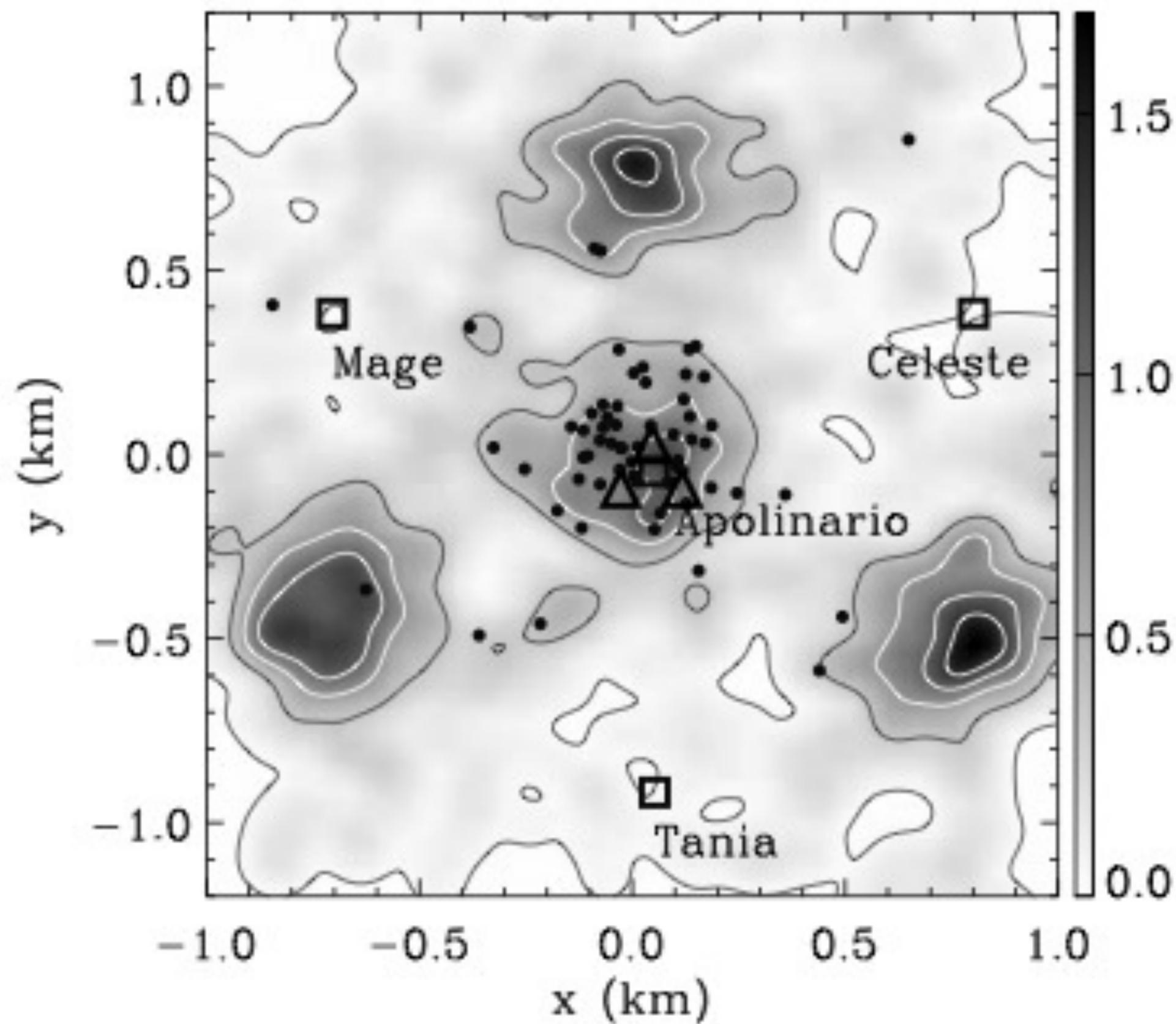
$\forall E \geq 1 \text{ EeV}$



Auger : **proton**  
 puis **lourd** à partir  
 de  $E \geq 5 \text{ EeV}$



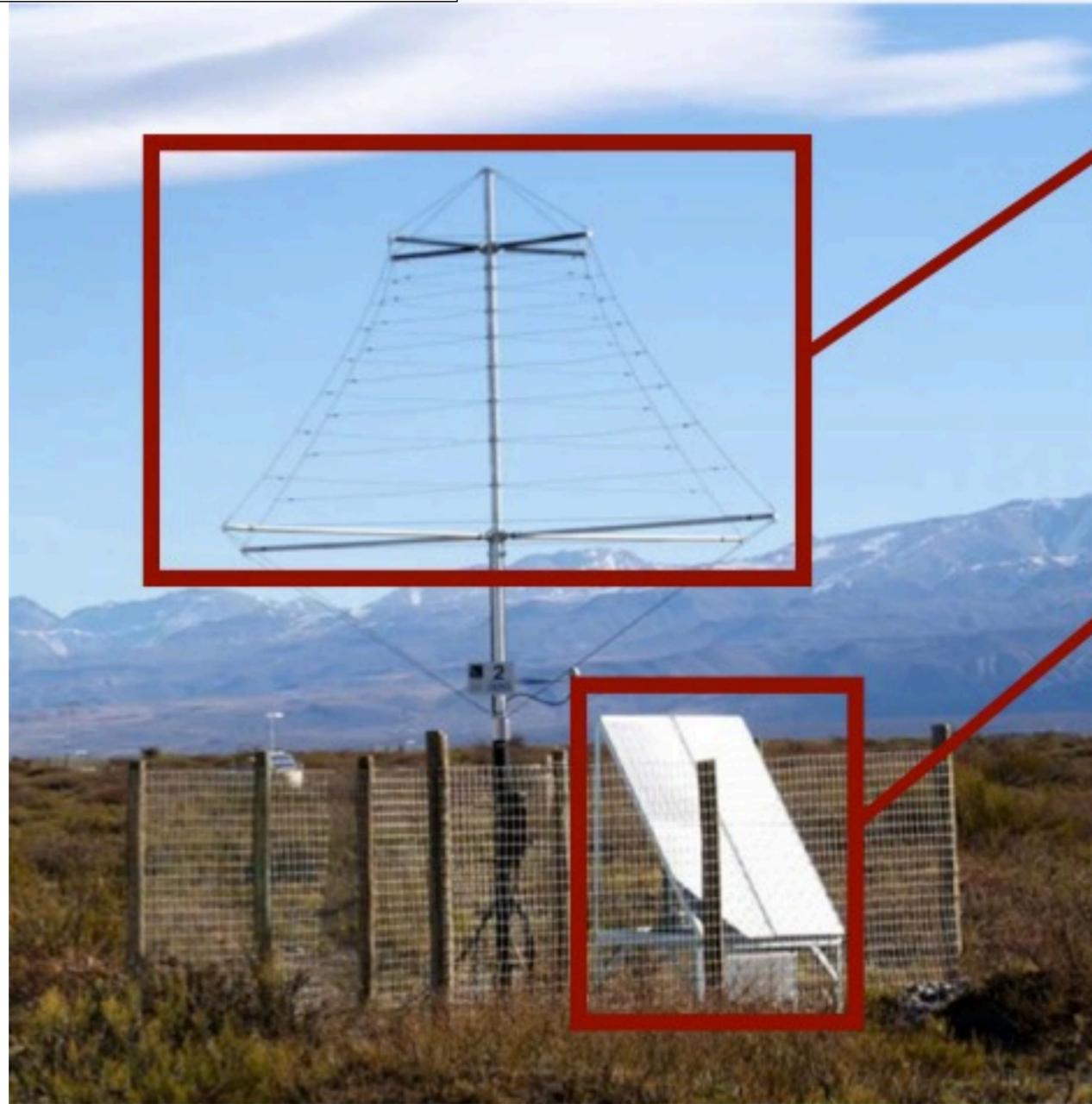
event density map ( $\text{km}^{-2} \text{day}^{-1}$ )



