

Radio-détection des rayons cosmiques d'ultra-haute énergie

Analyse, simulation et interprétation

Vincent MARIN
Subatech Nantes



Pierre Auger Observatory – Malargue Campus

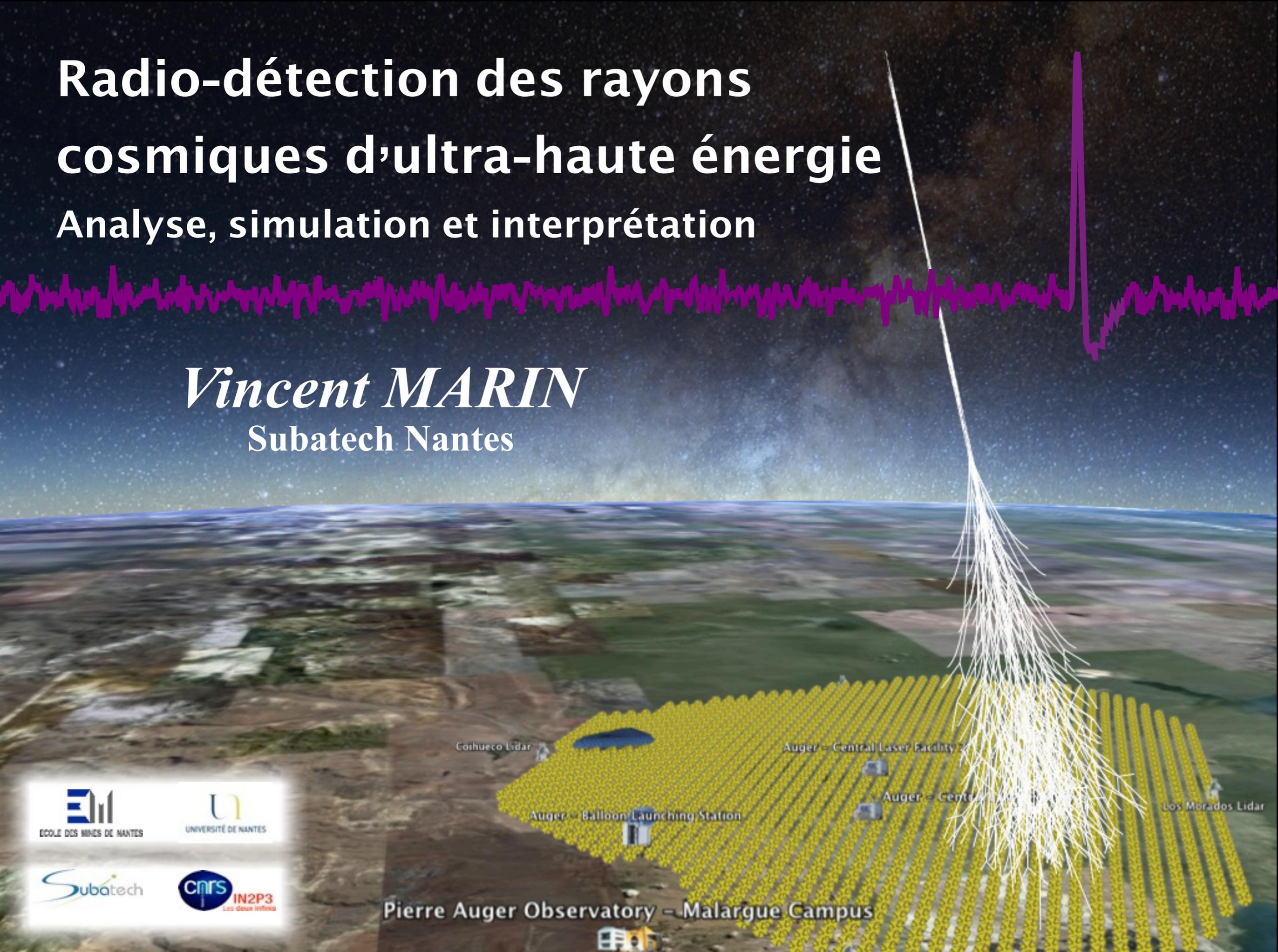
Cohueco Lidar

Auger – Central Laser Facility 2

Auger – Central Laser Facility 1

Auger – Balloon Launching Station

Los Morados Lidar



Plan de la présentation

- 1 **Le rayonnement cosmique d'ultra-haute énergie**
- 2 **La radio-détection des gerbes atmosphériques**
 - a Bref historique
 - b Radio détection selon CODALEMA & compagnie...
- 3 **Nouvel outil de simulation radio des gerbes : SELFAS**
- 4 **Nouvelles interprétations avec SELFAS**
 - a Mise en évidence de l'existence de l'excès de charge
 - b Effet de l'indice de l'air, «effet cerenkov»
 - c Signal de la mort subite de la gerbe
- 5 **Conclusion et perspectives**

Plan de la présentation

1 Le rayonnement cosmique d'ultra-haute énergie

2 La radio-détection des gerbes atmosphériques

- a Bref historique
- b Radio détection selon CODALEMA & compagnie...

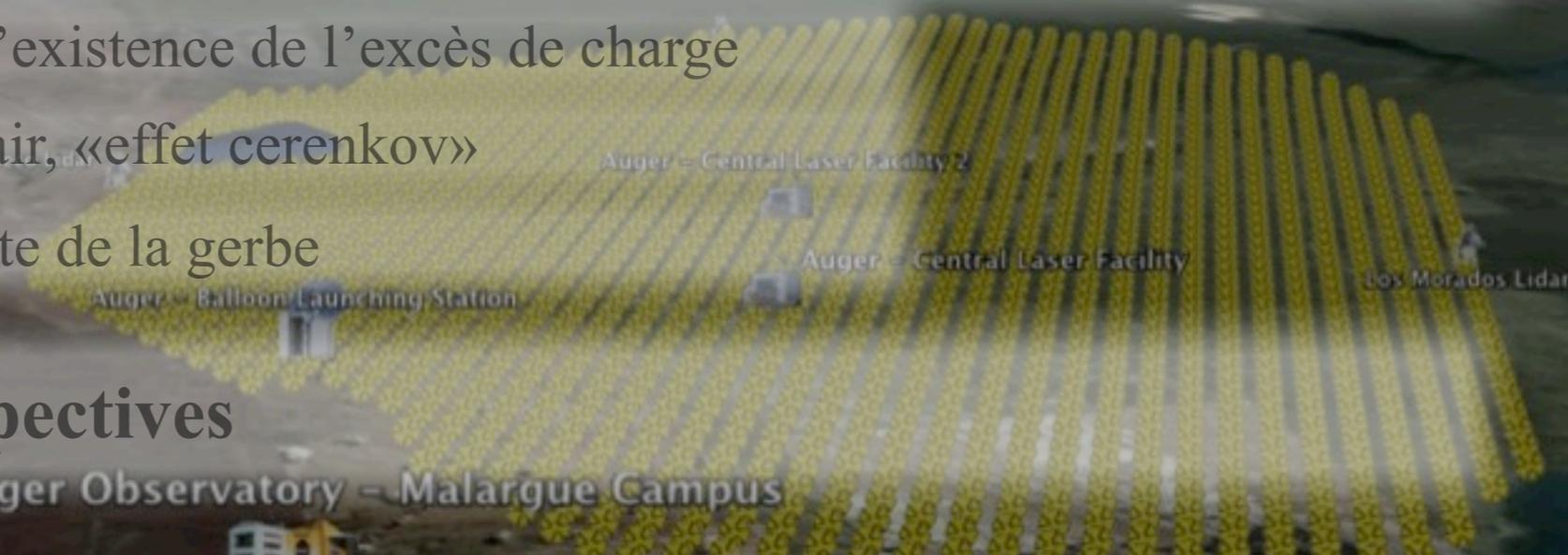
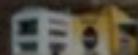
3 Nouvel outil de simulation radio des gerbes : SELFAS

4 Nouvelles interprétations avec SELFAS

- a Mise en évidence de l'existence de l'excès de charge
- b Effet de l'indice de l'air, «effet cerenkov»
- c Signal de la mort subite de la gerbe

5 Conclusion et perspectives

Pierre Auger Observatory - Malargue Campus

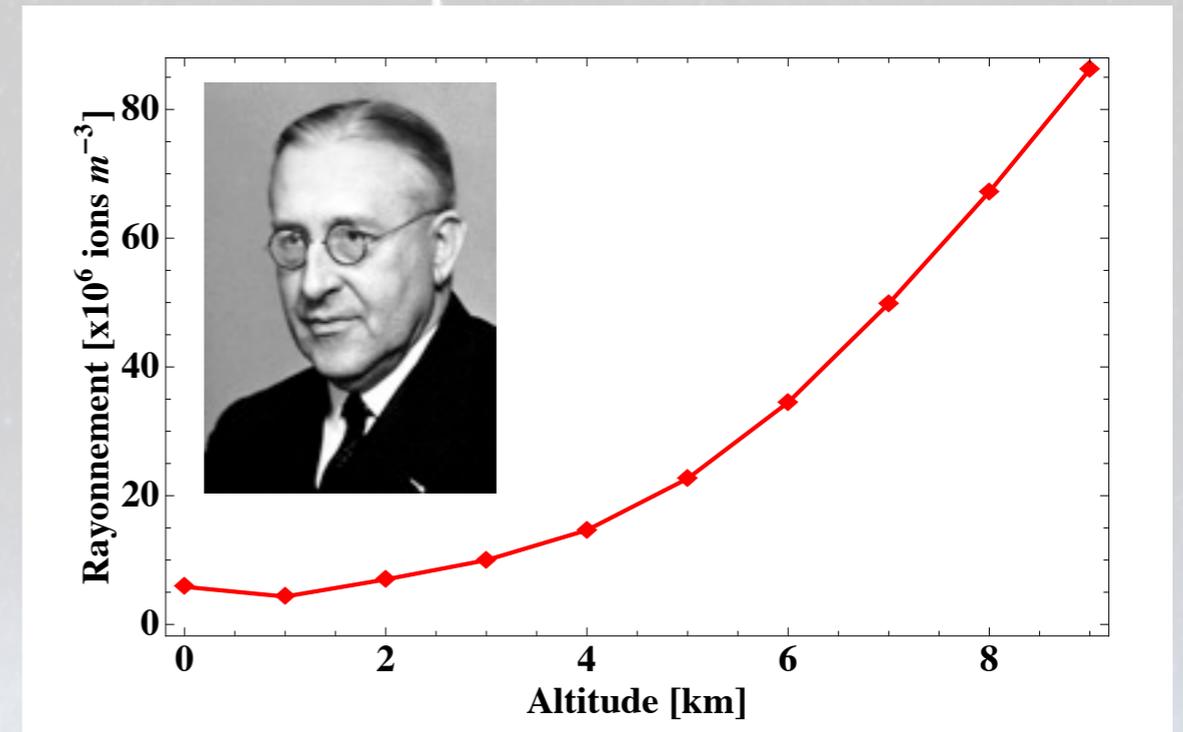


Un siècle d'observation des rayons comiques

- Découvert en 1912 par Victor Hess

Suite à une série de vols en ballon pour mesurer le taux d'ionisation de l'atmosphère avec un électroscope

Il fait l'hypothèse qu'un **rayonnement** provenant «d'en haut» ionise l'atmosphère et décharge son électroscope



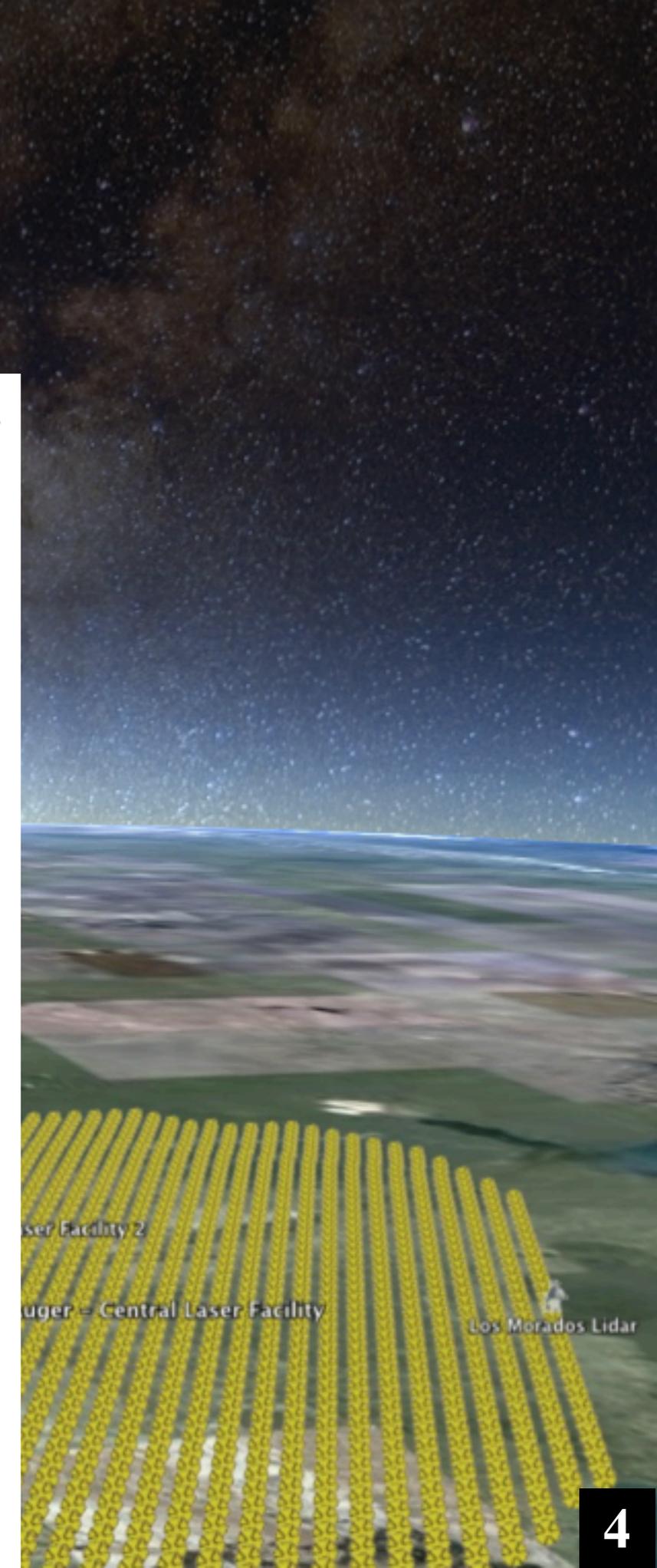
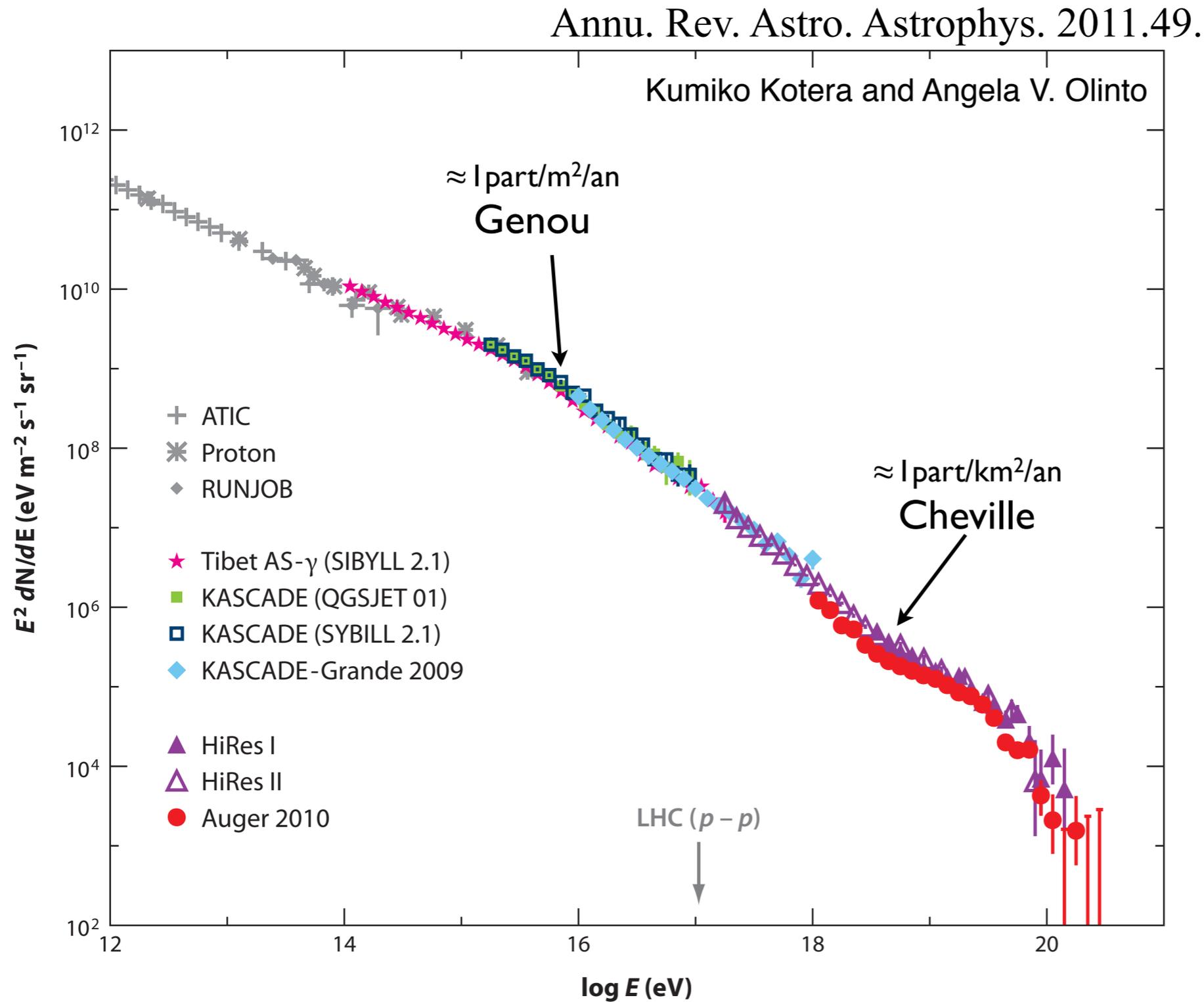
- Aujourd'hui interprété comme un flux de particules cosmiques d'énergie variable qui bombarde la terre

Cent ans après sa découverte, l'origine et nature du rayonnement cosmique restent encore mal déterminées

À haute énergie :

**Origine
Nature....?**

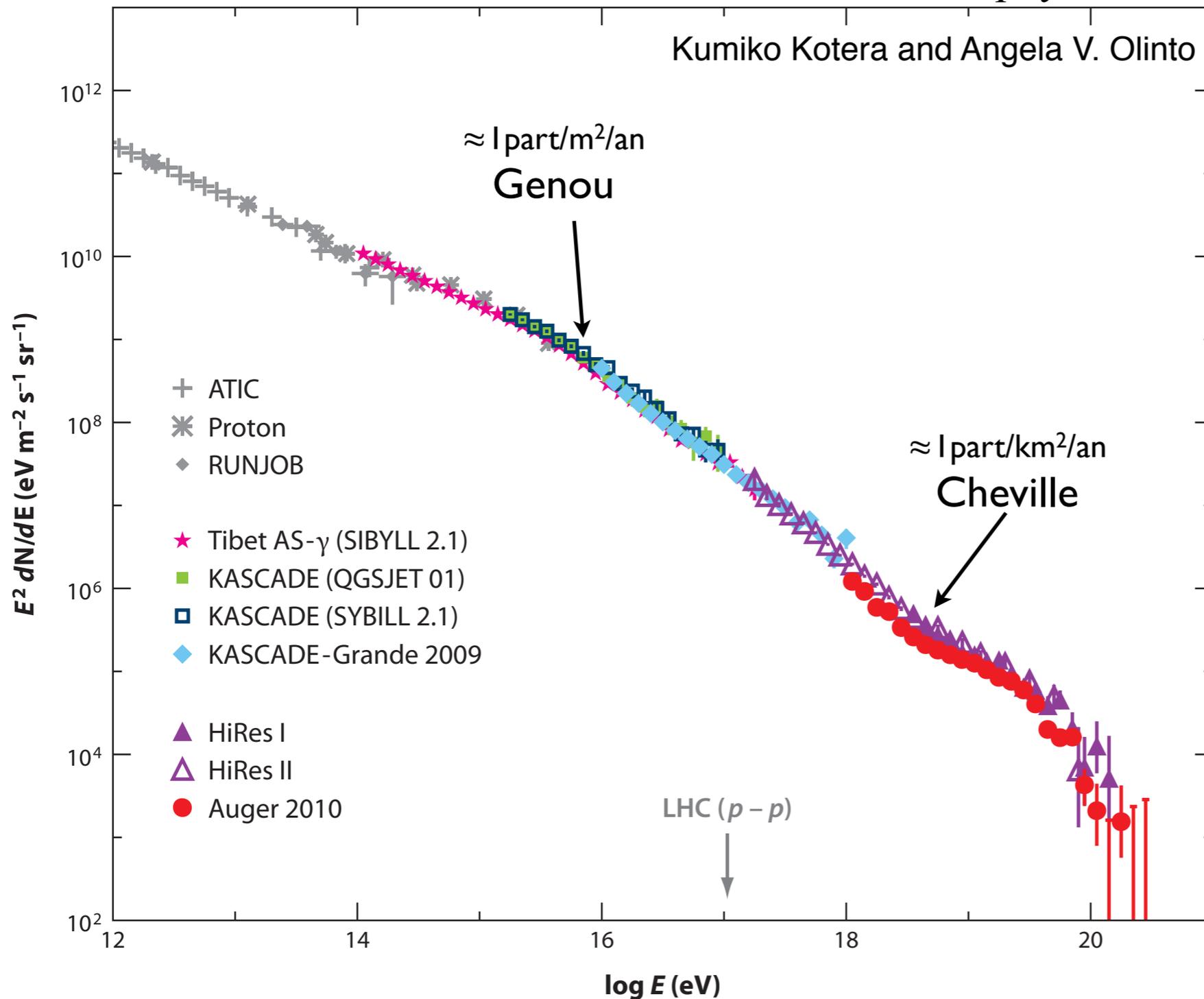
Flux du rayonnement cosmique:



Flux du rayonnement cosmique:

Annu. Rev. Astro. Astrophys. 2011.49.