# AERA

en fonctionnement depuis début 2010

Schoorlemmer, ICTAPP 2011



## **Antenna**

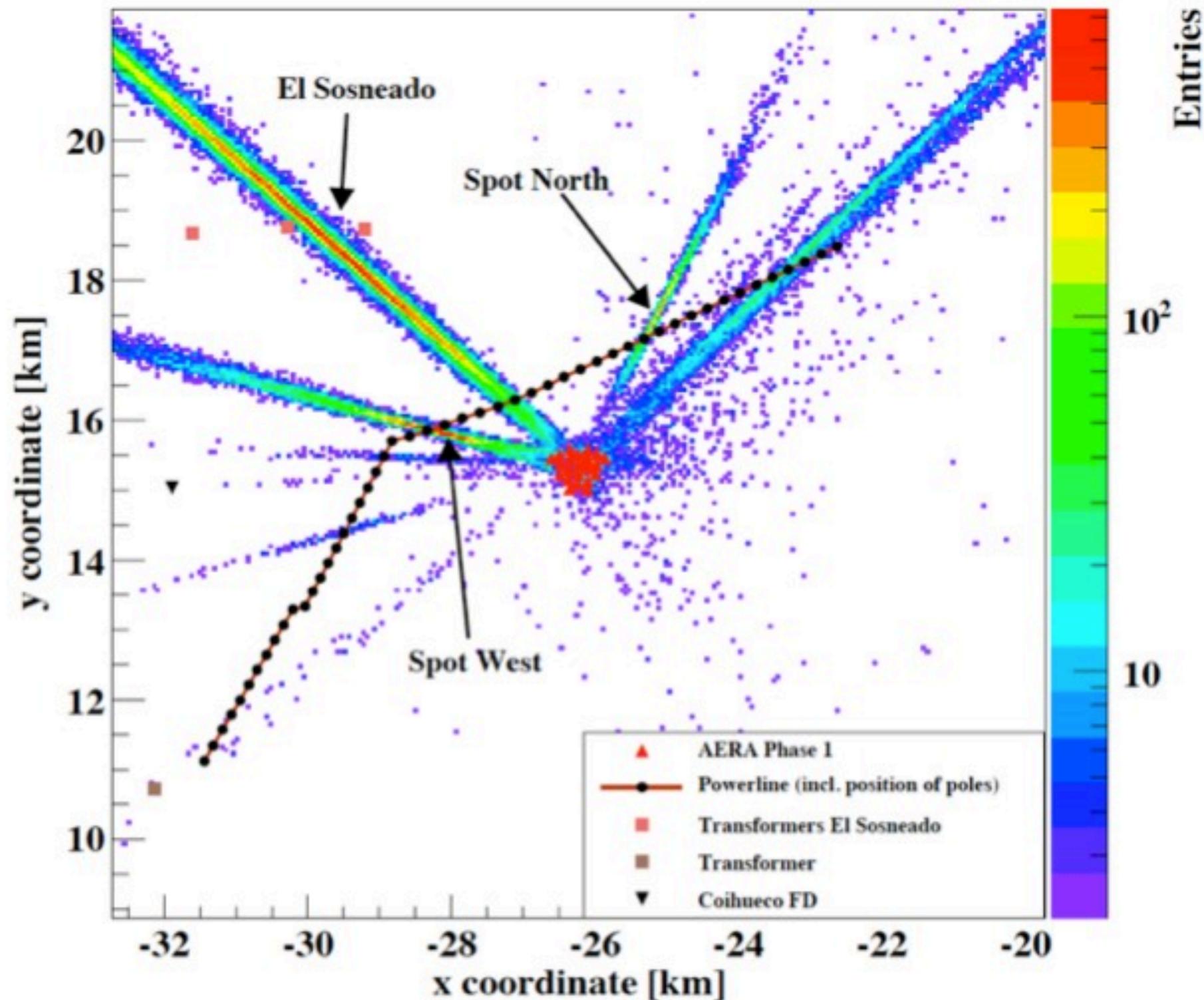
- Log Periodic Dipole Antenna.
- 30-80MHz