Kumiko Kotera and Angela V. Olinto

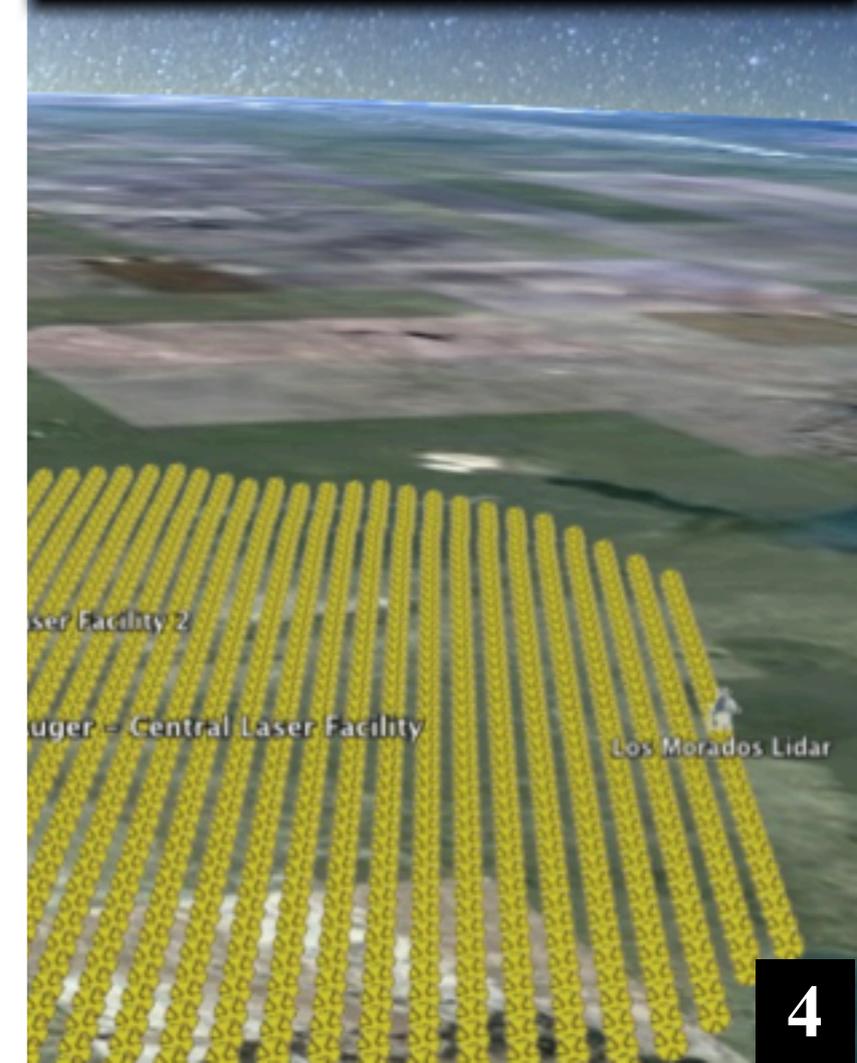


Première source

Soleil : jusqu'à 10^{10} eV

≈ 200 part/ m^2/sec

(Pas sur la figure)



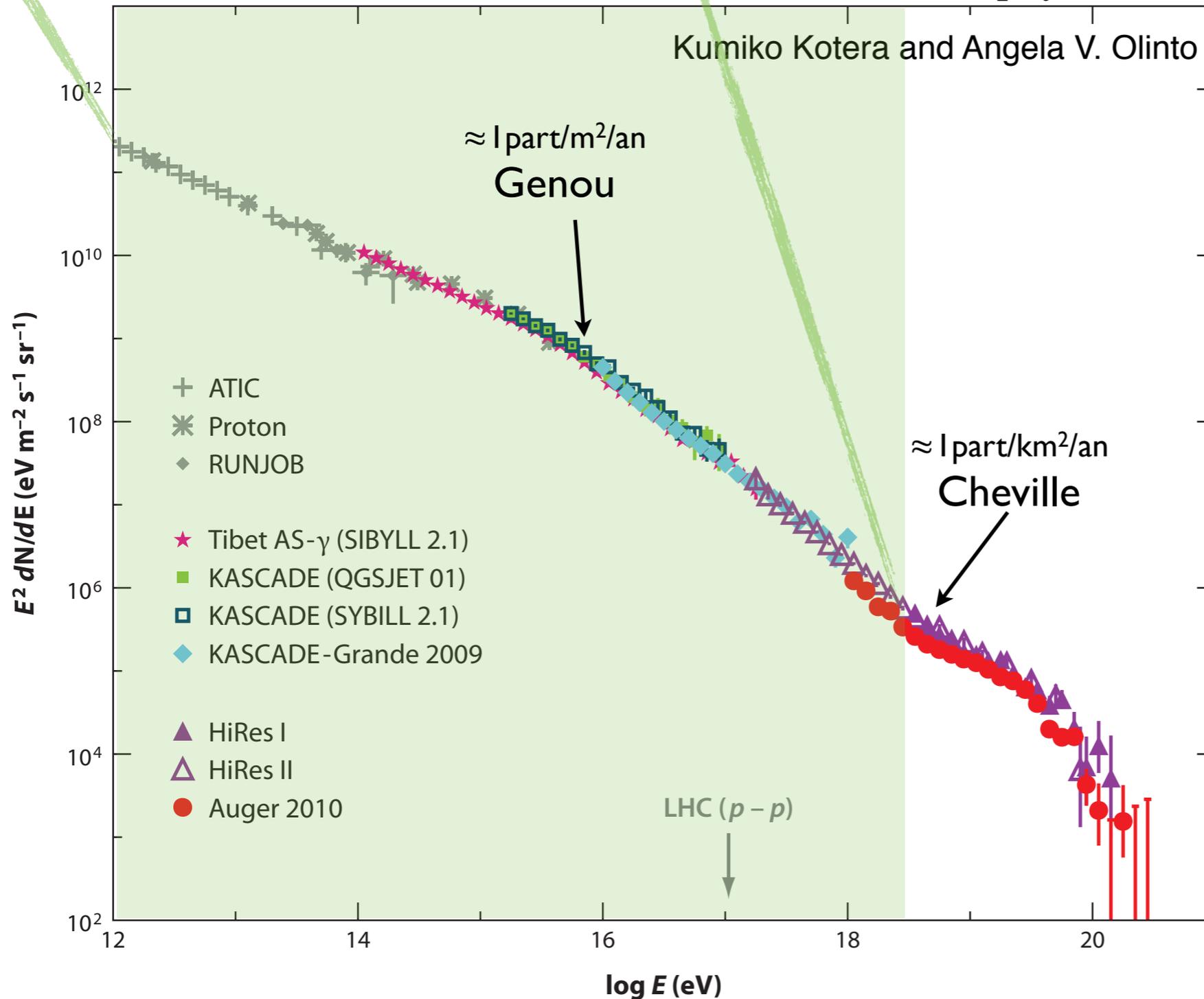
Flux du rayonnement cosmique:

Phénomènes
Galactiques:

Supernovae
Etoiles à neutrons

Annu. Rev. Astro. Astrophys. 2011.49.

Kumiko Kotera and Angela V. Olinto

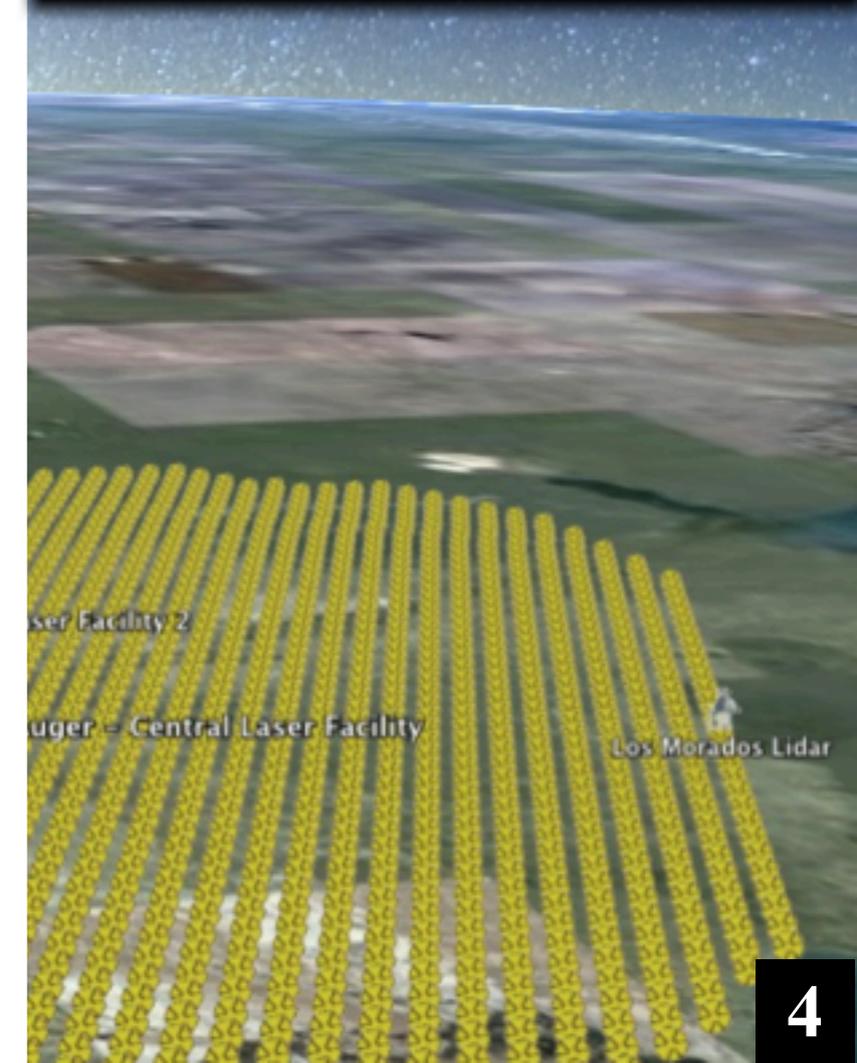


Première source

Soleil : jusqu'à 10^{10} eV

$\approx 200 \text{ part/m}^2/\text{sec}$

(Pas sur la figure)



Flux du rayonnement cosmique:

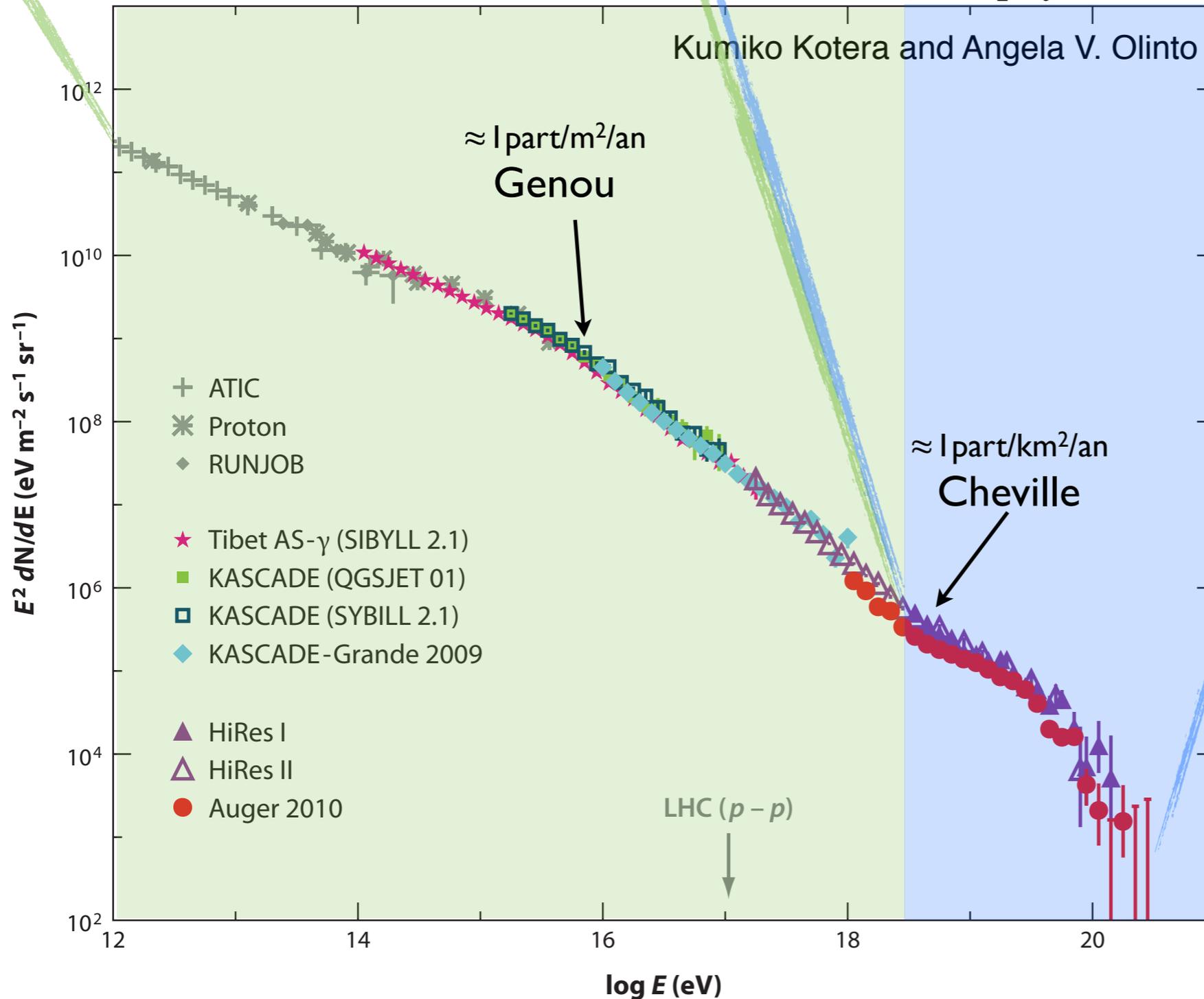
Phénomènes
Galactiques:

Supernovae
Etoiles à neutrons

Phénomènes
Extra-galactiques:

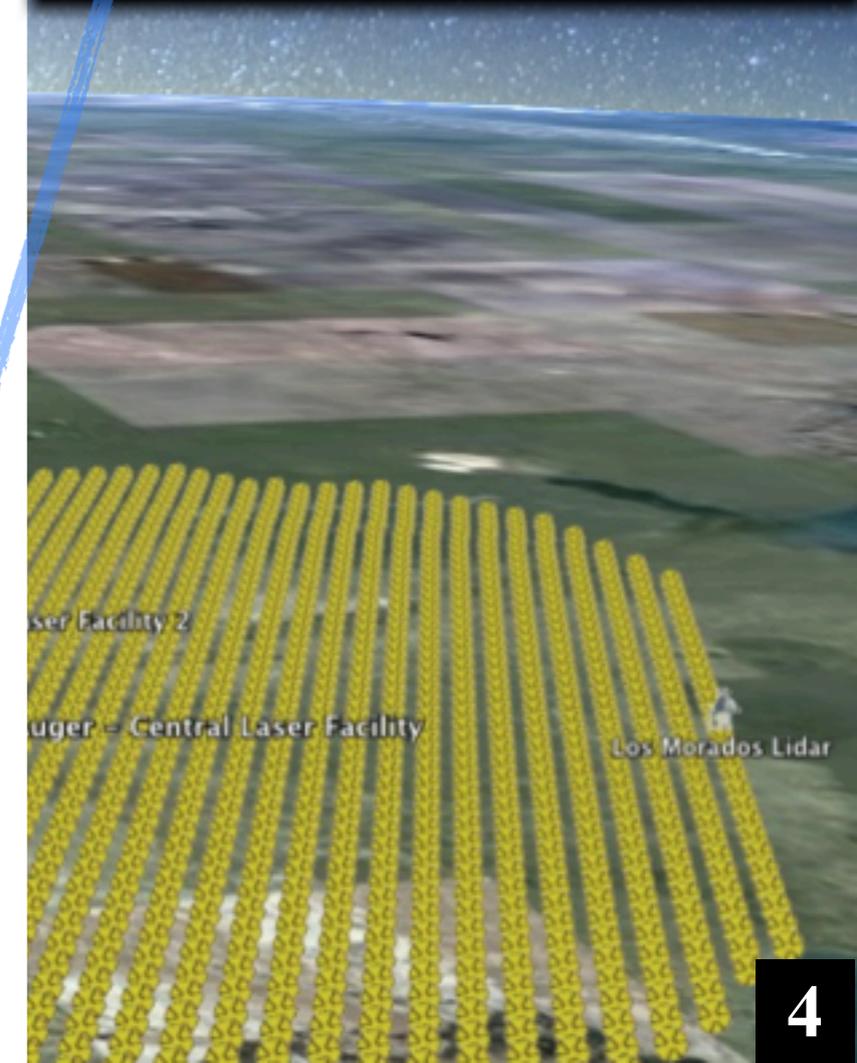
Collisions galaxies
Sursauts gamma
Noyaux actifs de galaxies
... ????

Annu. Rev. Astro. Astrophys. 2011.49.



Première source

Soleil : jusqu'à 10^{10} eV
 $\approx 200 \text{ part}/\text{m}^2/\text{sec}$
(Pas sur la figure)



Flux du rayonnement cosmique:

Phénomènes
Galactiques:

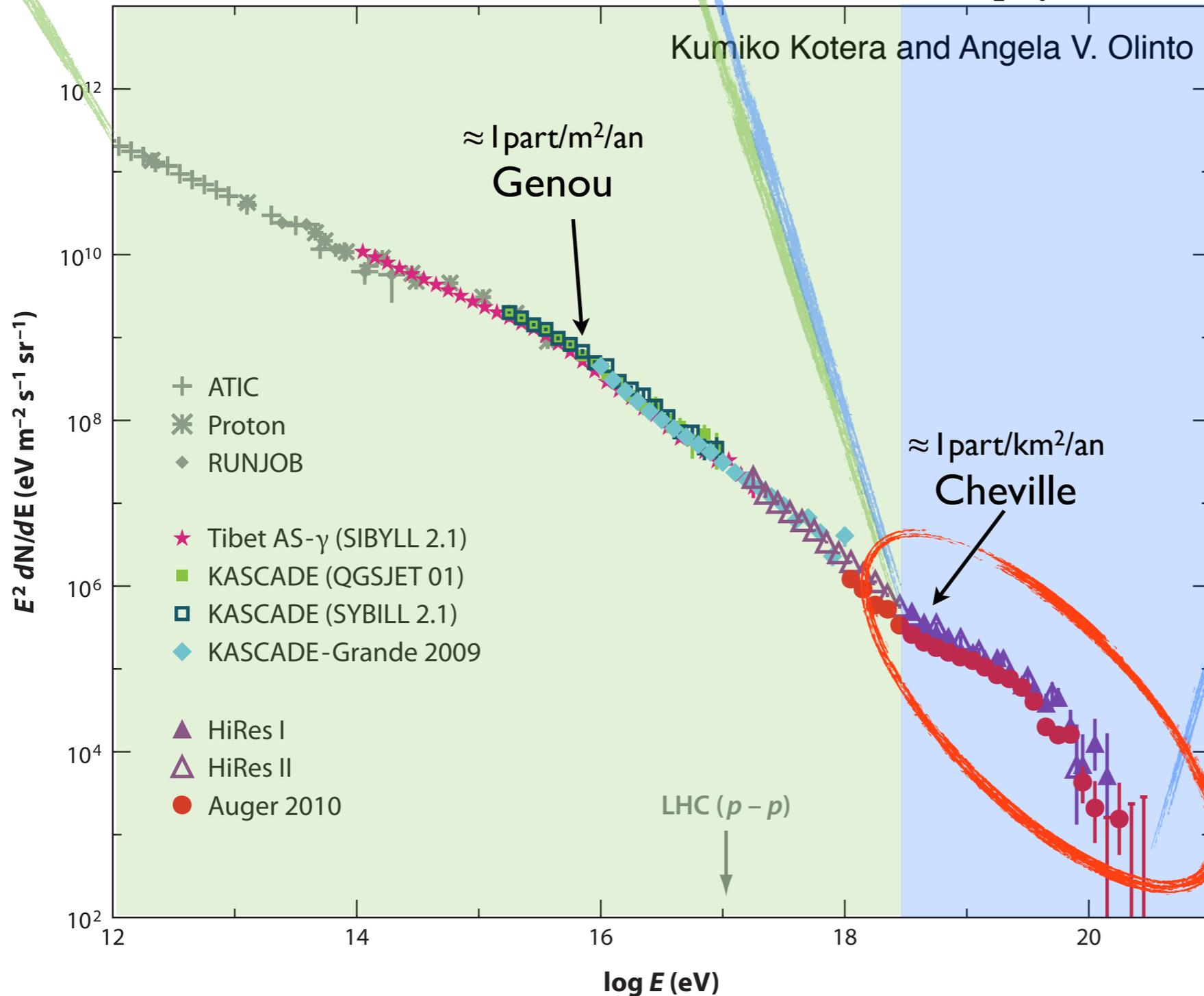
Supernovae
Etoiles à neutrons

Phénomènes
Extra-galactiques:

Collisions galaxies
Sursauts gamma
Noyaux actifs de galaxies
... ????

Annu. Rev. Astro. Astrophys. 2011.49.

Kumiko Kotera and Angela V. Olinto



Première source

Soleil : jusqu'à 10^{10} eV
 ≈ 200 part/ m^2 /sec
(Pas sur la figure)

Enjeu :

**Comprendre ce qui se
passe
au-delà de 10^{18} eV**

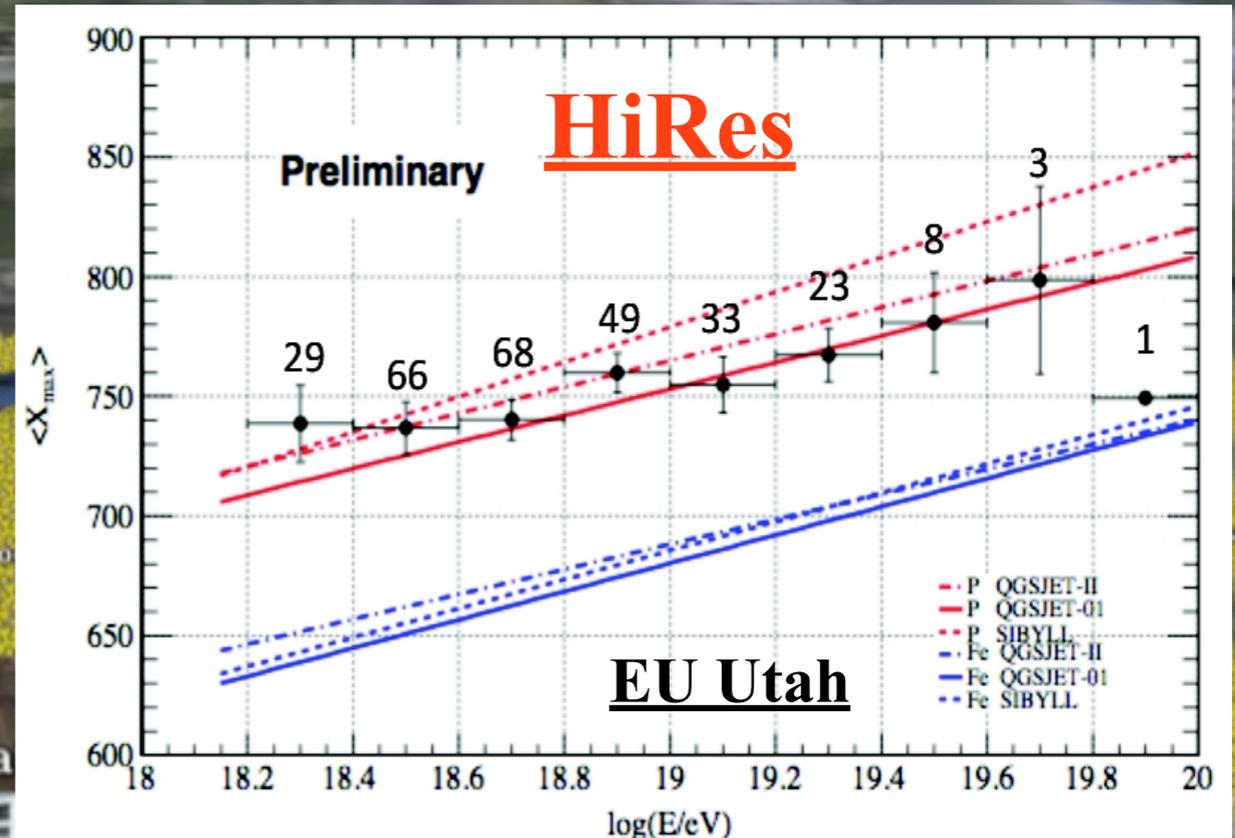
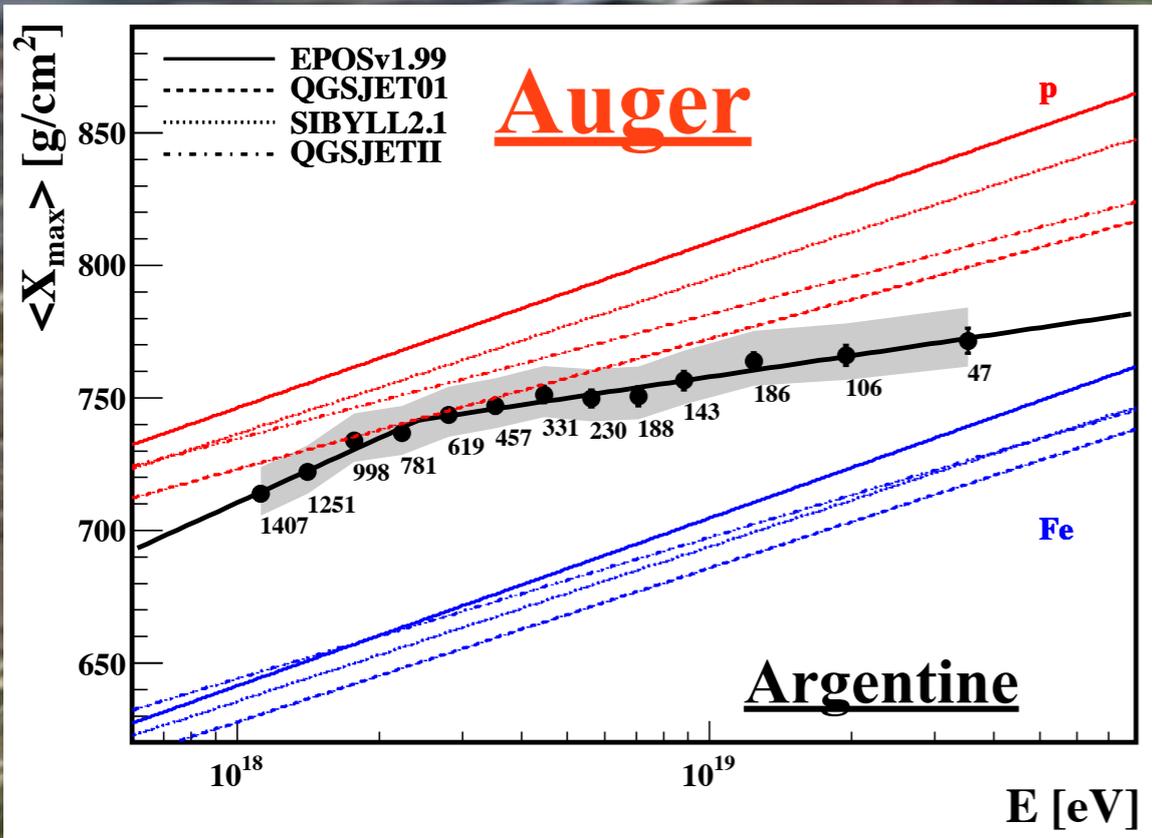
→ Source ?

→ Nature ?

Etat des lieux à ultra haute énergie : Premiers éléments de réponse

- Nature

Au-delà de 10^{19} eV, l'observatoire Pierre Auger \rightarrow Noyaux lourds
 Mais l'expérience Hires \rightarrow Compatible proton



Etat des lieux à ultra haute énergie : Premiers éléments de réponse

• Nature

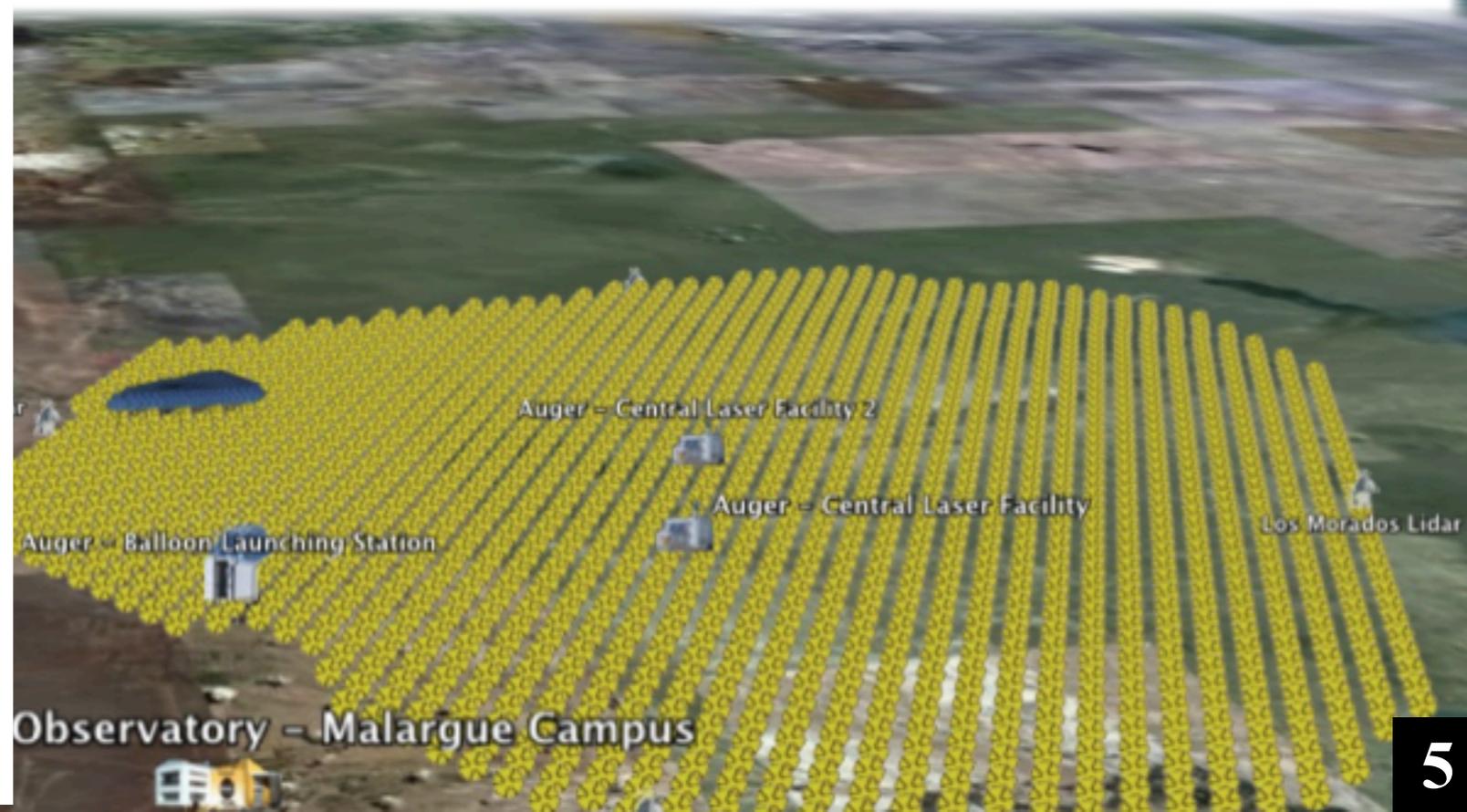
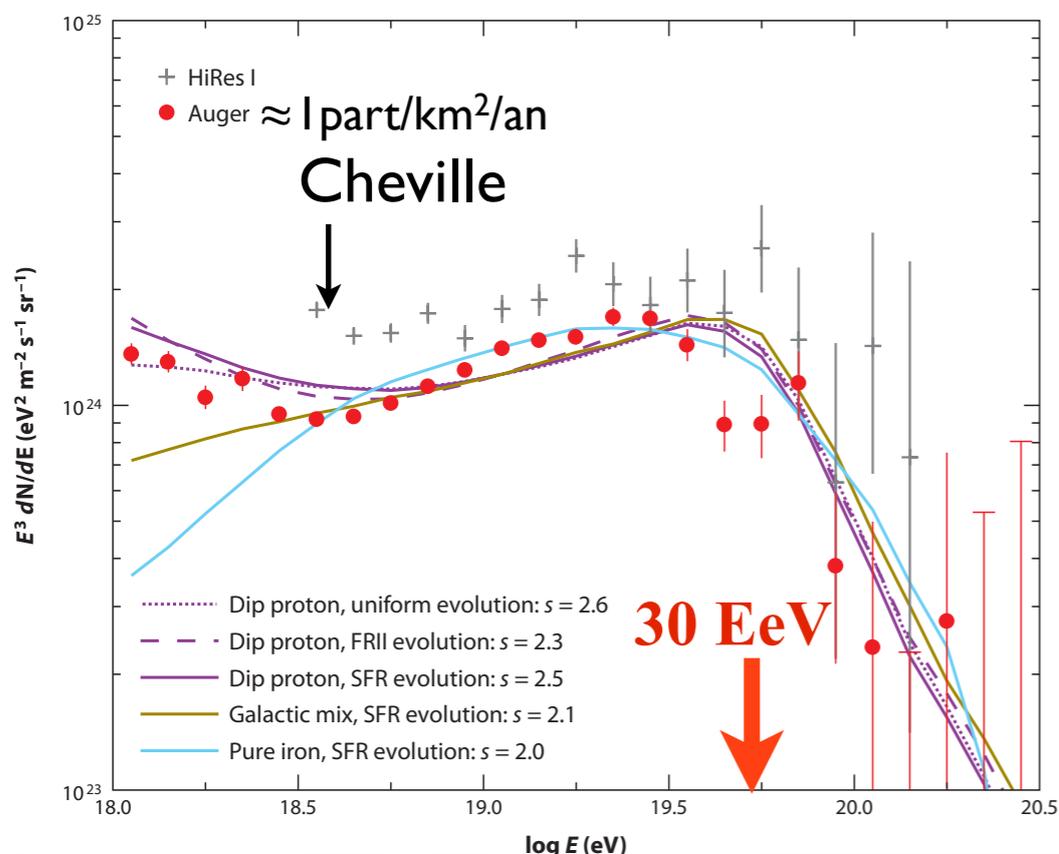
Au-delà de 10^{19} eV, l'observatoire Pierre Auger \rightarrow **Noyaux lourds**
 Mais l'expérience Hires \rightarrow **Compatible proton**