## **Electronics**

- Filters
- Amplifiers
- Solar panels/batteries
- Digitizer
- Communication

# AERA

Schoorlemmer, ICTAPP 2011

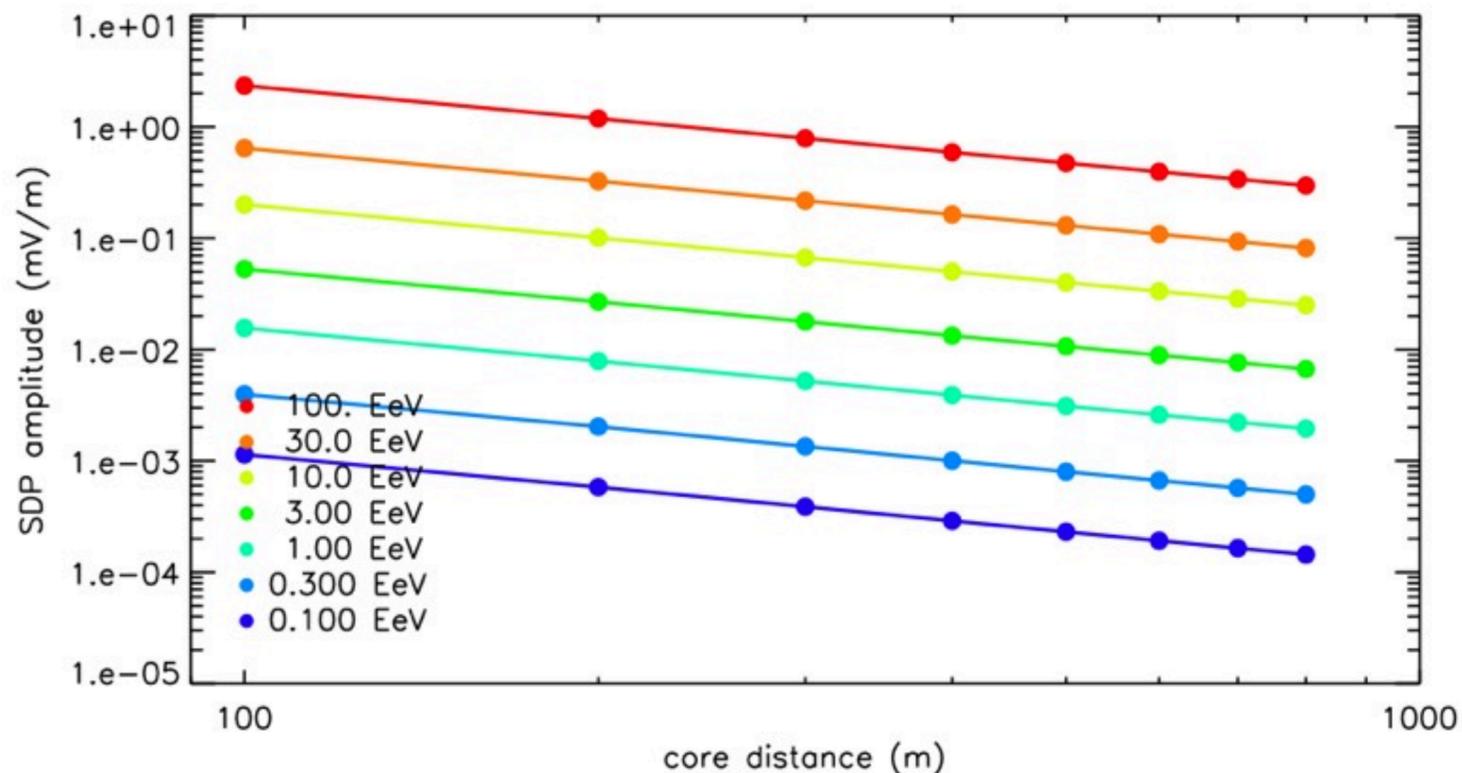


**forte** pollution anthropique  
(transfos électriques), 50 Hz

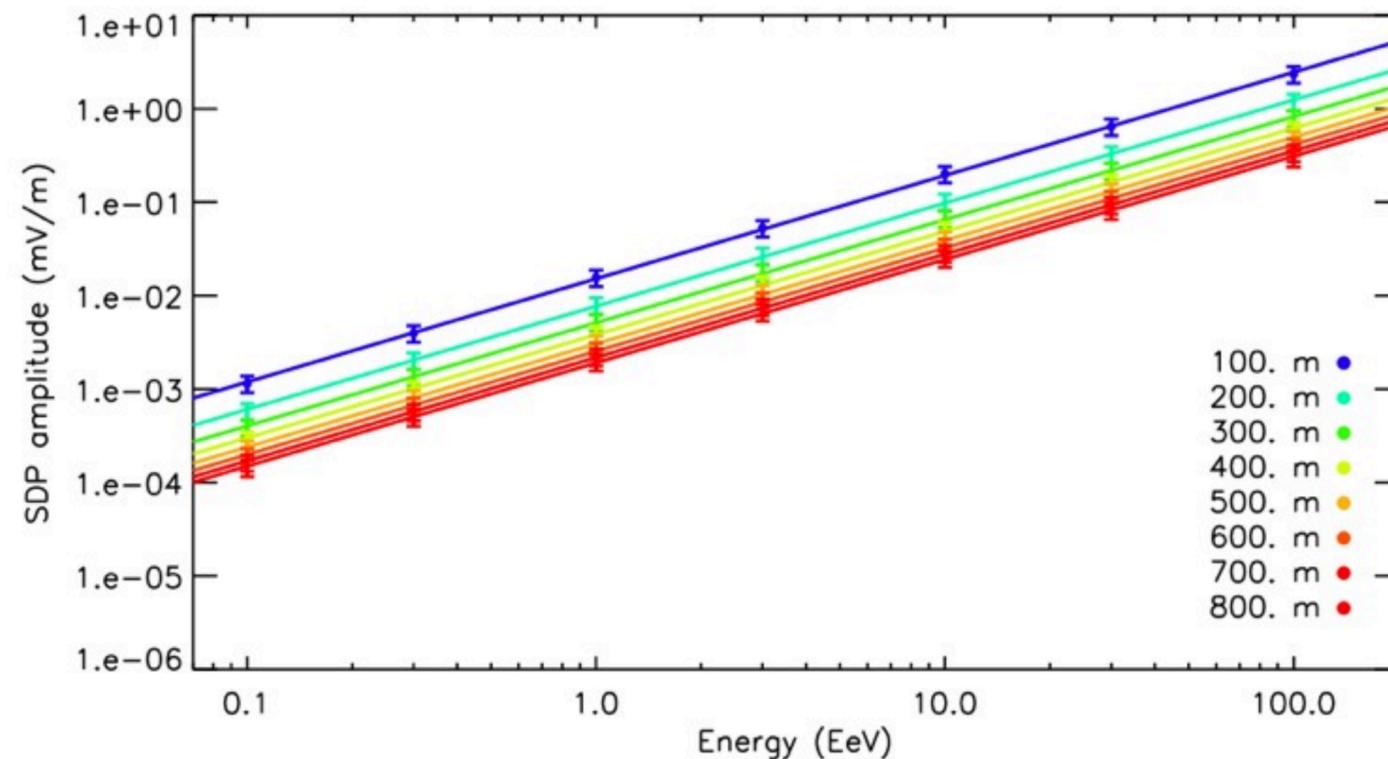
représentant la **majorité** de  
nos événements

critique : avoir un bon trigger  
local et central

# Mort subite



champ rayonné : décroissance en  $1/d$



amplitude quasi-proportionnelle à  $E$

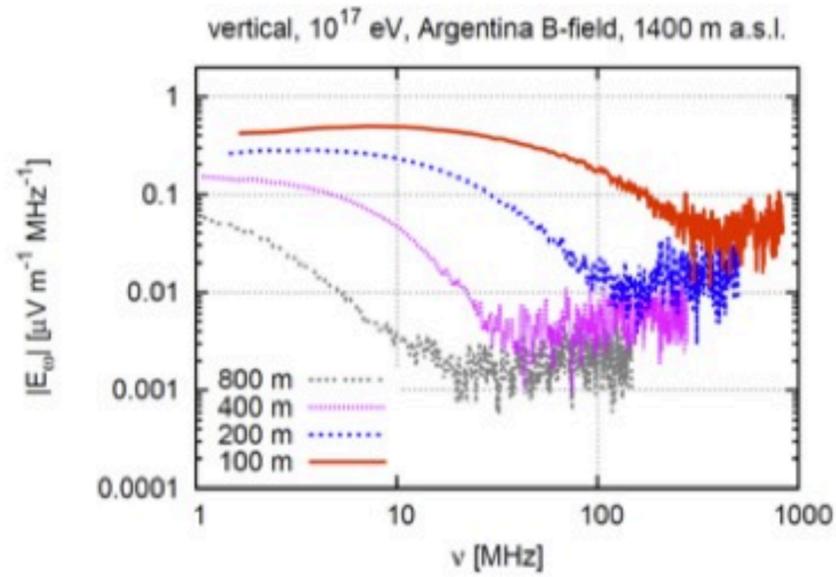
$$\mathcal{A}_{\text{SDP}}^{\text{pol}}(E, d) = \mathcal{A}_{\text{norm}}^{\text{pol}} \left( \frac{100 \text{ m}}{d} \right) \left( \frac{E}{1 \text{ EeV}} \right)^{1.1} \mu\text{V m}^{-1}$$