• Spectre en énergie

Obs. P.Auger + Hires \rightarrow

Coupure GZK observée

Prédite en 1966 au-delà de 30 EeV
 Interaction avec le fond diffus cosmologique



Etat des lieux à ultra haute énergie : Premiers éléments de réponse

- Nature

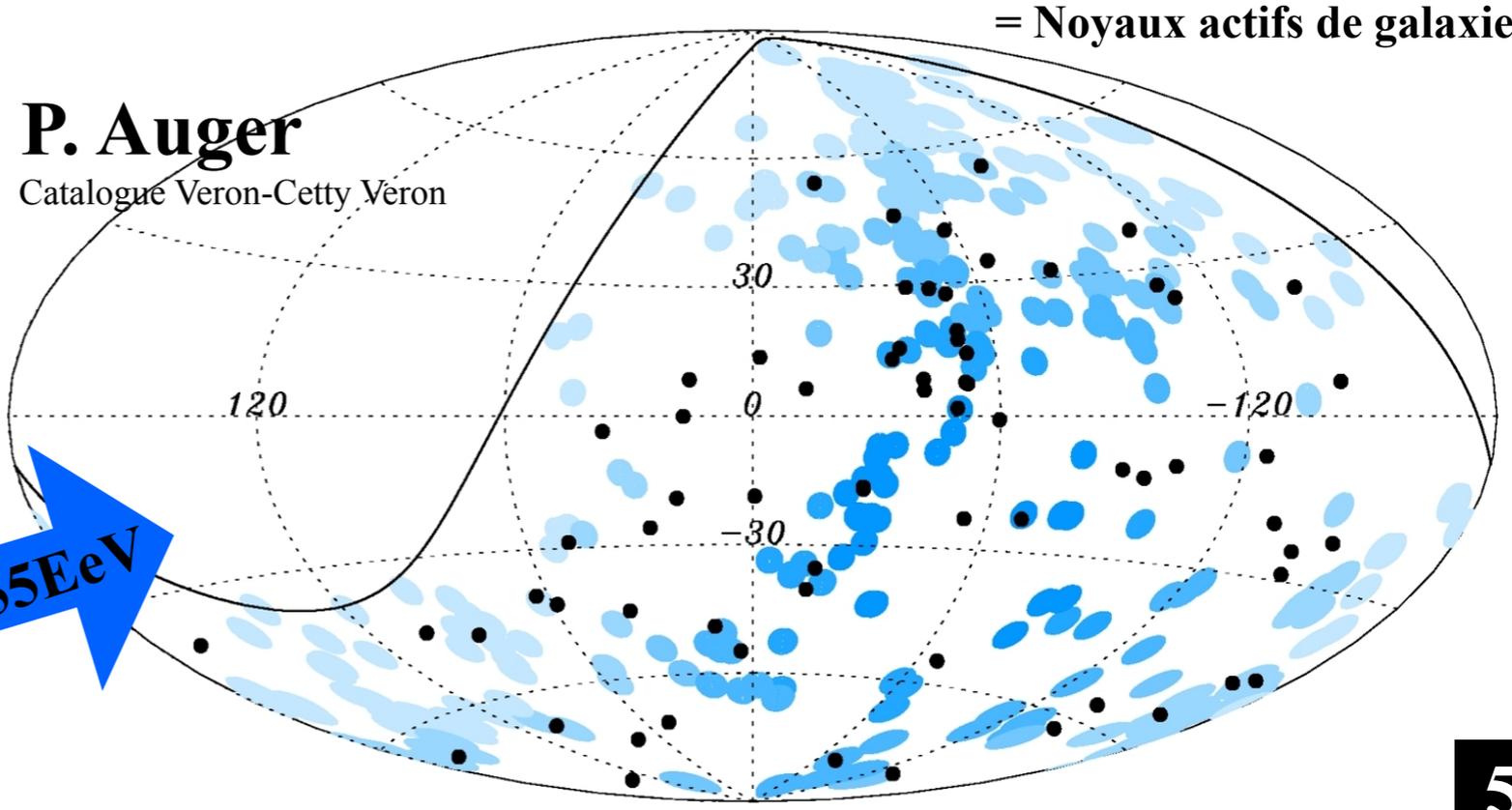
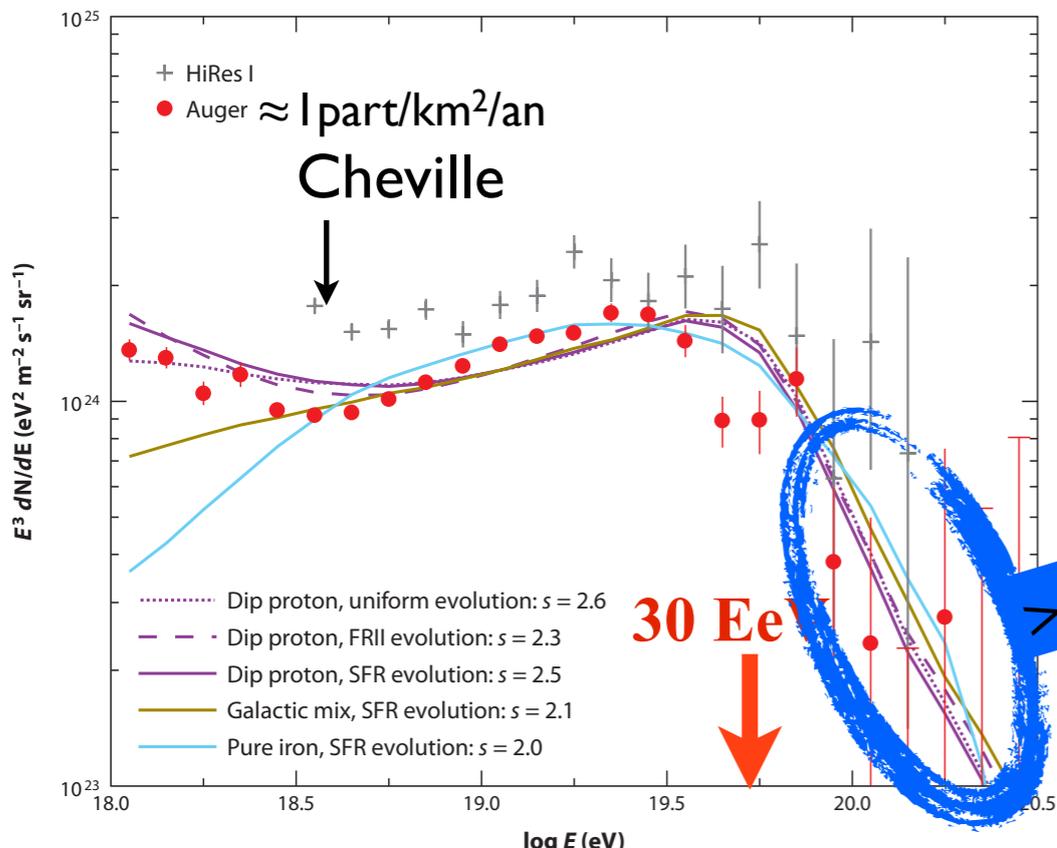
Au-delà de 10^{19} eV, l'observatoire Pierre Auger \rightarrow **Noyaux lourds**
 Mais l'expérience Hires \rightarrow **Compatible proton**

- Spectre en énergie

Obs. P.Auger + Hires \rightarrow **Coupure GZK observée**
 Prédite en 1966 au-delà de 30 EeV
 Interaction avec le fond diffus cosmologique

- Origine

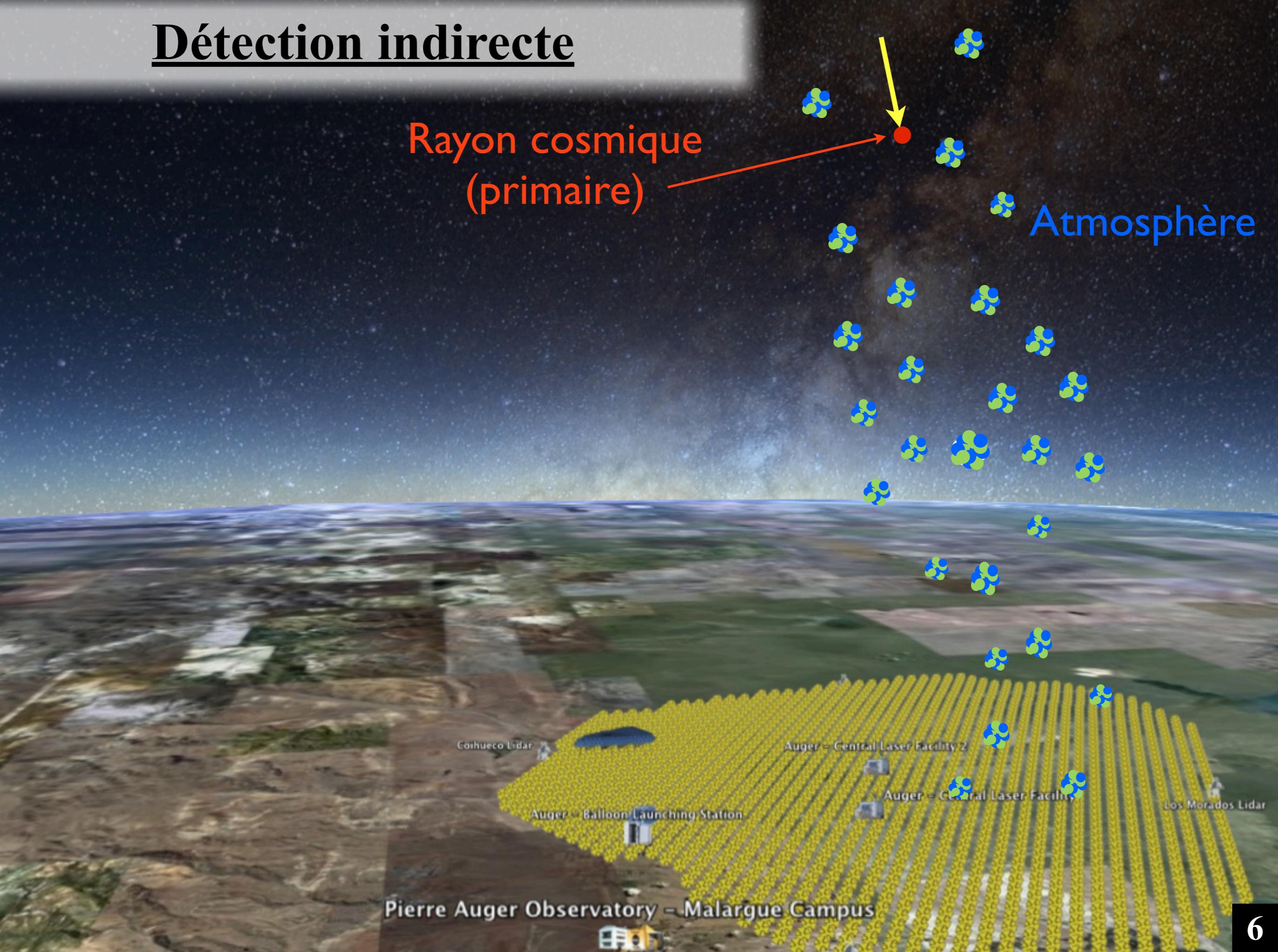
Obs P.Auger \rightarrow **> 55 EeV** • **Directions d'arrivée non isotropes**
 • **Corrélation avec AGN**



Détection indirecte

Rayon cosmique
(primaire)

Atmosphère



Pierre Auger Observatory - Malargue Campus

Détection indirecte

Rayon cosmique
(primaire)

Atmosphère

Progression dans l'atmosphère
qui se densifie

Jusqu'à une première
interaction

Cascade de particules
secondaires

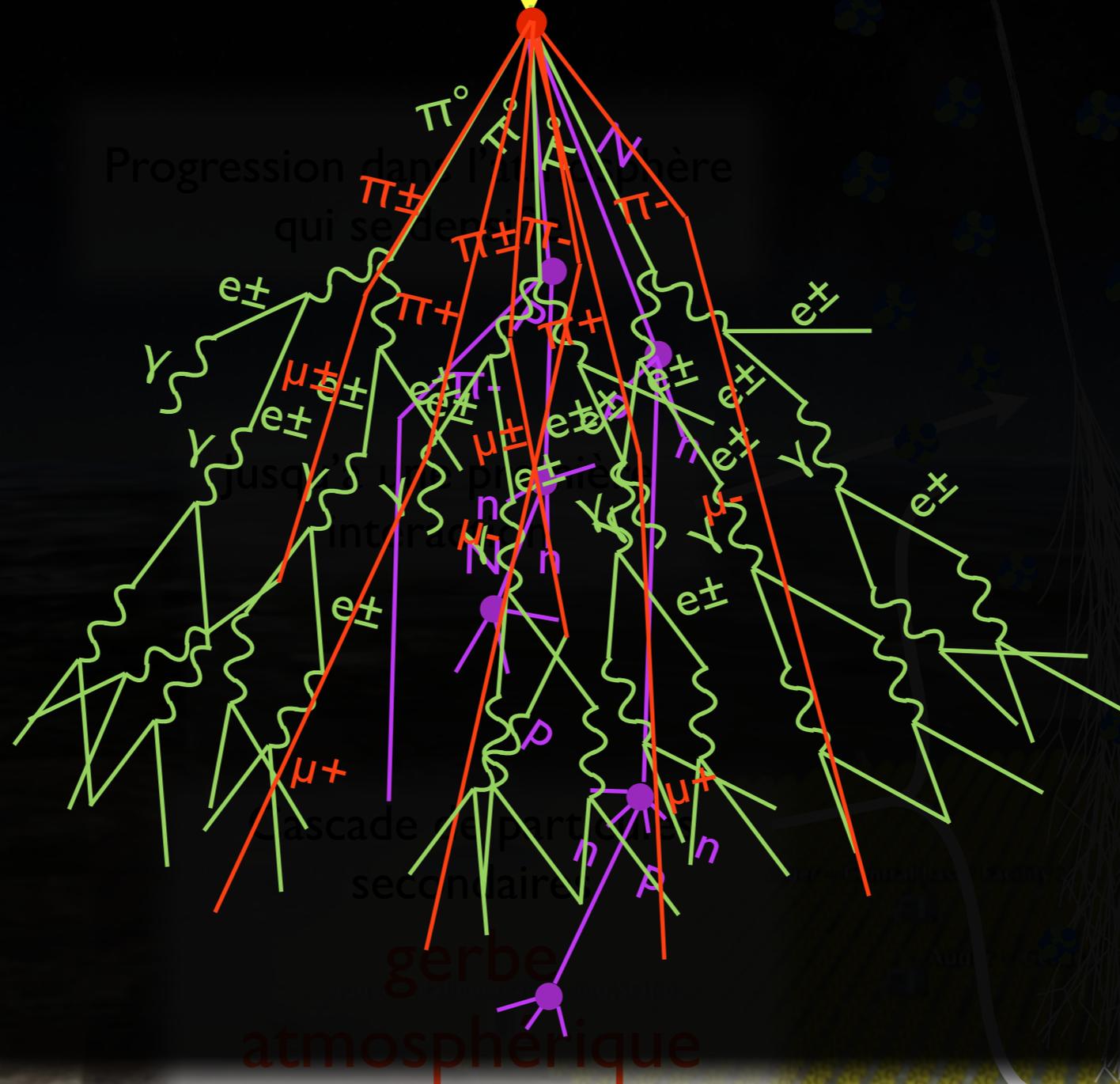
gerbe
atmosphérique

Pierre Auger Observatory - Malargue Campus

Détection indirecte

Particule
primaire

Composition de
la cascade



Atmosphère

Détection indirecte

Particule
primaire

Composition de
la cascade

Atmosphère

Progression dans l'atmosphère
qui se densifie

Jusqu'à une première
interaction

Cascade de particules
secondaires

gerbe
atmosphérique

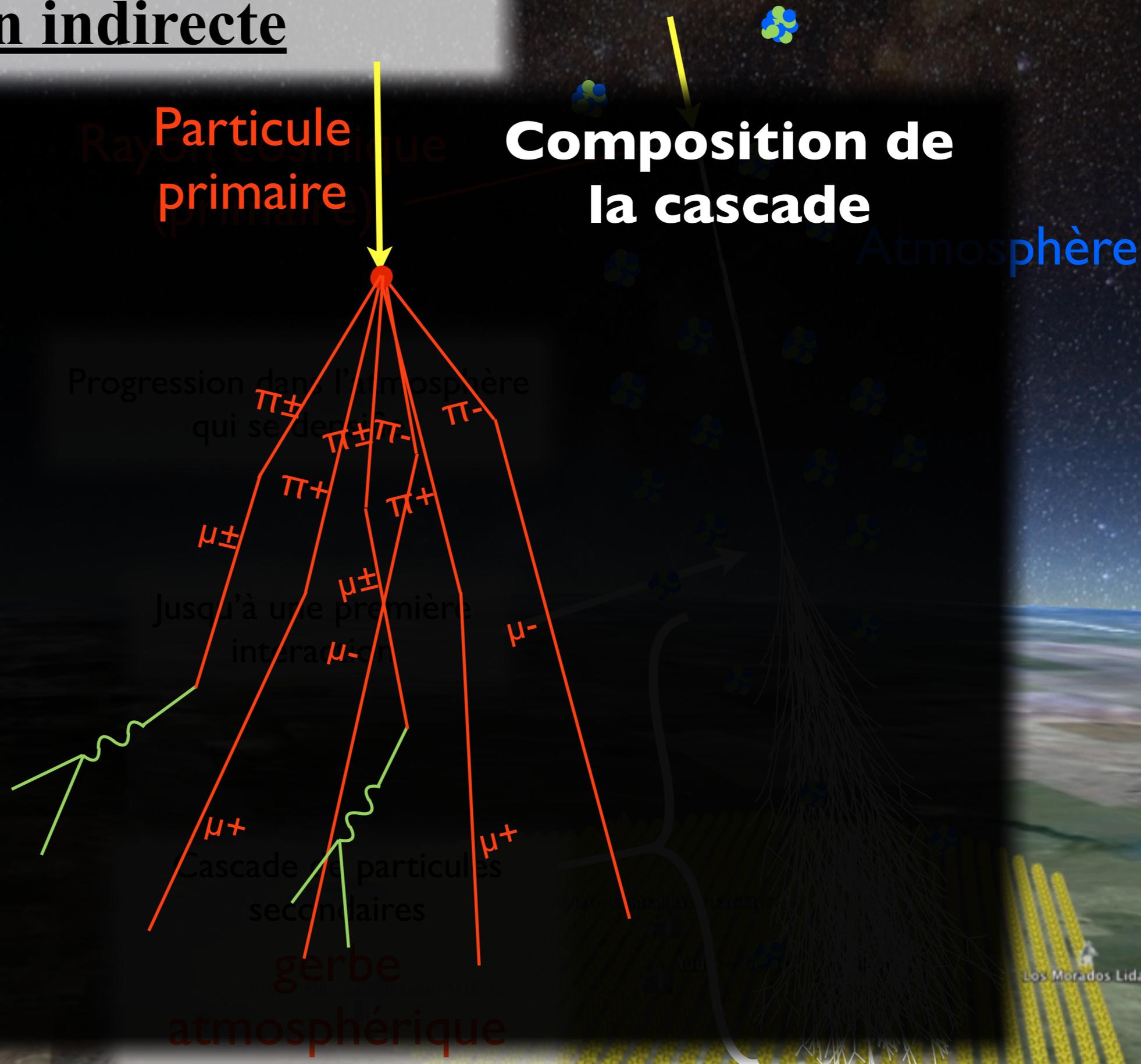
Pierre Auger Observatory - Malargue Campus

Los Morados Lidar

Détection indirecte

Particule
primaire

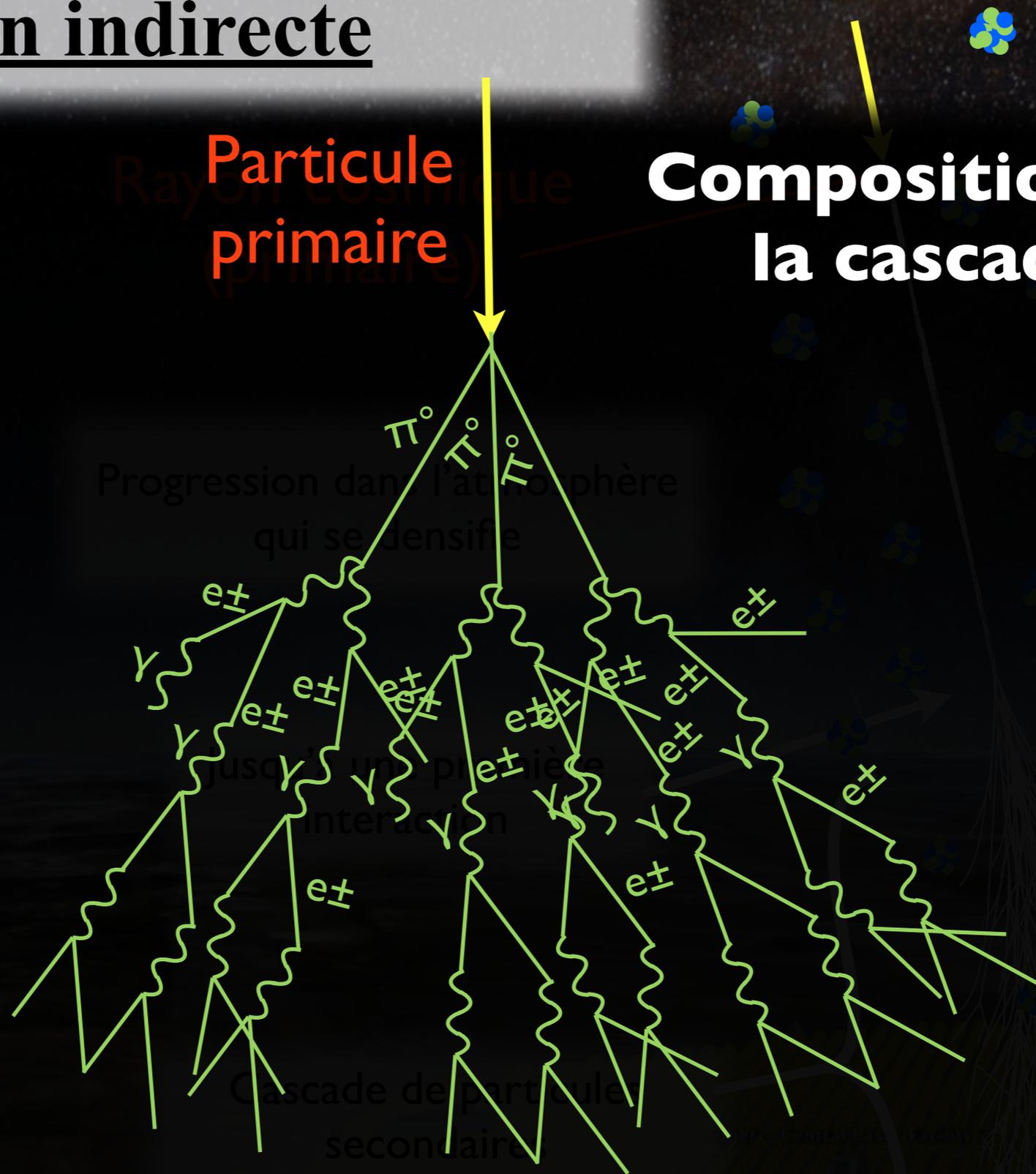
Composition de
la cascade



Détection indirecte

Particule
primaire

Composition de
la cascade



Progression dans l'atmosphère
qui se densifie

gerbe
atmosphérique

Gerbes atmosphériques : observables? Obs. P.Auger

3000 km²

1660 cuves

27 télescopes de fluorescence

Auger

Argentine

Coihuco Lidar

Auger - Central Laser Facility 2

Auger - Balloon Launching Station

Auger - Central Laser Facility 1

Los Morados Lidar

70 km

≈20km²
pour 10¹⁹ eV

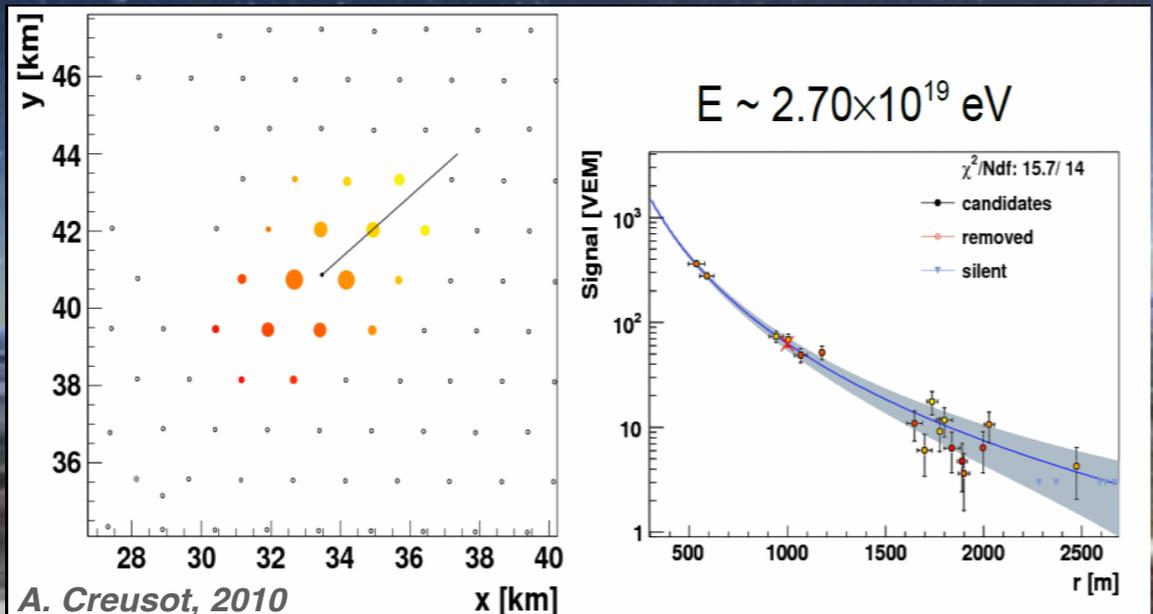
Pierre Auger Observatory - Malargue Campus



Gerbes atmosphériques : observables? Obs. P.Auger

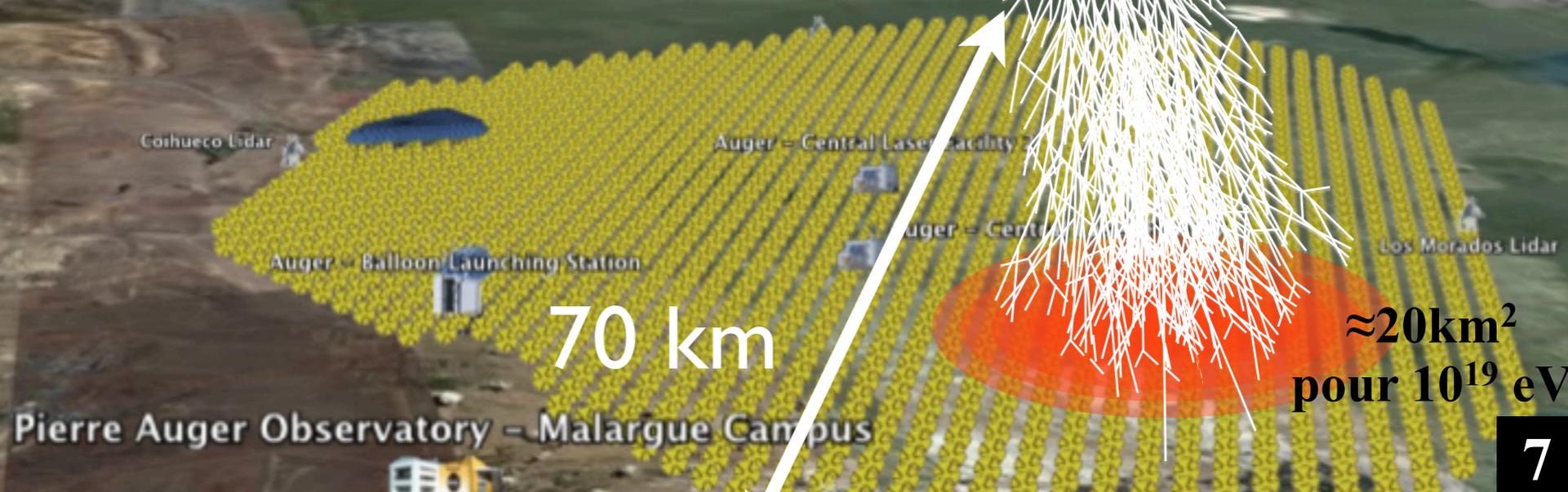
Particules au sol avec les détecteurs de surface. Auger : cuves Cerenkov (SD)

Seulement la fin de la gerbe



3000 km²
1660 cuves
27 télescopes de fluorescence

Auger
Argentine



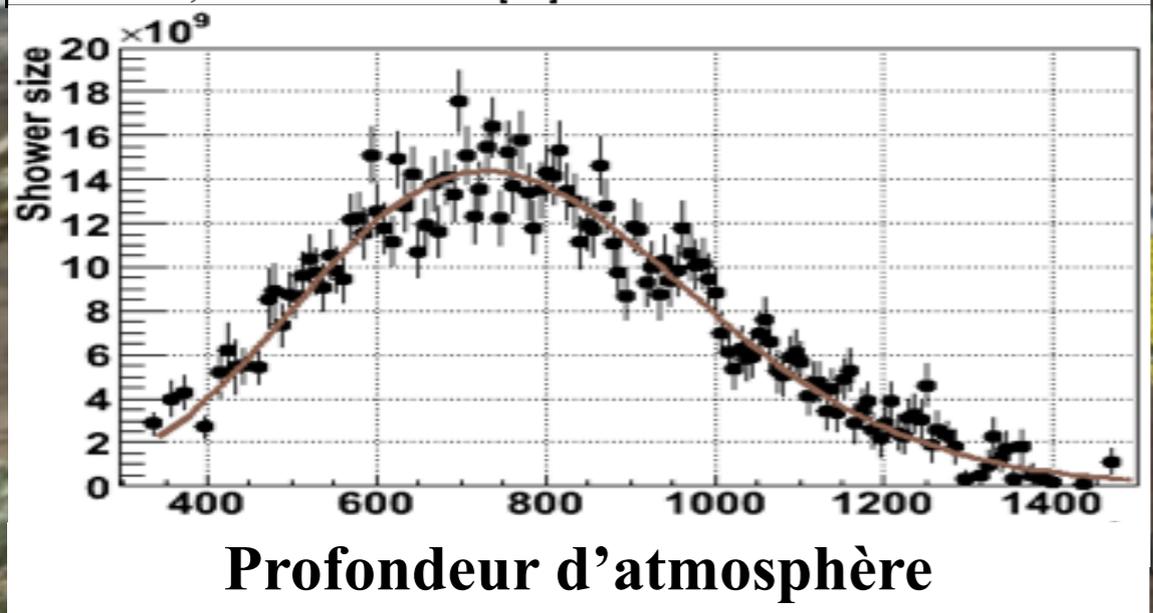
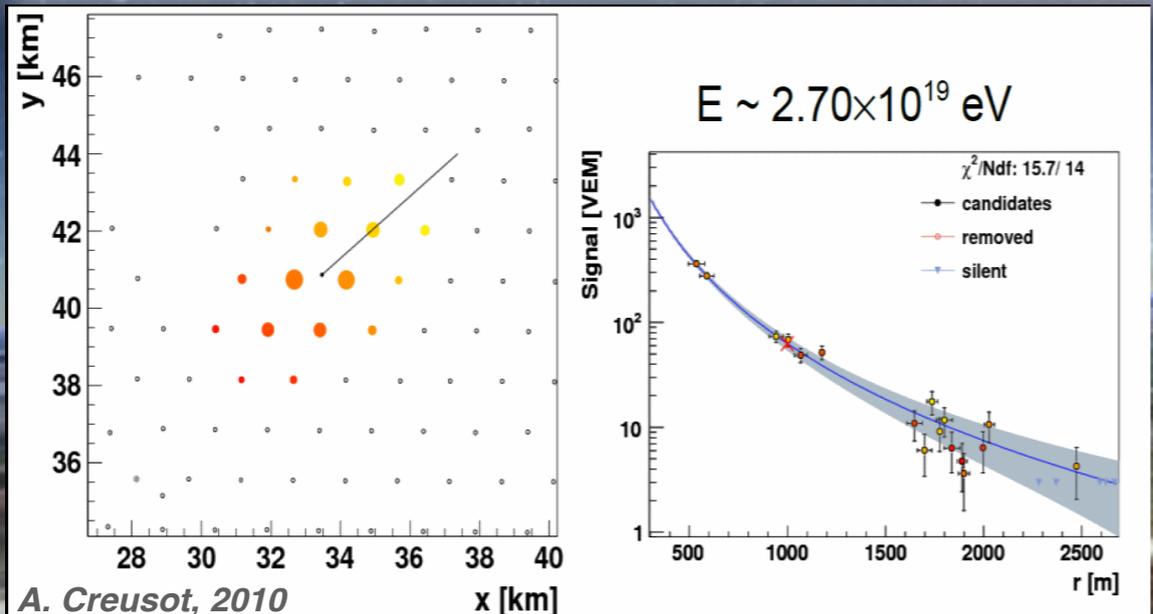
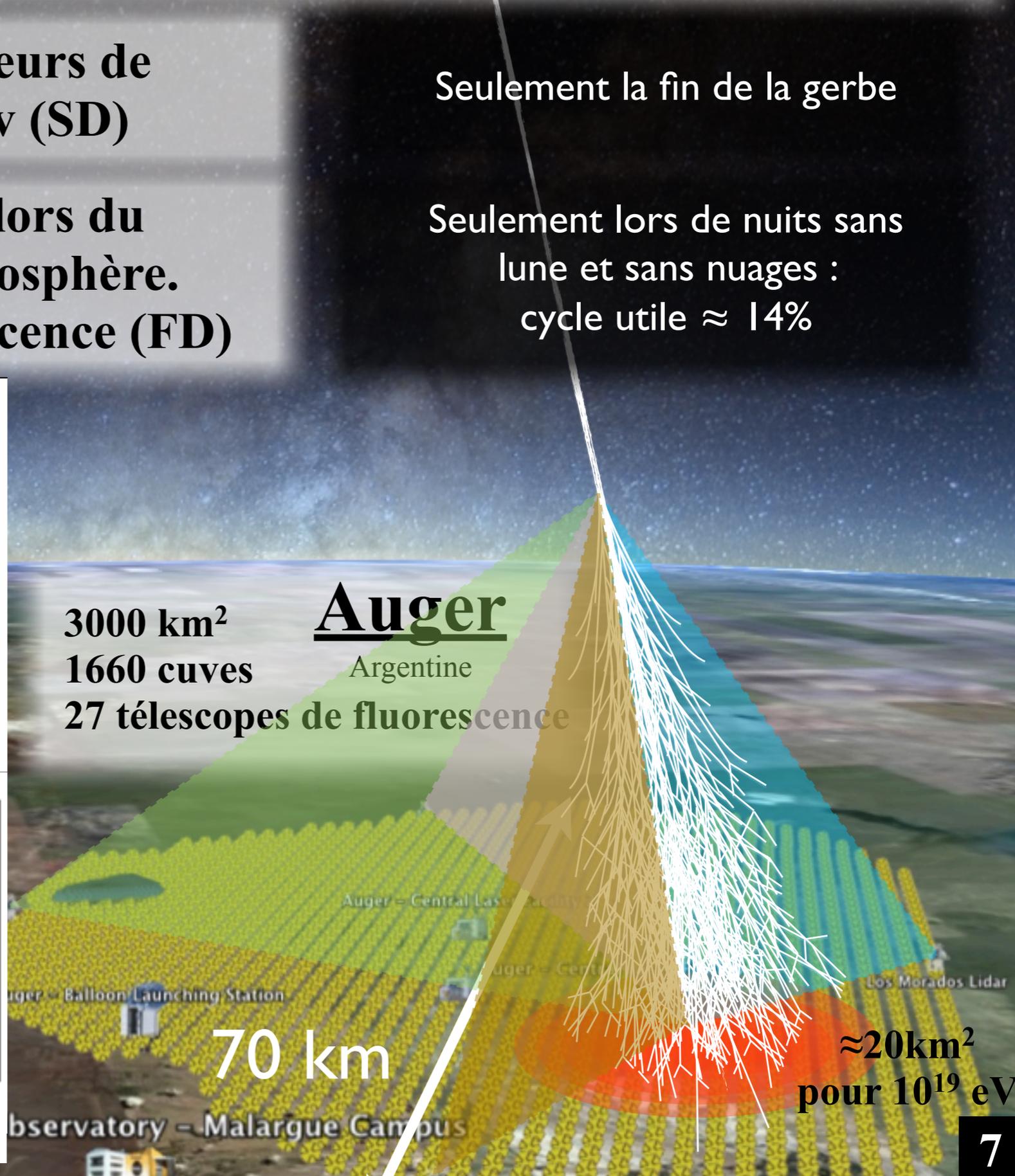
Gerbes atmosphériques : observables? Obs. P.Auger

Particules au sol avec les détecteurs de surface. Auger : cuves Cerenkov (SD)

Lumière de fluorescence émise lors du passage de la gerbes dans l'atmosphère. Auger : 27 télescopes de fluorescence (FD)

Seulement la fin de la gerbe

Seulement lors de nuits sans lune et sans nuages : cycle utile $\approx 14\%$



Gerbes atmosphériques : observables? Obs. P.Auger

Particules au sol avec les détecteurs de surface. Auger : cuves Cerenkov (SD)

Lumière de fluorescence émise lors du passage de la gerbes dans l'atmosphère. Auger : 27 télescopes de fluorescence (FD)

Seulement la fin de la gerbe

Seulement lors de nuits sans lune et sans nuages : cycle utile $\approx 14\%$

Malgré 3000 km² SD + 27 FD

Statistique reste faible \Rightarrow Nature, Origine
 ~ 30 par an à 10 EeV

Augmenter la surface $\Rightarrow > 20000$ km²
 \Rightarrow Coût...

Auger nord : non financé

JEM-EUSO : phase de R&D

Ou exploitation d'une 3^{ème} observable :

\Rightarrow L'émission radio des gerbes 70 km

Auger

Argentine

3000 km²
60 cuves
27 télescopes de fluorescence

Auger - Central Laser Facility

Auger - Central Laser Facility

Auger - Balloon Launching Station

Los Morados Lidar

≈ 20 km²
pour 10¹⁹ eV

Pierre Auger Observatory - Malargue Campus

Plan de la présentation

- 1 **Le rayonnement cosmique d'ultra haute énergie**
- 2 **La radio détection des gerbes atmosphériques**
 - a Bref historique
 - b Radio détection selon CODALEMA & compagnie...
- 3 **Nouvel outil de simulation radio des gerbes : SELFAS**
- 4 **Nouvelles interprétations avec SELFAS**
 - a Mise en évidence de l'existence de l'excès de charge
 - b Effet de l'indice de l'air, «effet cerenkov»
 - c Signal de la mort subite de la gerbe
- 5 **Conclusion et perspectives**

Plan de la présentation

1 Le rayonnement cosmique d'ultra haute énergie

2 **La radio détection des gerbes atmosphériques**

a Bref historique

b Radio détection selon CODALEMA & compagnie...

3 **Nouvel outil de simulation radio des gerbes : SELFAS**

4 **Nouvelles interprétations avec SELFAS**

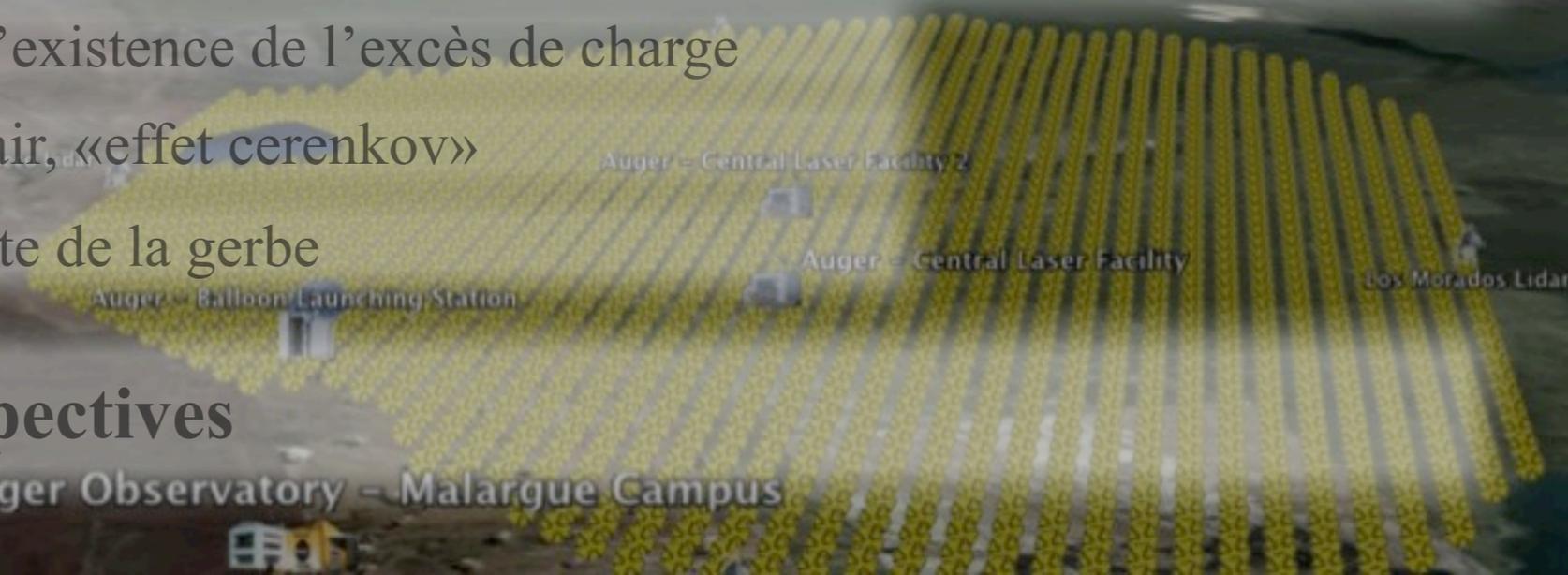
a Mise en évidence de l'existence de l'excès de charge

b Effet de l'indice de l'air, «effet cerenkov»

c Signal de la mort subite de la gerbe

5 **Conclusion et perspectives**

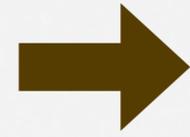
Pierre Auger Observatory - Malargue Campus



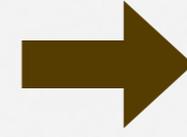
La radio-détection, technique pas si nouvelle que cela...