$$\mathcal{A}_{\text{norm}}^{\text{EW}} = 15.6 \mu\text{V m}^{-1}$$

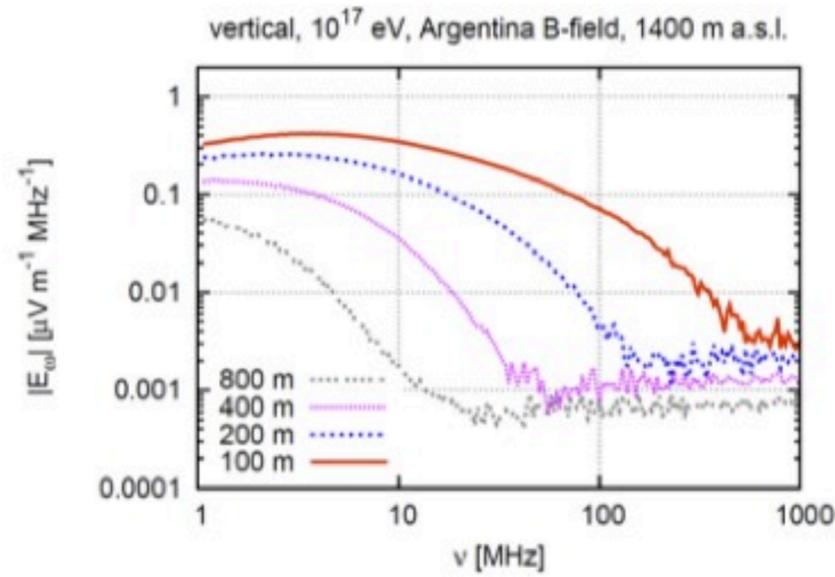
# Comparaison des codes

(T. Huege, ARENA juin 2012)

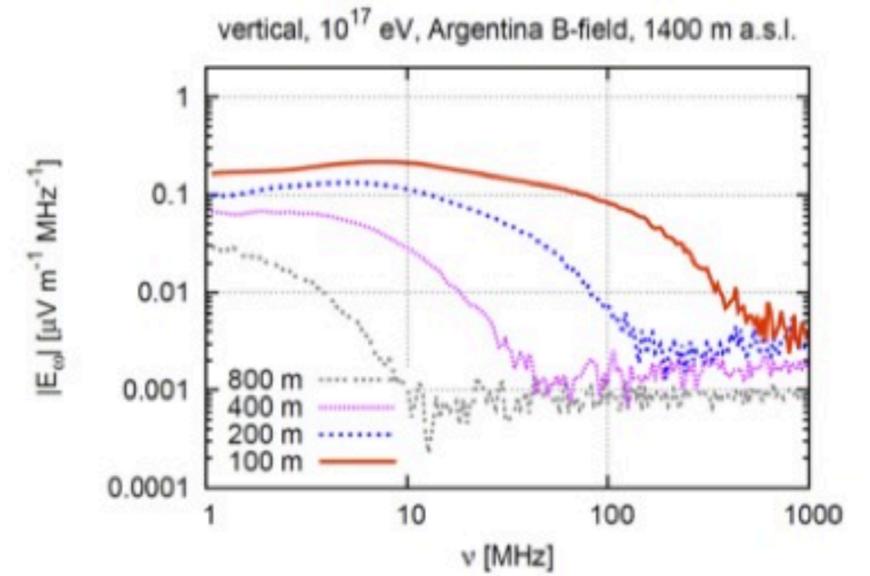
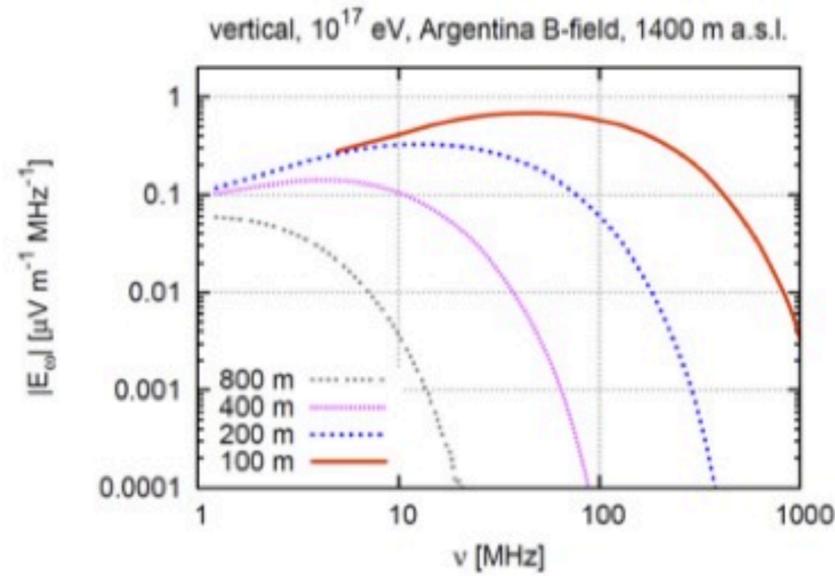
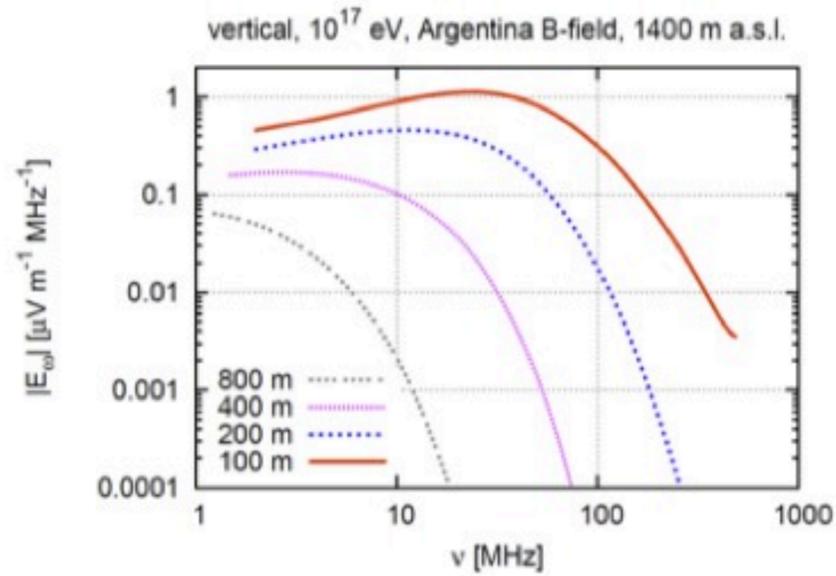
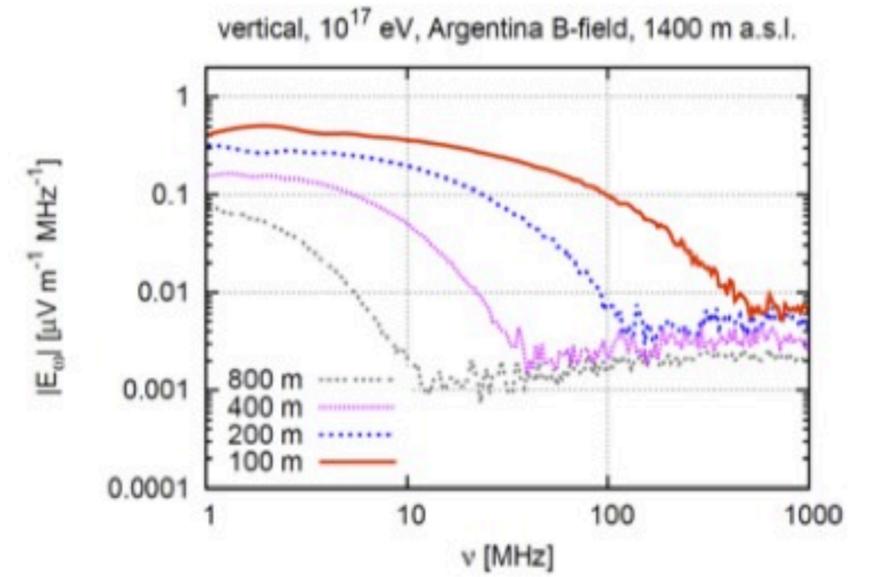
## REAS3.1