- **Askaryan en 1962 :**

électrons arrachés au milieu
+ annihilation positrons



**Excès de charges
négatives** dans la gerbe



Création d'un signal radio
dans le domaine du MHz



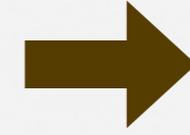
La radio-détection, technique pas si nouvelle que cela...

• Askaryan en 1962 :

électrons arrachés au milieu
+ annihilation positrons

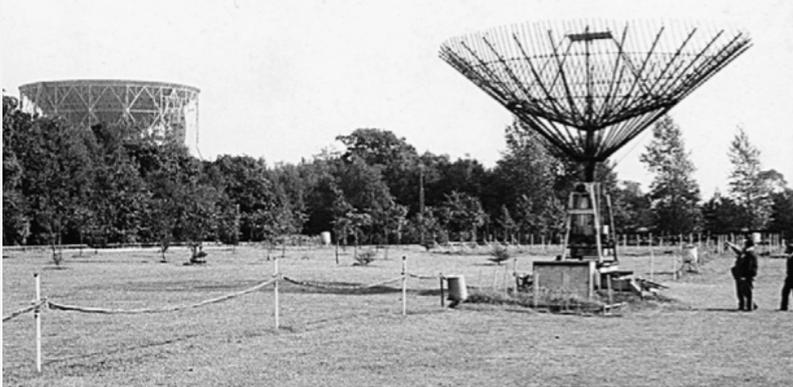


**Excès de charges
négatives** dans la gerbe

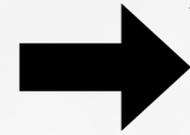


Création d'un signal radio
dans le domaine du MHz

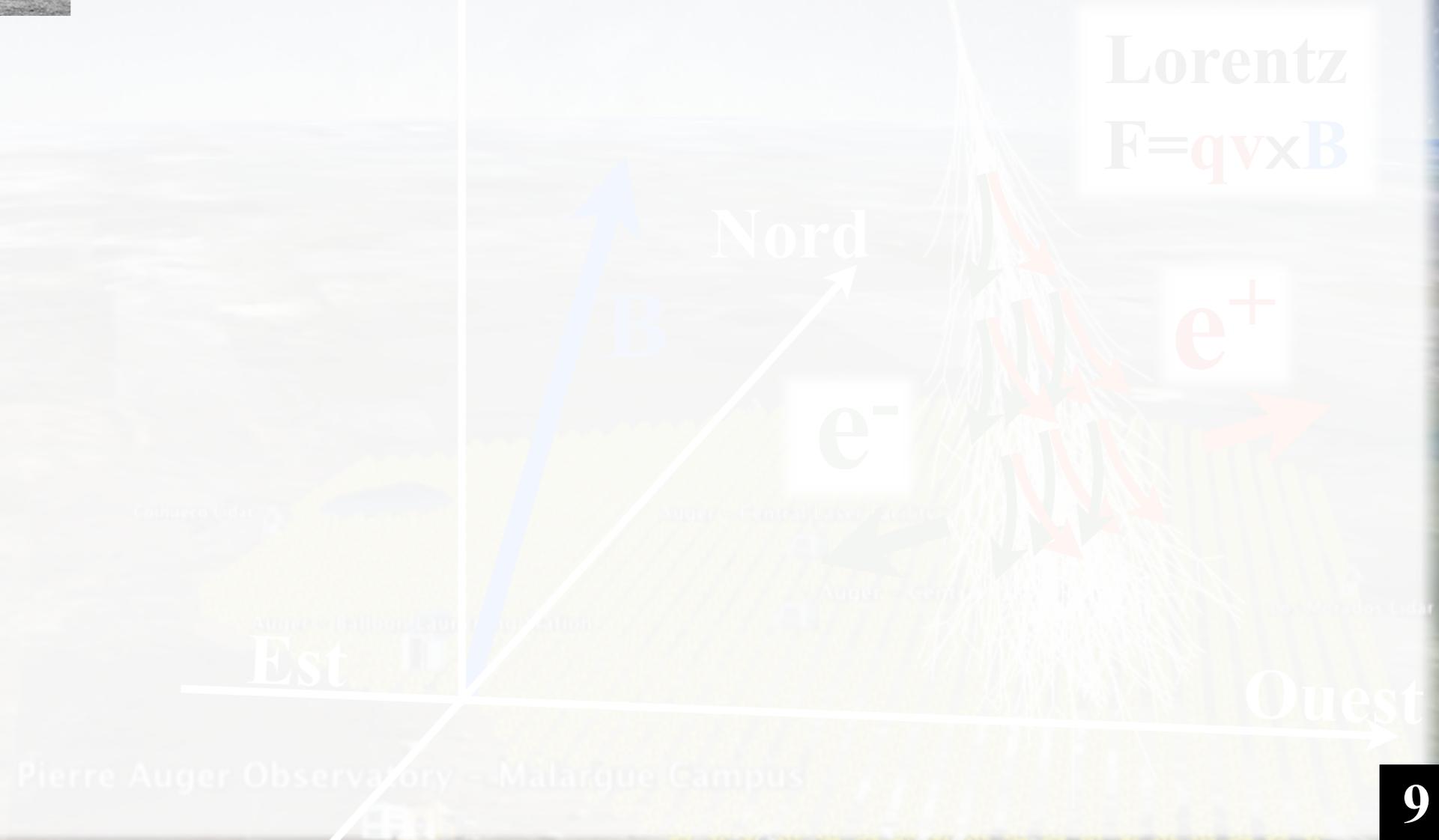
• Expérience à Jodrell Bank (Angleterre) en 1965 :



Réseau de 72 dipôles
+ détecteurs de particules



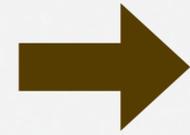
Première mise en évidence
d'un signal
radio à 44 MHz



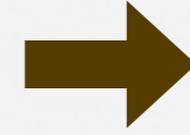
La radio-détection, technique pas si nouvelle que cela...

• Askaryan en 1962 :

électrons arrachés au milieu
+ annihilation positrons

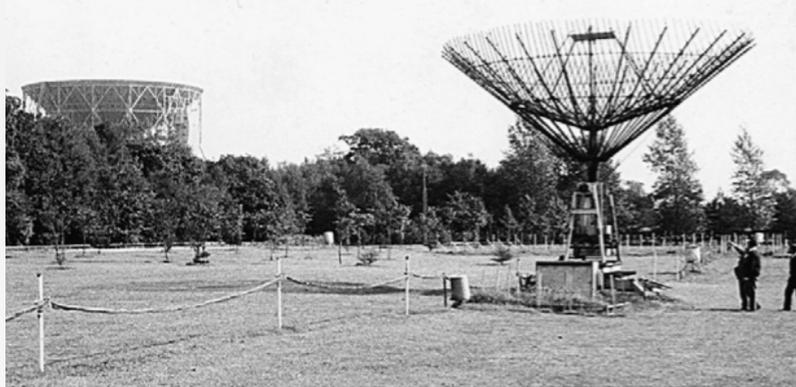


**Excès de charges
négligables** dans la gerbe

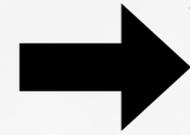


Création d'un signal radio
dans le domaine du MHz

• Expérience à Jodrell Bank (Angleterre) en 1965 :



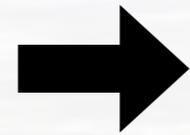
Réseau de 72 dipôles
+ détecteurs de particules



Première mise en évidence
d'un signal
radio à 44 MHz

• Kahn et Lerche en 1966 :

Champ magnétique terrestre
déviations systématiques des
particules chargées



Création d'un
courant transverse
à l'axe de la gerbe



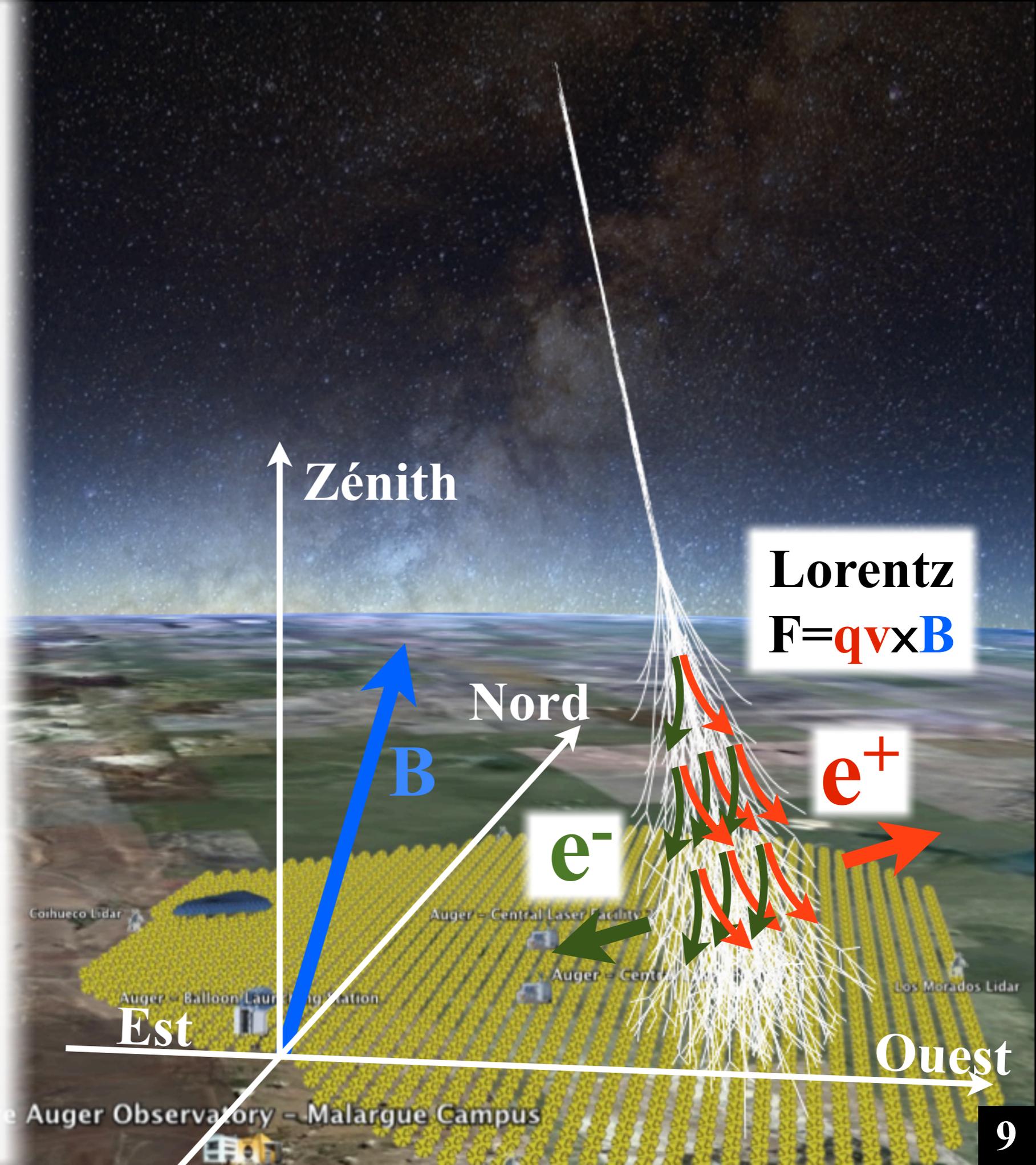
Création d'un signal radio
dans le domaine du MHz
proportionnel à la force de
Lorentz

elle que cela...

→ Création d'un signal radio dans le domaine du MHz

5 :
→ Première mise en évidence d'un signal radio à 44 MHz

→ Création d'un signal radio dans le domaine du MHz proportionnel à la force de Lorentz

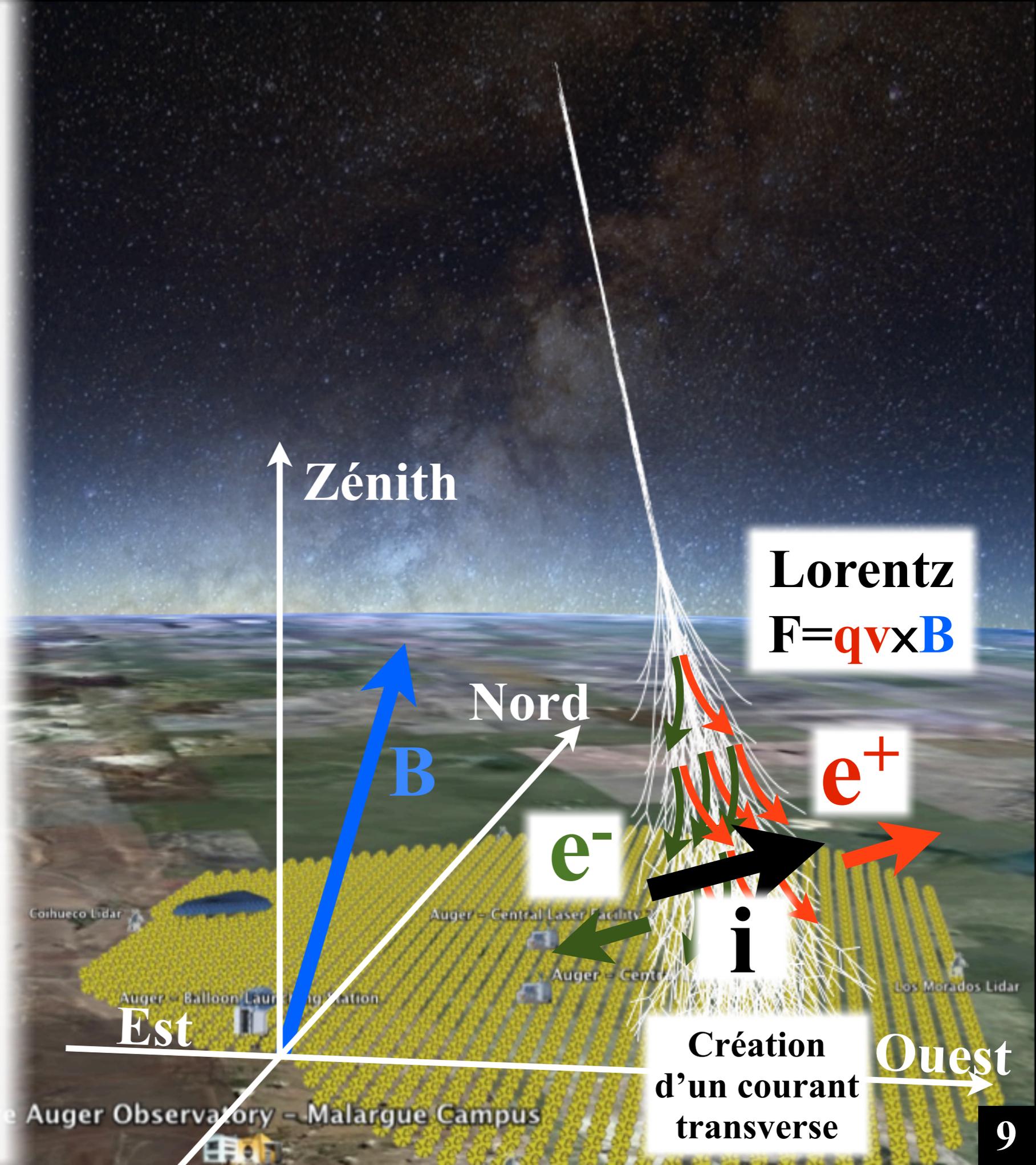


elle que cela...

→ Création d'un signal radio dans le domaine du MHz

5 :
→ Première mise en évidence d'un signal radio à 44 MHz

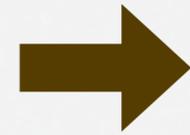
→ Création d'un signal radio dans le domaine du MHz proportionnel à la force de Lorentz



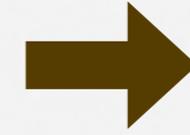
La radio-détection, technique pas si nouvelle que cela...

• Askaryan en 1962 :

électrons arrachés au milieu
+ annihilation positrons

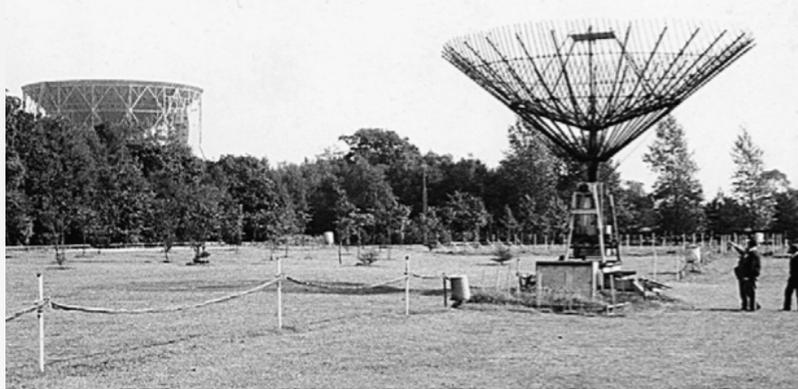


**Excès de charges
négatives** dans la gerbe

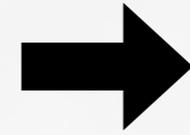


Création d'un signal radio
dans le domaine du MHz

• Expérience à Jodrell Bank (Angleterre) en 1965 :



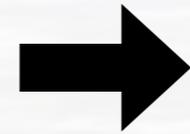
Réseau de 72 dipôles
+ détecteurs de particules



Première mise en évidence
d'un signal
radio à 44 MHz

• Kahn et Lerche en 1966 :

Champ magnétique terrestre
déviations systématiques des
particules chargées



Création d'un
courant transverse
à l'axe de la gerbe



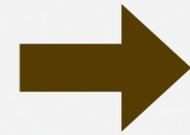
Création d'un signal radio
dans le domaine du MHz
proportionnel à la force de
Lorentz



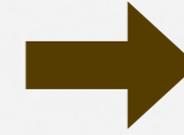
La radio-détection, technique pas si nouvelle que cela...

• Askaryan en 1962 :

électrons arrachés au milieu
+ annihilation positrons

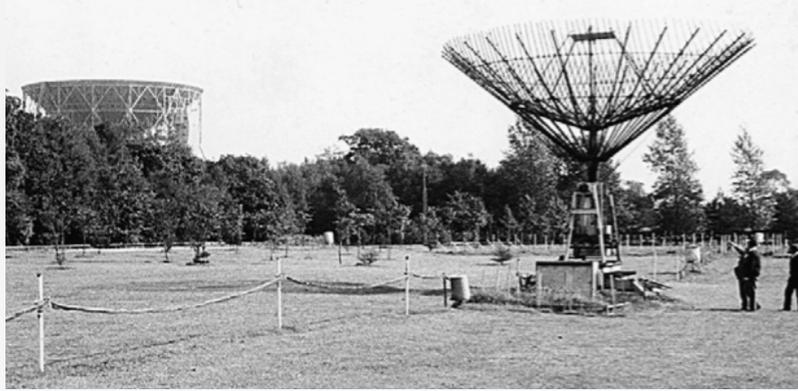


**Excès de charges
négatives** dans la gerbe

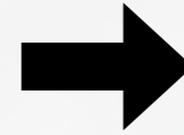


Création d'un signal radio
dans le domaine du MHz

• Expérience à Jodrell Bank (Angleterre) en 1965 :



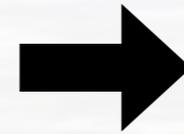
Réseau de 72 dipôles
+ détecteurs de particules



Première mise en évidence
d'un signal
radio à 44 MHz

• Kahn et Lerche en 1966 :

Champ magnétique terrestre
déviations systématiques des
particules chargées



Création d'un
courant transverse
à l'axe de la gerbe



Création d'un signal radio
dans le domaine du MHz
proportionnel à la force de
Lorentz

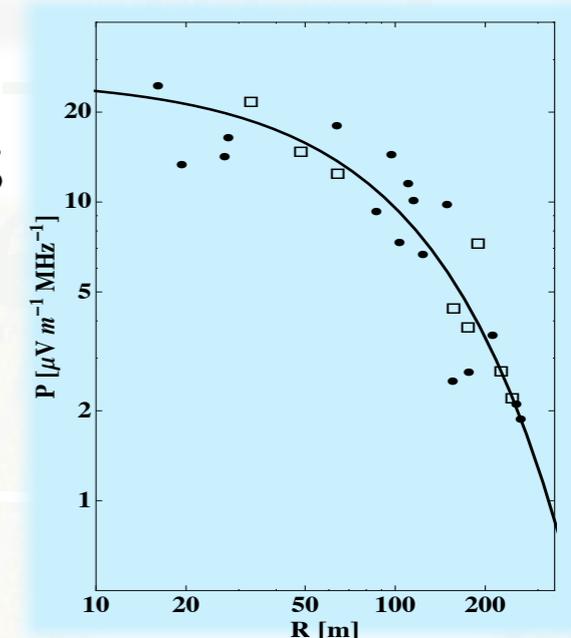
• Expérience à Haverah Park (Angleterre) en 1968 :

- Dépendance de l'amplitude du signal au champ géomagnétique;
- Profil latéral radio caractérisé;

$$\xi_v = 20 \frac{E_p}{10^{17}} \sin(\alpha) \cos(\theta) \exp\left(-\frac{R}{R_0(v, \theta)}\right) \mu\text{V} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{MHz}^{-1}$$



Revue Allan 1971.