## CoREAS



## ZHAireS



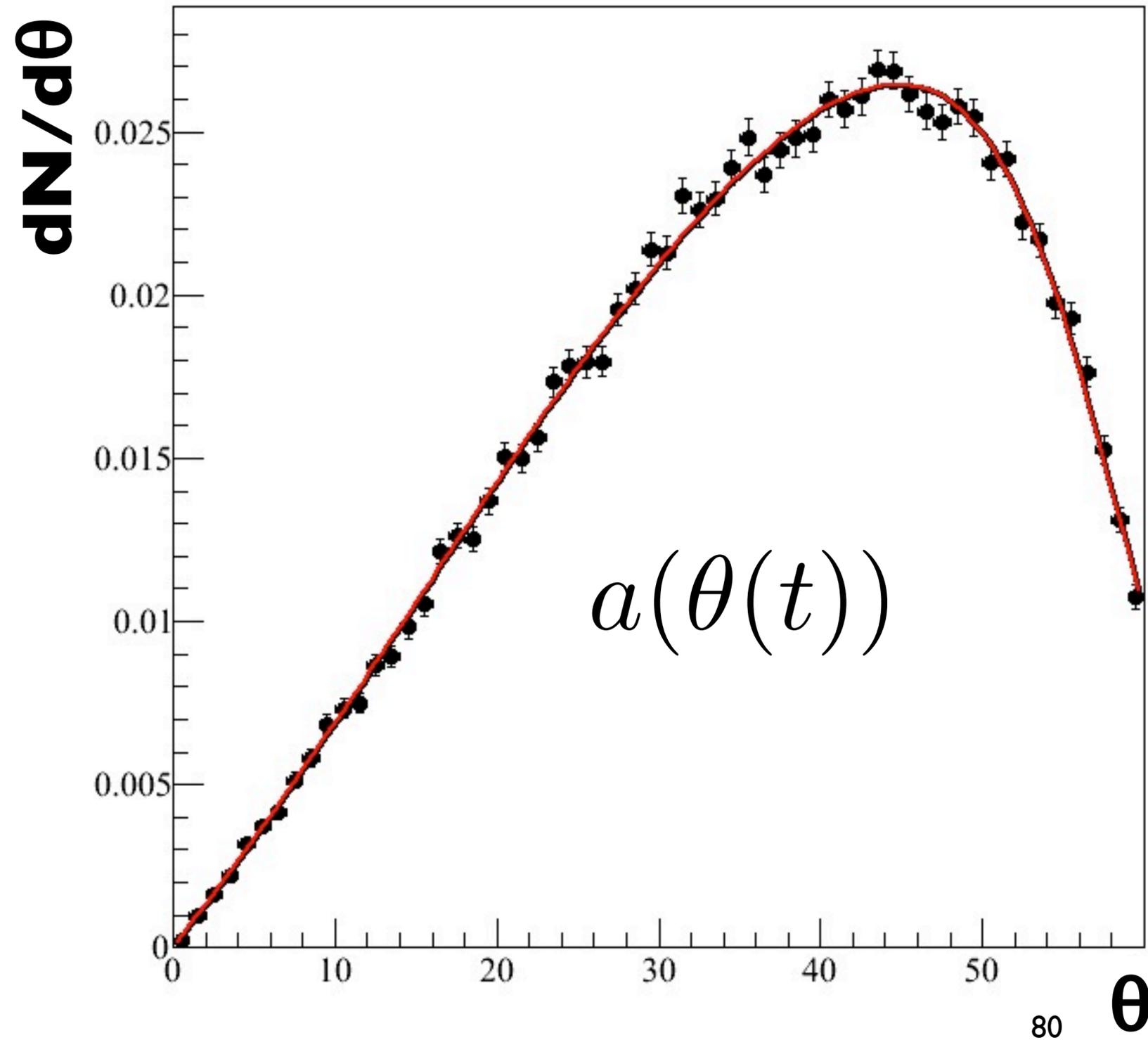
## MGMR

## EVA

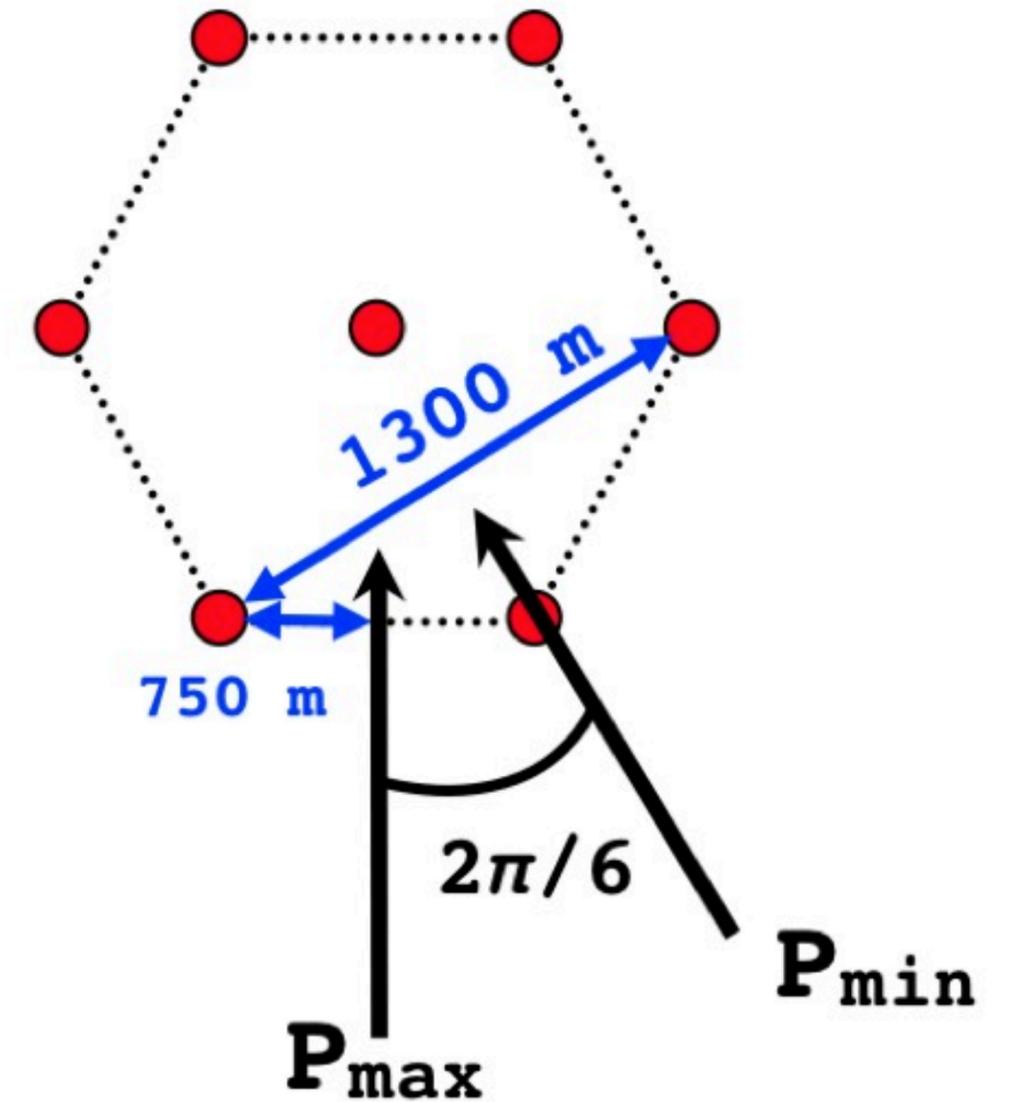
## SELFAS2

# Recherche des sources

83 109 événements entre 1 et 1.1 EeV



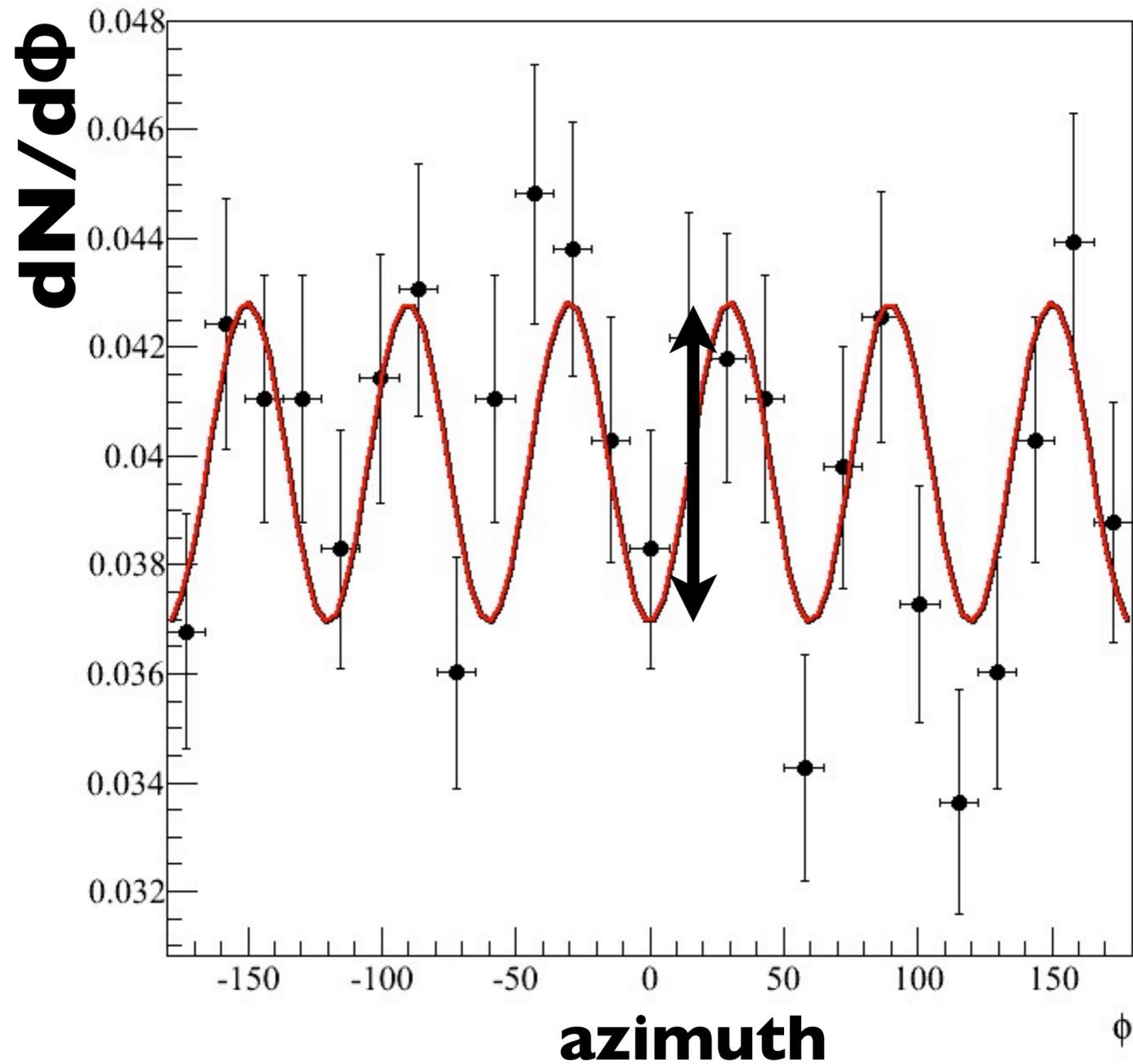
modulation azimuthale !