La radio-détection, technique pas si nouvelle que cela...

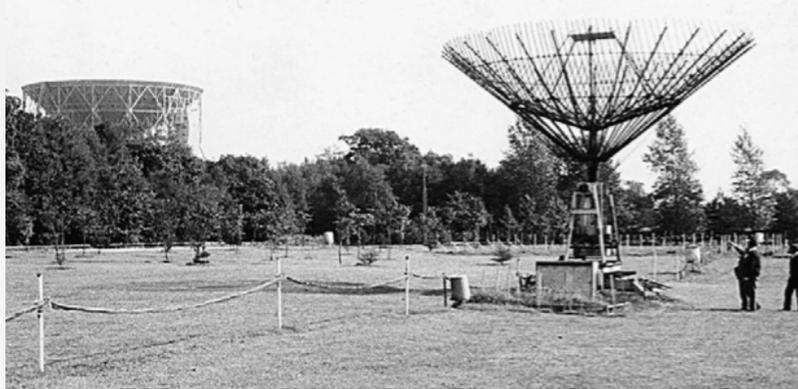
• Askaryan en 1962 :

électrons arrachés au milieu
+ annihilation positrons

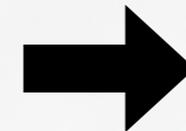


Création d'un signal radio
dans le domaine du MHz

• Expérience à Jodrell Bank (Angleterre) en 1965 :



Réseau de 72 dipôles
+ détecteurs de particules



Première mise en évidence
d'un signal
radio à 44 MHz

**Mécanisme
dominant**

• Kahn et Lerche en 1966 :

Champ magnétique terrestre
déviations systématiques des
particules chargées



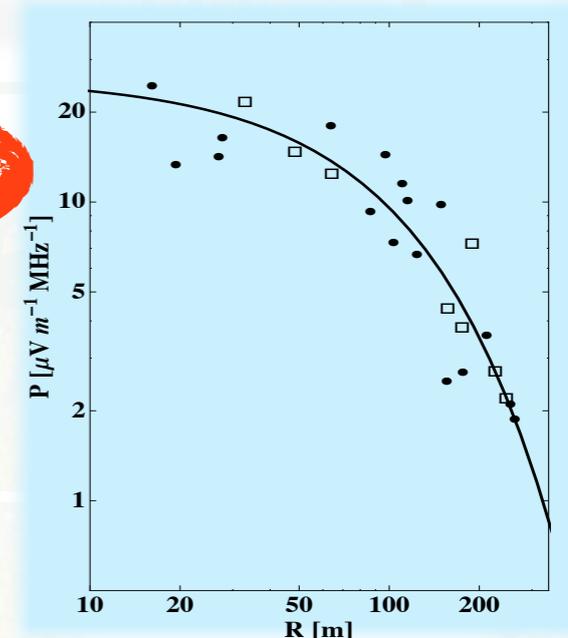
Création d'un signal radio
dans le domaine du MHz
proportionnel à la force de
Lorentz

• Expérience à Haverah Park (Angleterre) en 1968 :

- Dépendance de l'amplitude du signal au champ géomagnétique.
- Profil latéral radio caractérisé;

$$\xi_v = 20 \frac{E_p}{10^{17}} \sin(\alpha) \cos(\theta) \exp\left(-\frac{R}{R_0(v, \theta)}\right) \mu\text{V} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{MHz}^{-1}$$

➔ Revue Allan 1971.



La radio-détection, technique pas si nouvelle que cela...

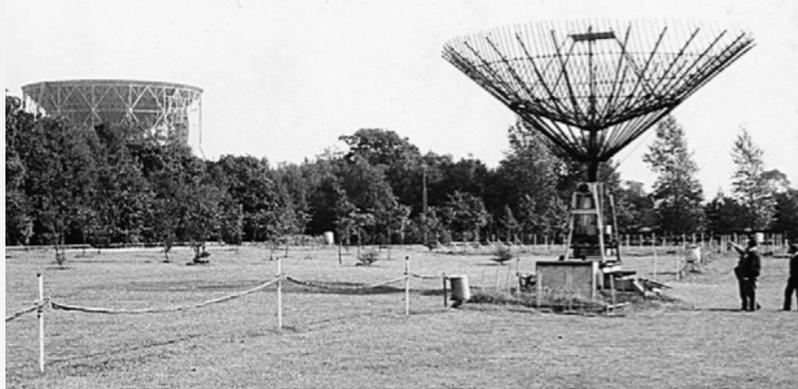
• Askaryan en 1962 :

électrons arrachés au milieu
+ annihilation positrons

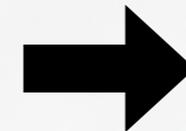


Création d'un signal radio
dans le domaine du MHz

• Expérience à Jodrell Bank (Angleterre) en 1965 :



Réseau de 72 dipôles
+ détecteurs de particules



Première mise en évidence
d'un signal
radio à 44 MHz

**Mécanisme
dominant**

• Kahn et Lerche en 1966 :

Champ magnétique terrestre
déviations systématiques des
particules chargées



Création d'un signal radio
dans le domaine du MHz
proportionnel à la force de
Lorentz

• Expérience à Haverah Park (Angleterre) en 1968 :

- Dépendance de l'amplitude du signal au champ géomagnétique.
- Profil latéral radio caractérisé;

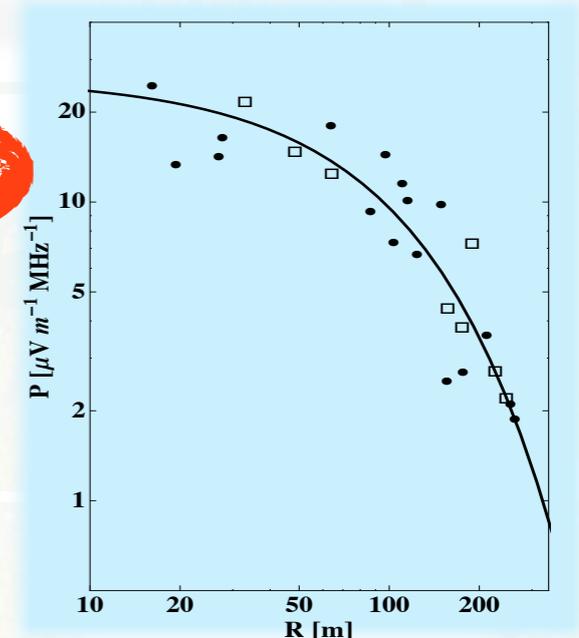
$$\xi_v = 20 \frac{E_p}{10^{17}} \sin(\alpha) \cos(\theta) \exp\left(-\frac{R}{R_0(v, \theta)}\right) \mu\text{V} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{MHz}^{-1}$$



Revue Allan 1971.



Puis abandon au profit
des autres techniques



Années 2000 : la technique de détection radio explorée à nouveau comme alternative

- 2000 : renouveau de la radiodétection dans les milieux denses (glace, sel) pour la détection de neutrinos (D. Saltzberg par exemple)
- 2000 : tentative de détection des gerbes sur CASA-MIA et EAS-TOP : échec
- 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

TREND,(FRA/CN), RAuger(FRA), MAXIMA(NL)
AERA(FRA/GE/NL), EASIER (FRA), RASTA(USA)

Années 2000 : la technique de détection radio explorée à nouveau comme alternative

- 2000 : renouveau de la radiodétection dans les milieux denses (glace, sel) pour la détection de neutrinos (D. Saltzberg par exemple)
- 2000 : tentative de détection des gerbes sur CASA-MIA et EAS-TOP : échec
- 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

TREND,(FRA/CN), RAuger(FRA), MAXIMA(NL)
AERA(FRA/GE/NL), EASIER (FRA), RASTA(USA)

March 2003

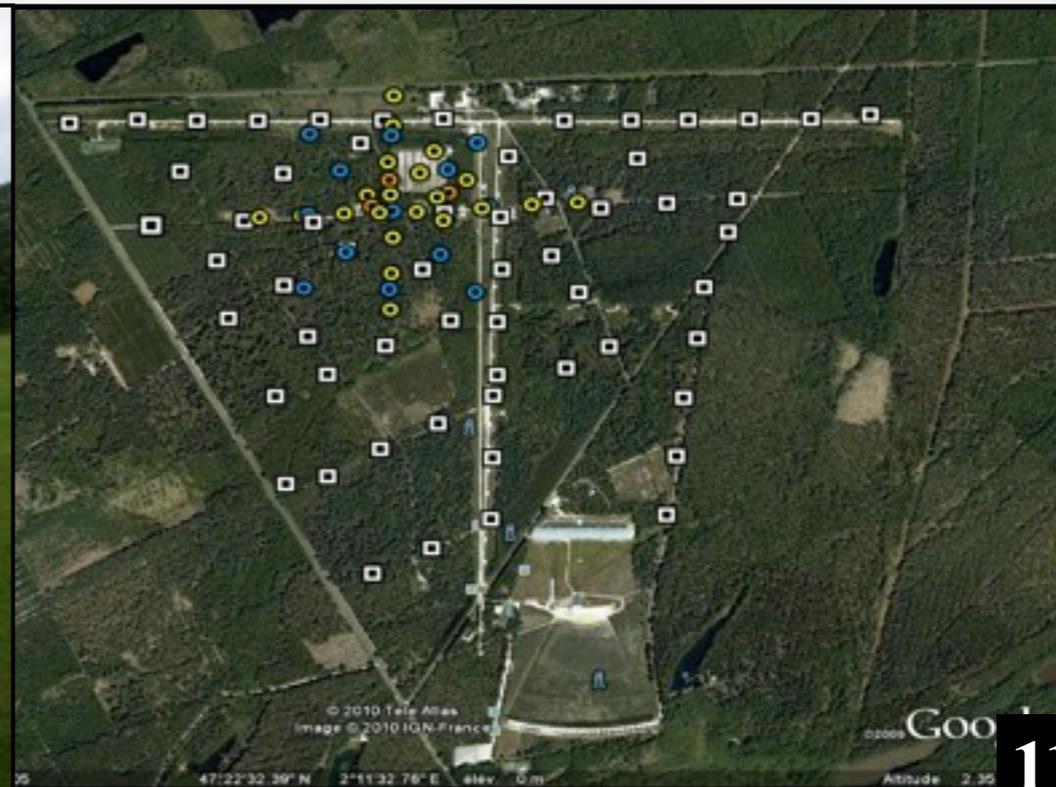
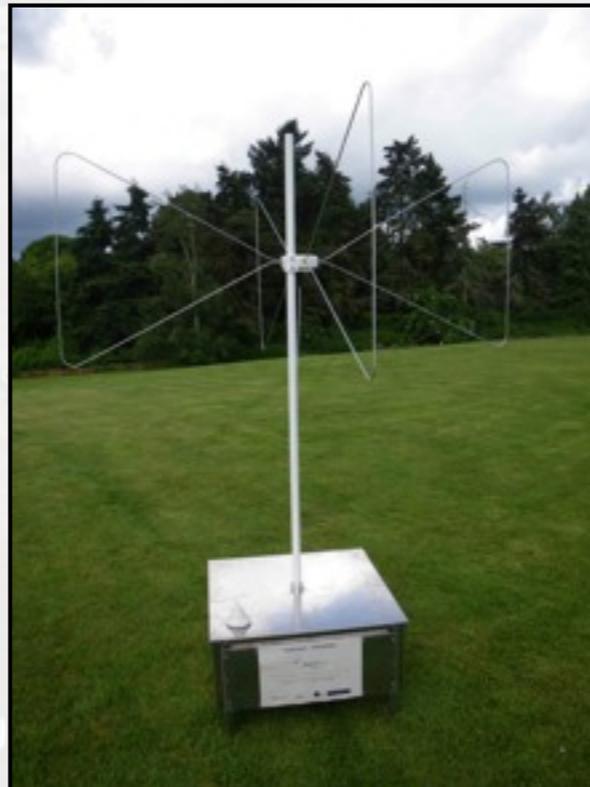
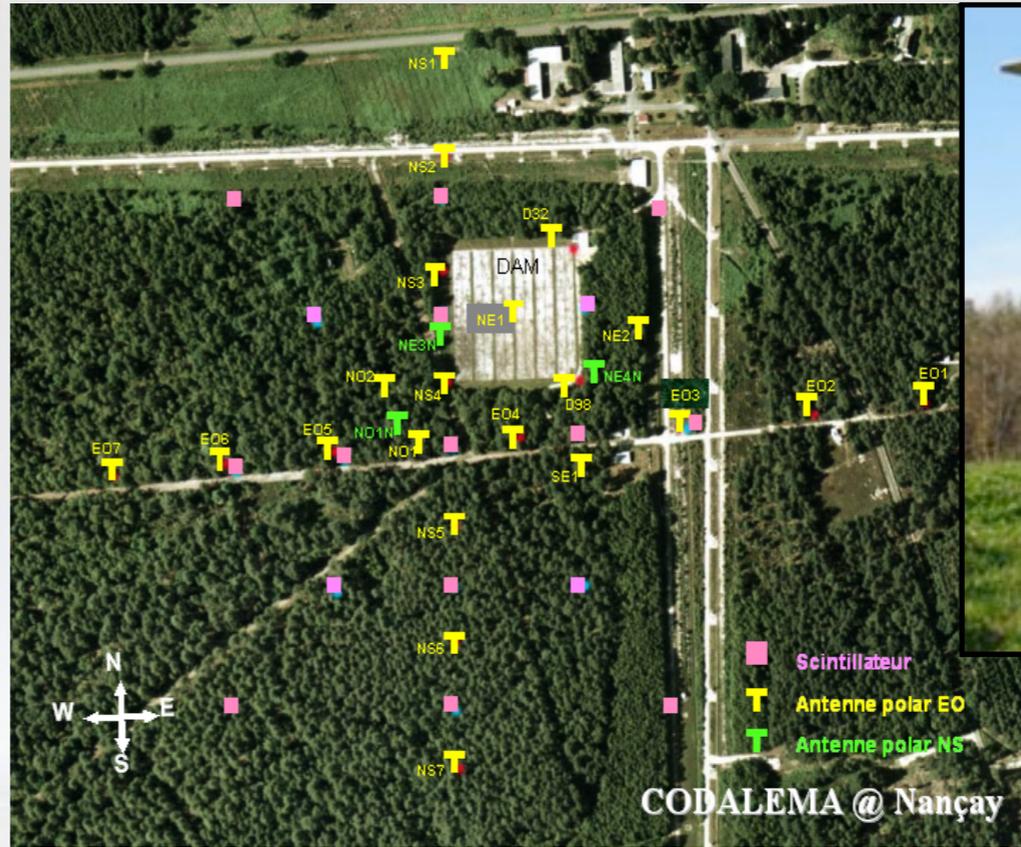
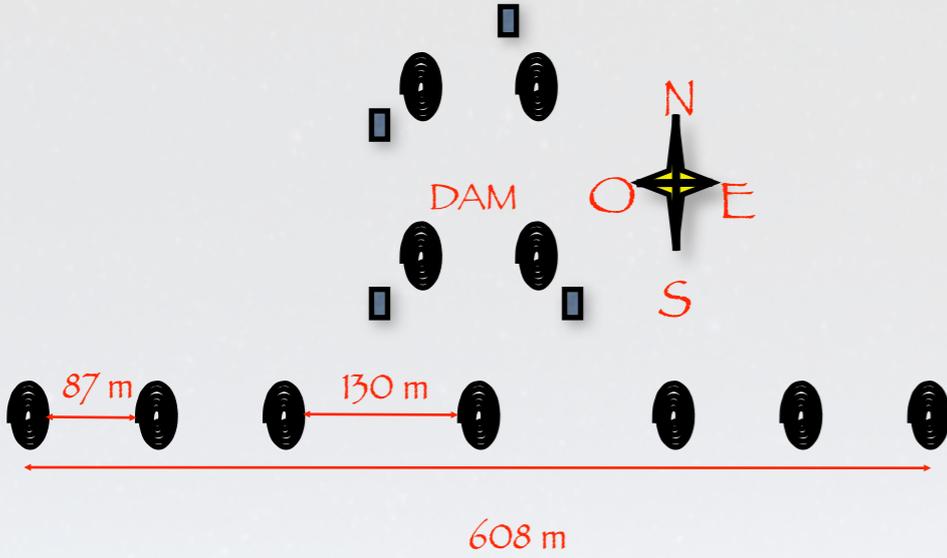
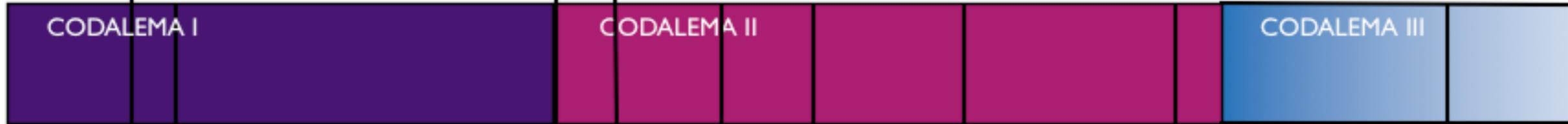
Spring 2004