# Recherche des sources

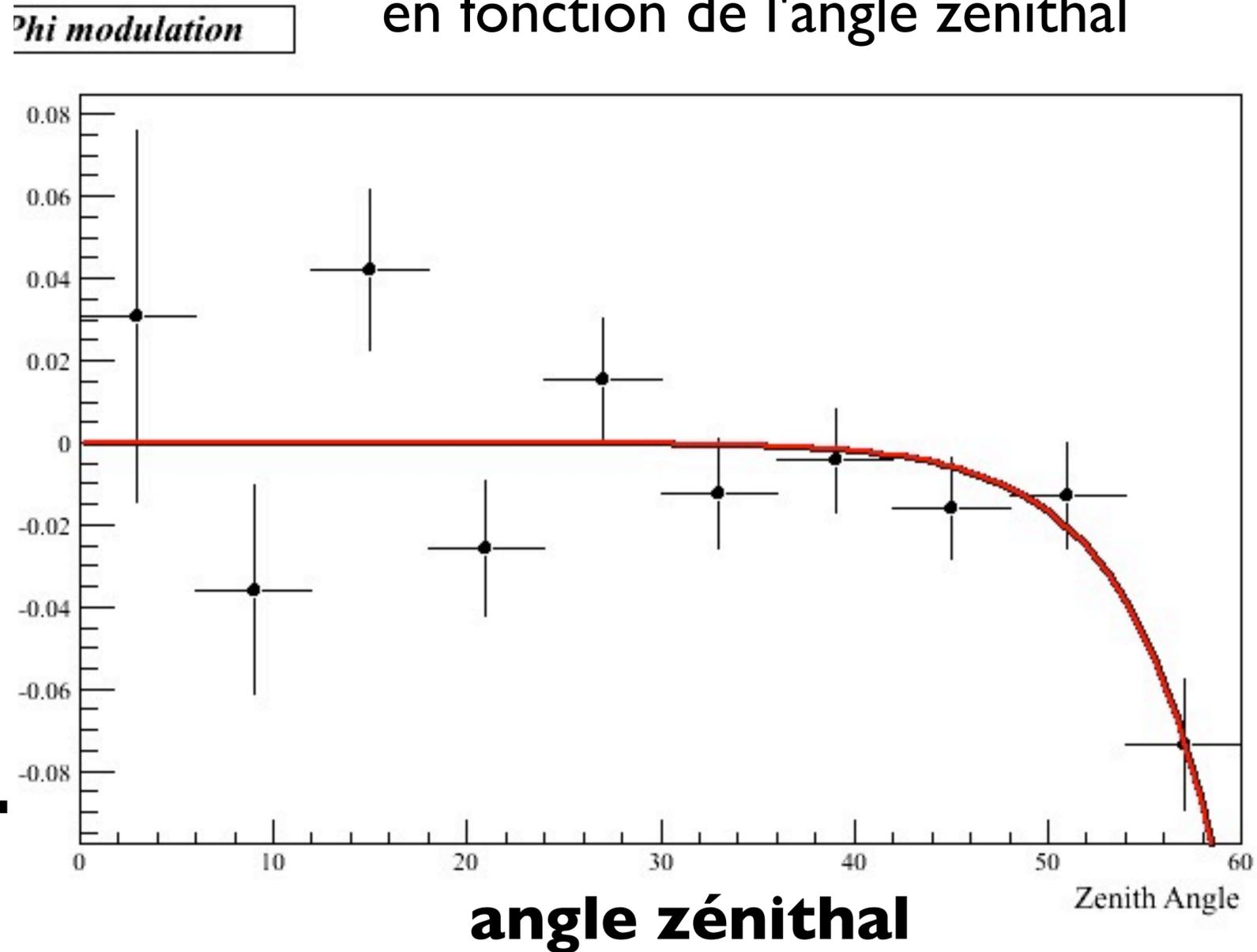
83 109 événements entre 1 et 1.1 EeV

$$a(\phi(\theta))$$



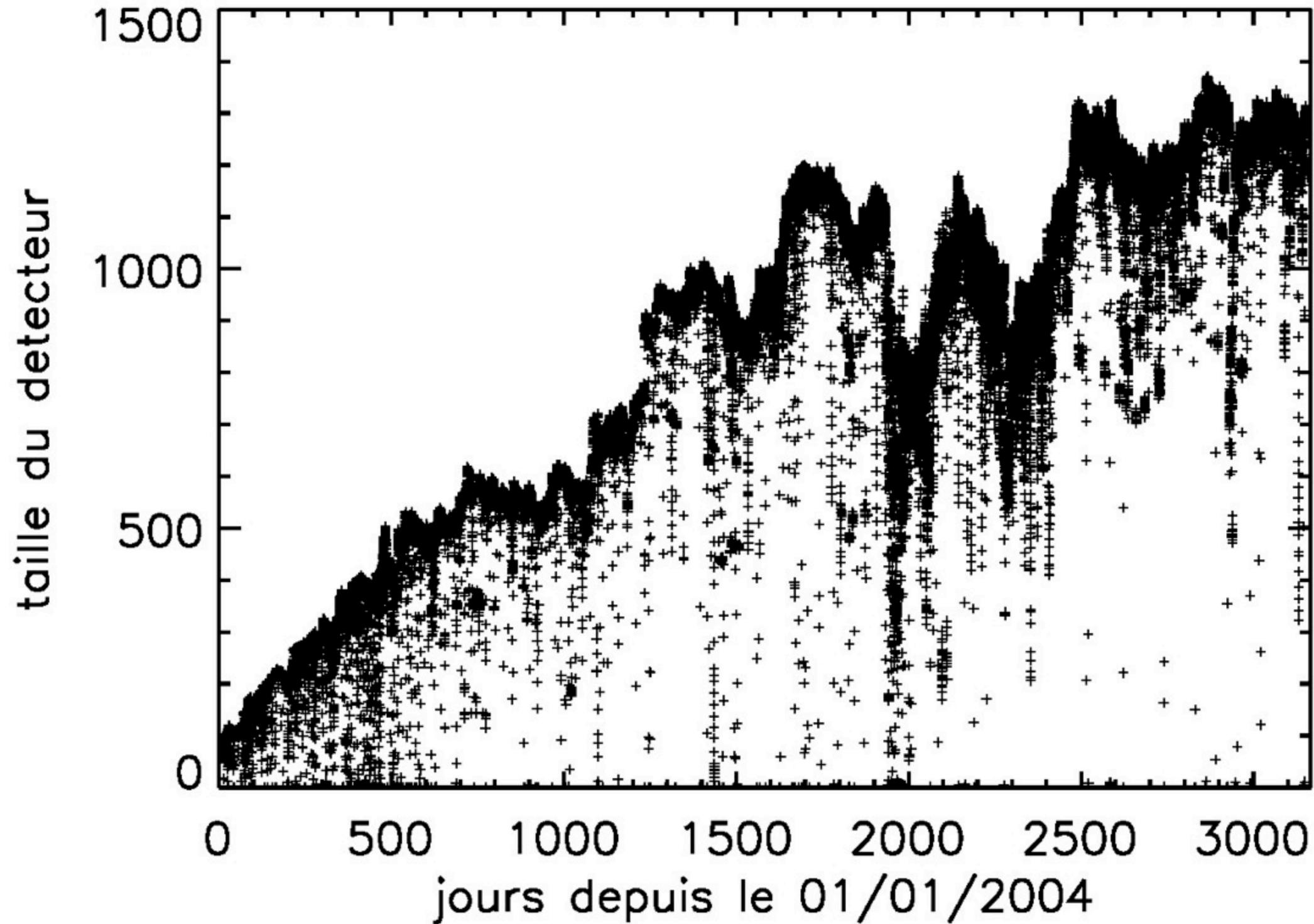
amplitude de la modulation

amplitude de la modulation azimuthale  
en fonction de l'angle zénithal



# Recherche des sources

83 109 événements entre 1 et 1.1 EeV



$a(t)$

# Recherche des sources

83 109 événements entre 1 et 1.1 EeV

Puis on calcule numériquement la couverture

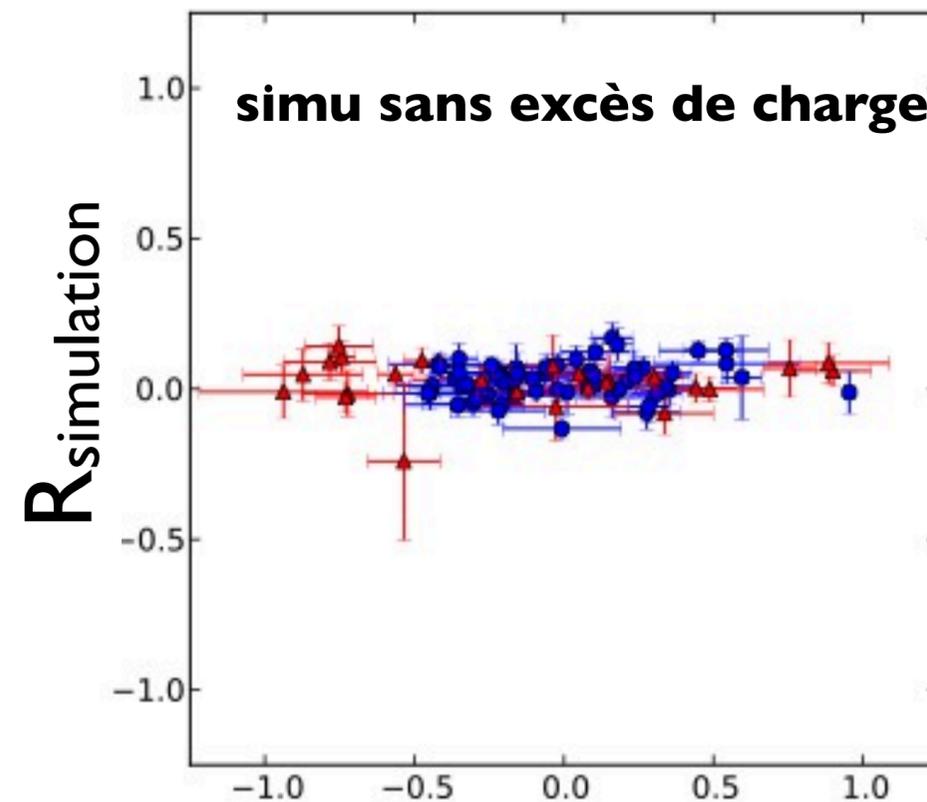
$$W(\alpha, \delta) = \int_{t_{\min}}^{t_{\max}} a(\theta(\alpha, \delta, t), \phi(\alpha, \delta, t), t) dt.$$

# AERA

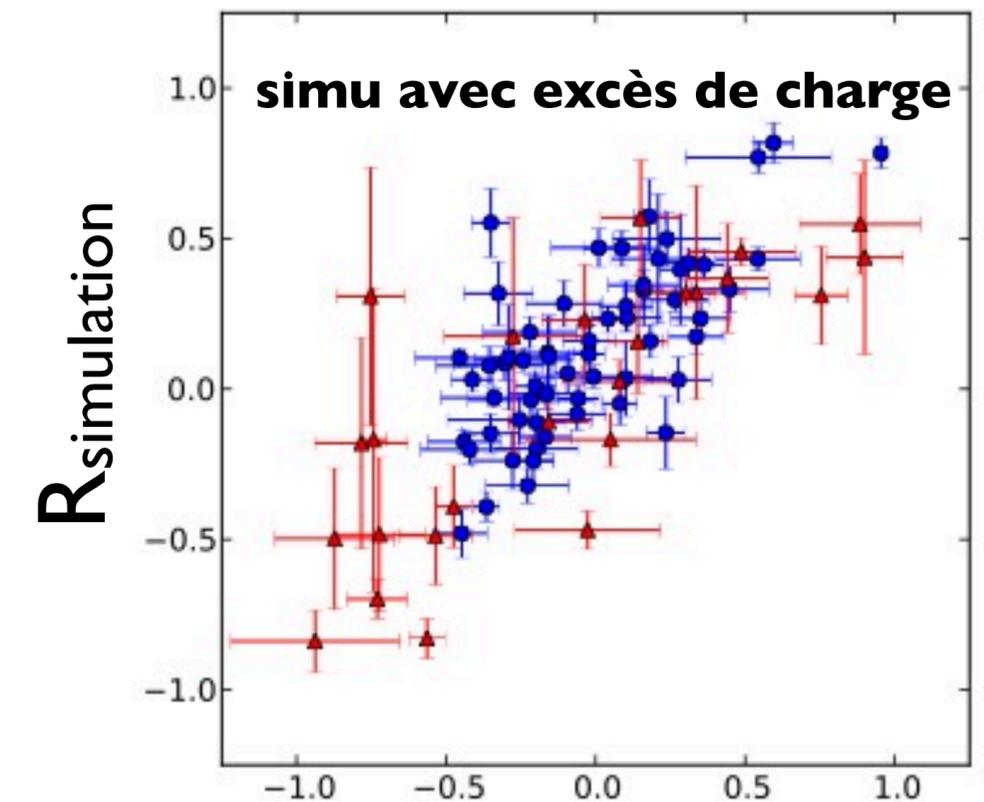
~ 100 gerbes detectées, coïncidences avec SD et FD

~ 0.55 evts/jour

d'après la simulation : 1-2 evts/jour



$R_{données}$



$R_{données}$

$$\mathbf{R=0 \text{ si } \mathbf{E} = \mathbf{n} \times \mathbf{B}}$$

Effet géomagnétique dominant mais indication d'une composante radiale !