July 2005

November 2005

November 2009

May 2010



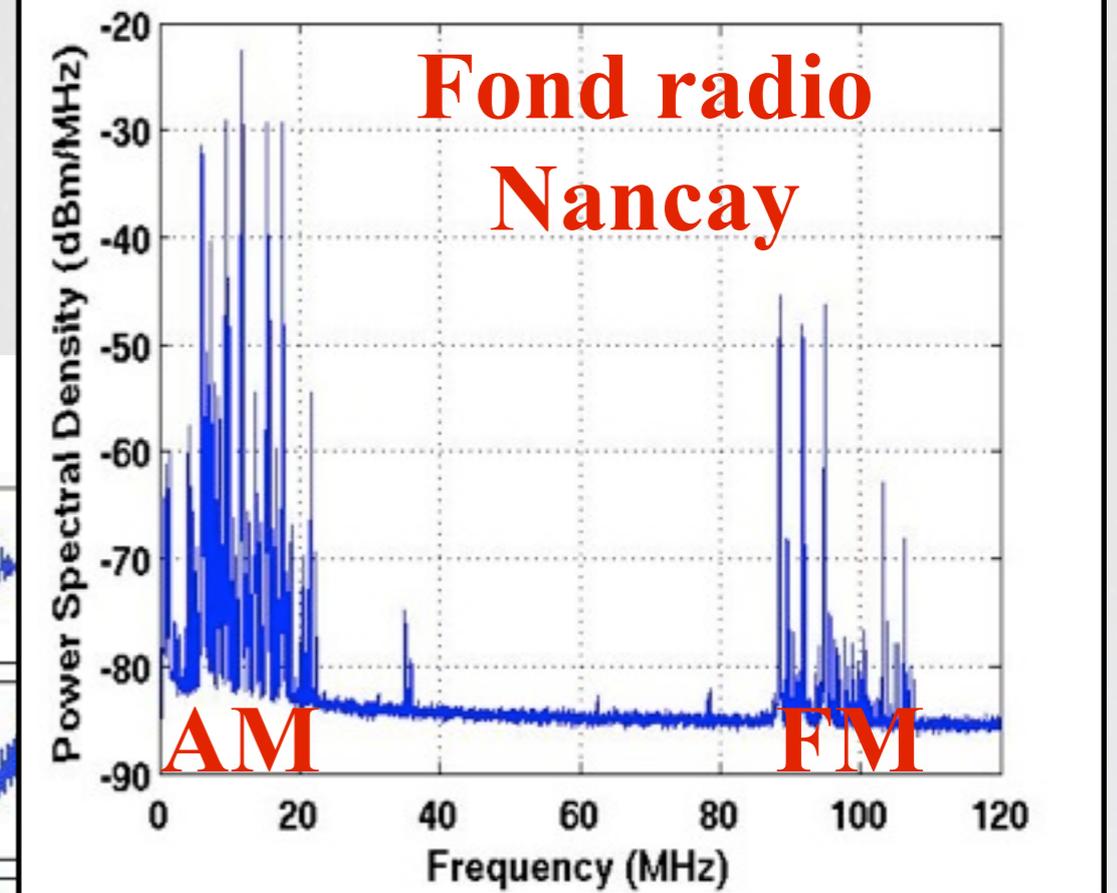
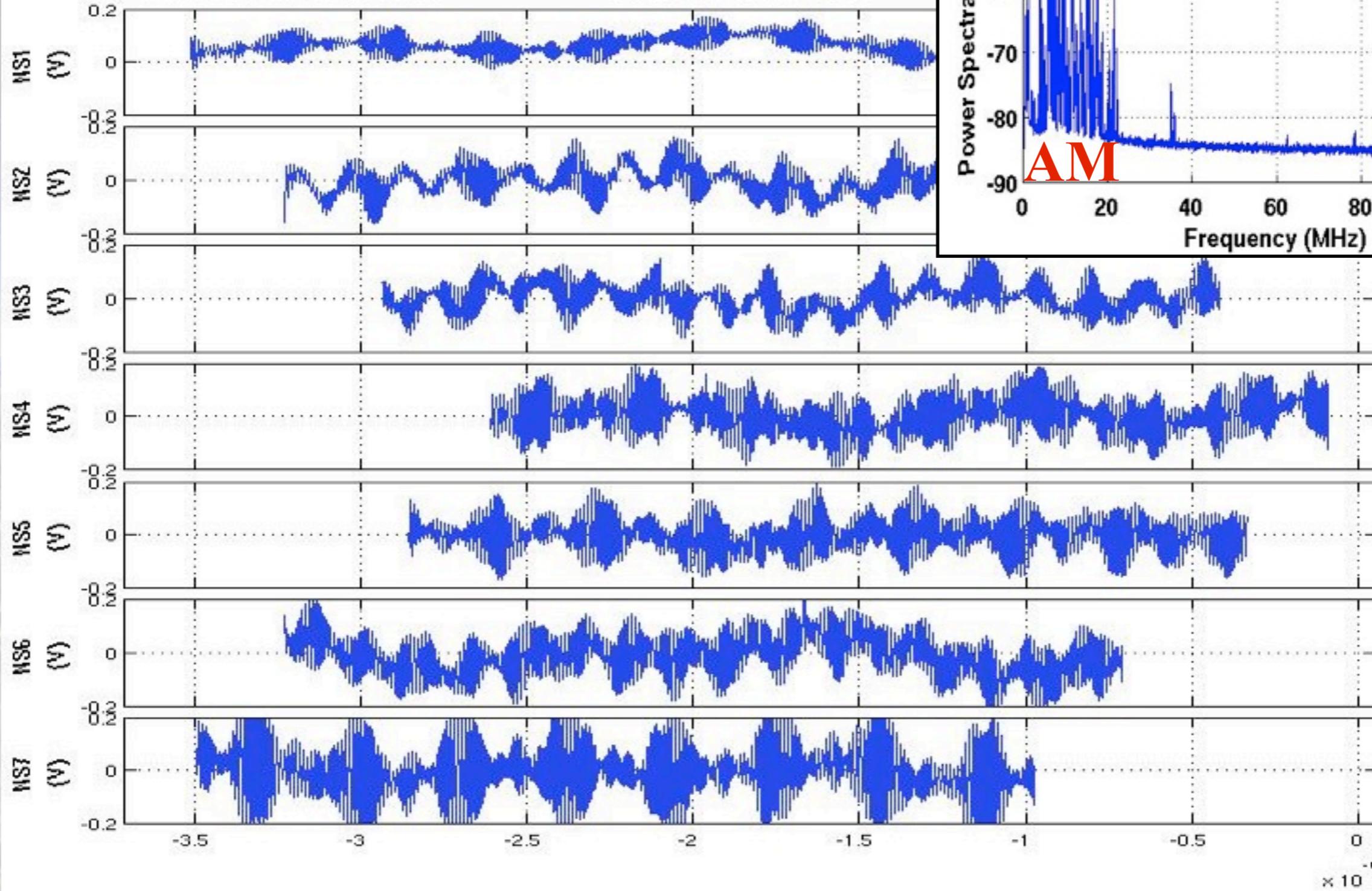
Pierre Aug

CODALEMA-II

Polarisation est-ouest

Signaux seuls (choix=0)
Pas de filtre en fréquence (choix_fil=0)
Signaux décalés en temps (choix_deca=1)

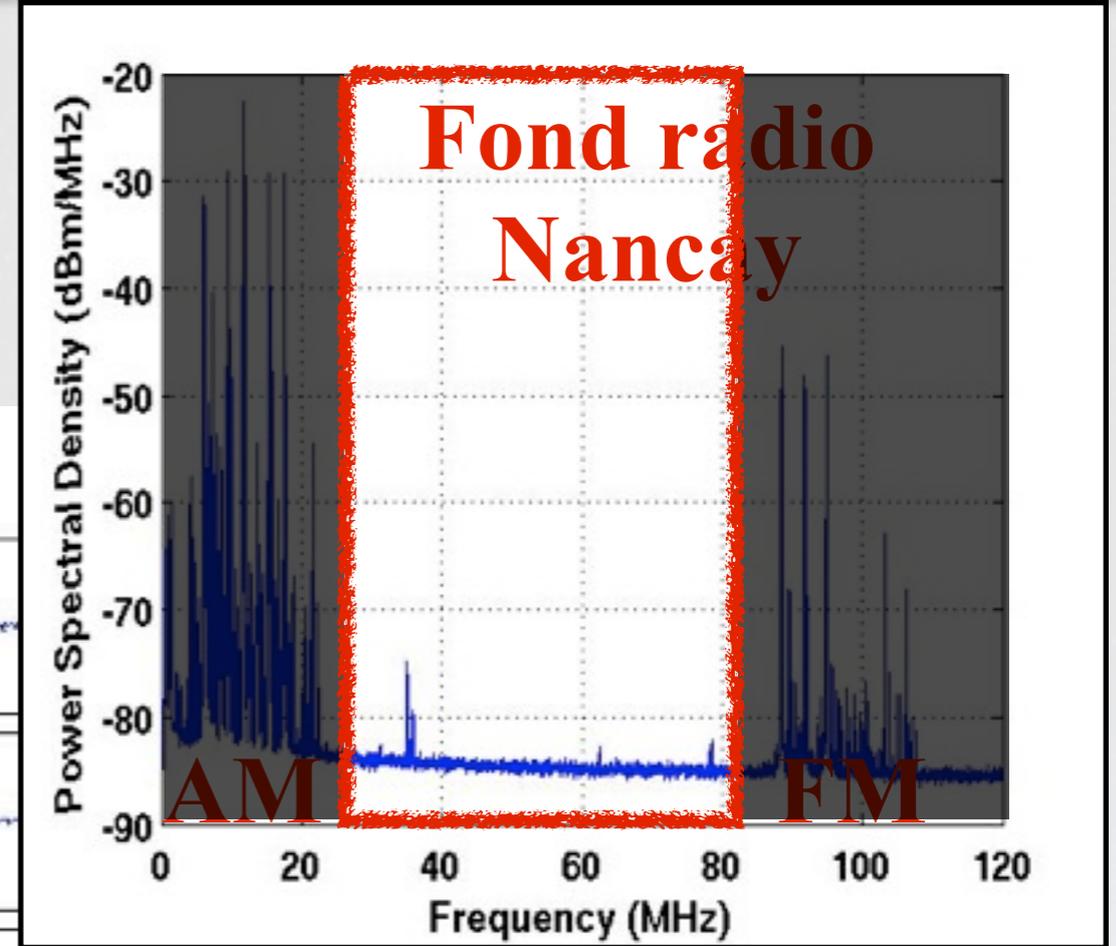
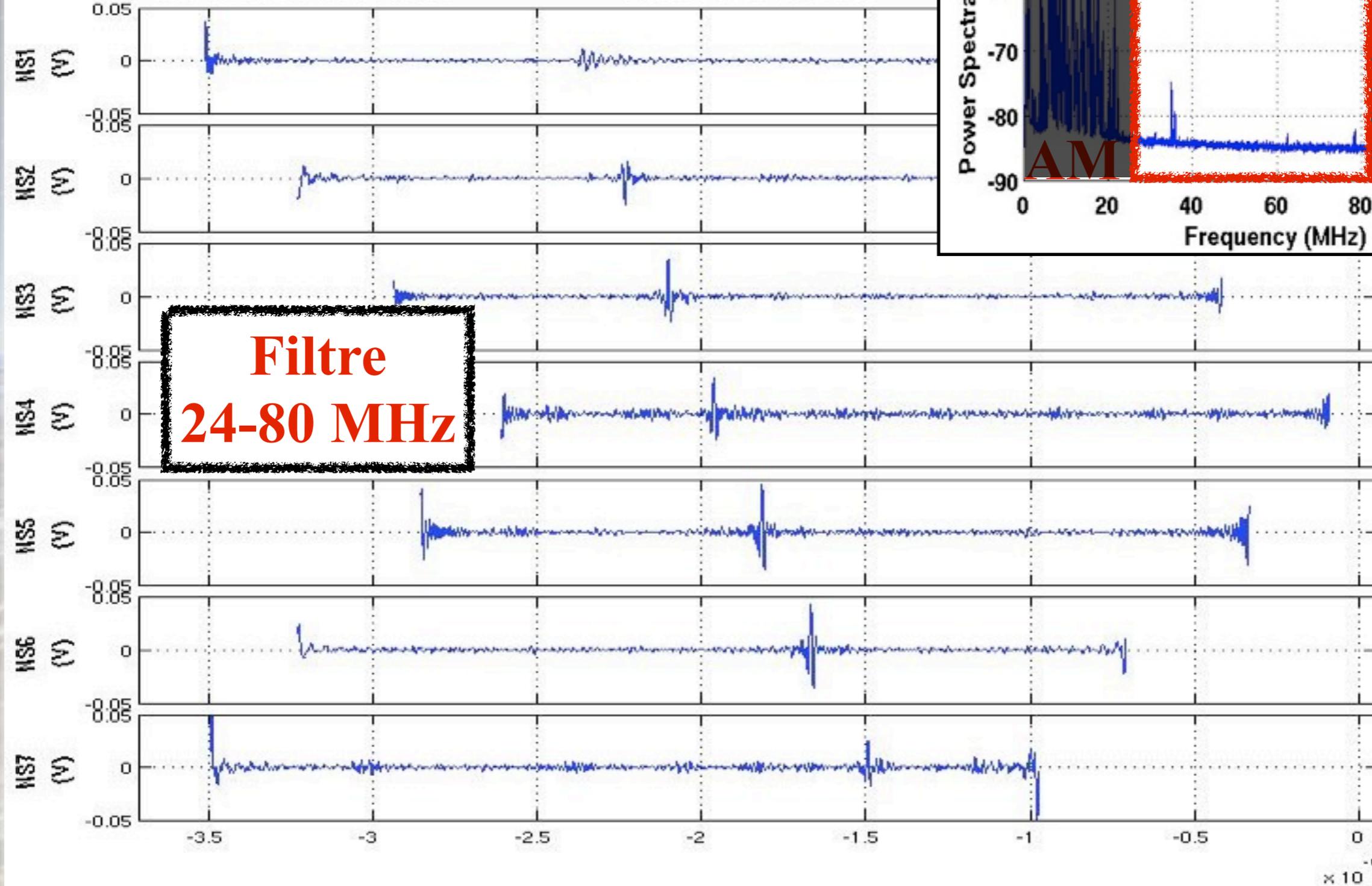
Run : 777 - Event : 823
27-Dec-2006 23:34:52



CODALEMA-II

Polarisation est-ouest

Signaux seuls (choix=0)
Filtre (choix_fil=2) 23-83 MHz
Signaux décalés en temps (choix_deca=1)
Run : 777 - Event : 823
27-Dec-2006 23:34:52

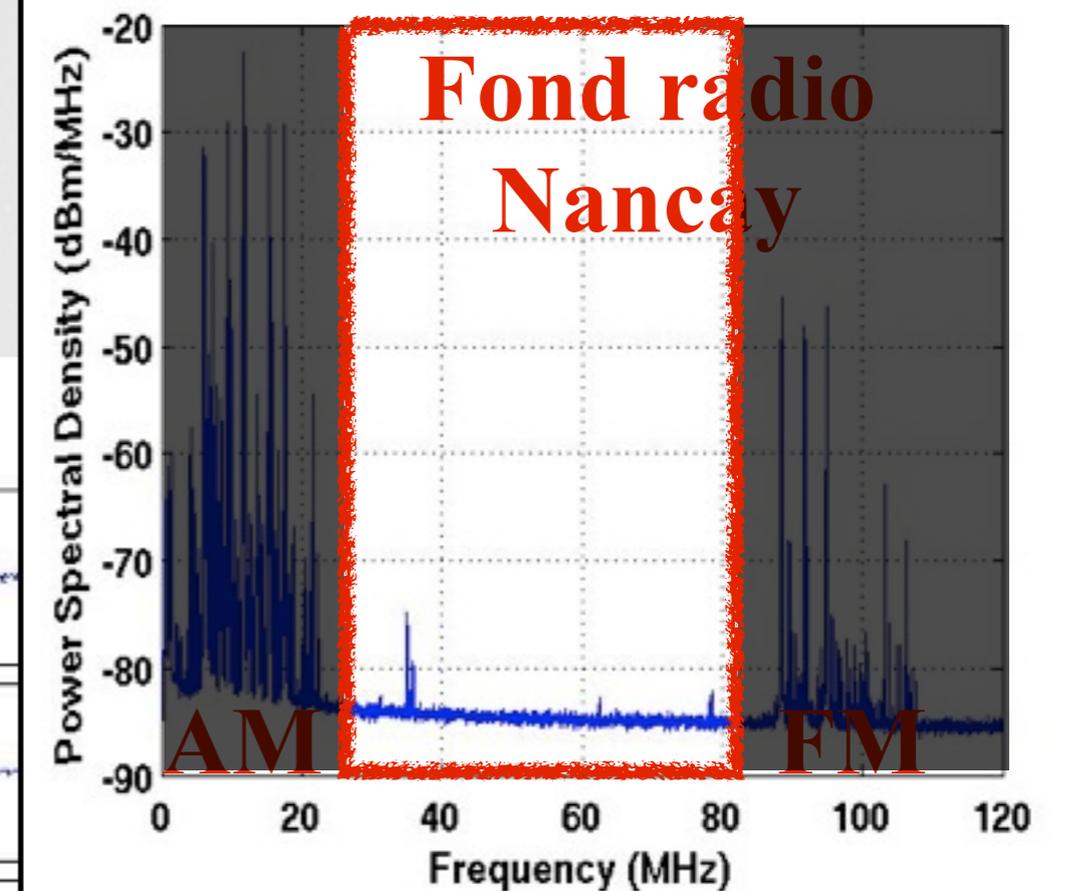
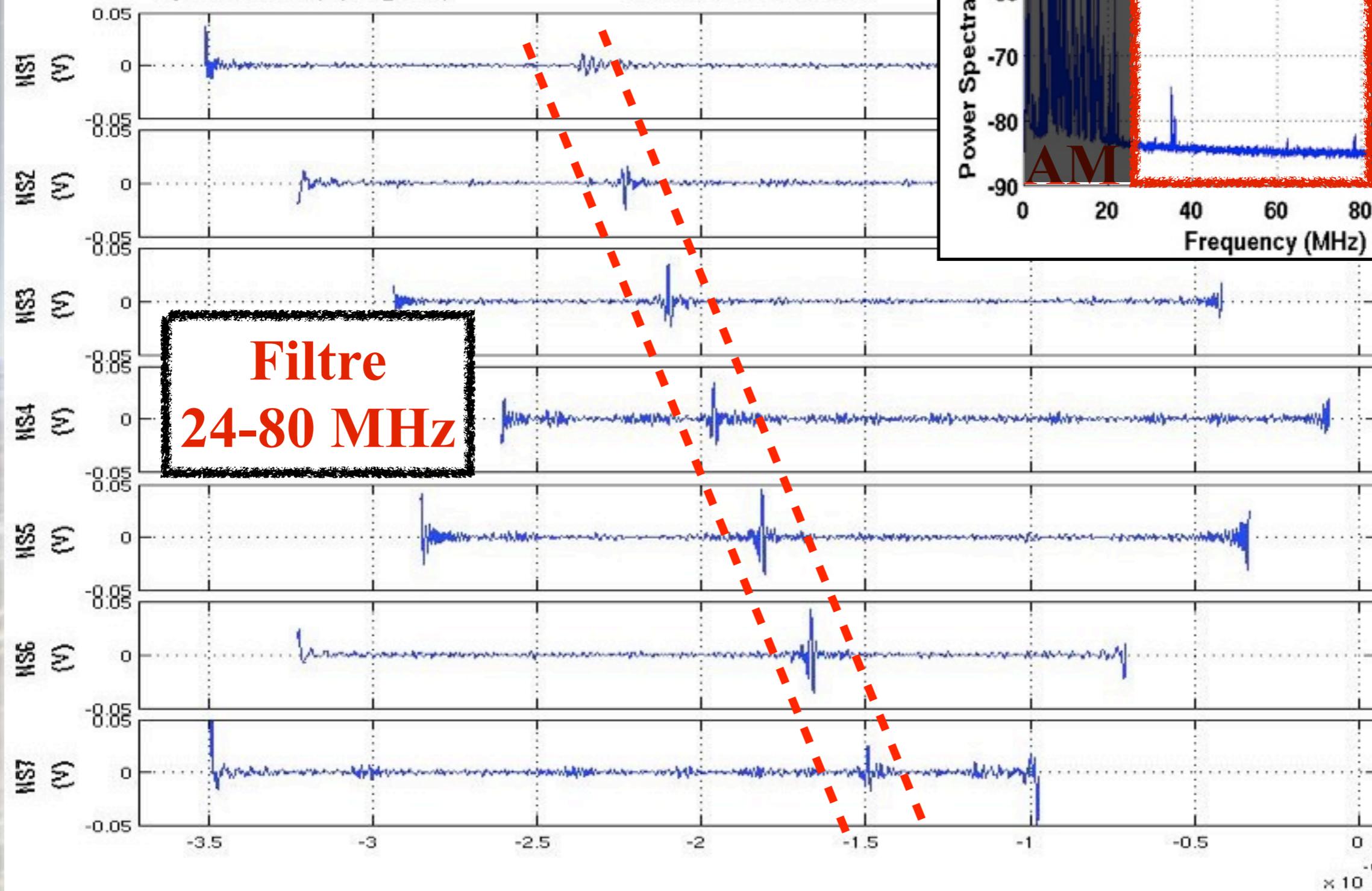


CODALEMA-II

Polarisation est-ouest

Signaux seuls (choix=0)
Filtre (choix_fil=2) 23-83 MHz
Signaux décalés en temps (choix_deca=1)

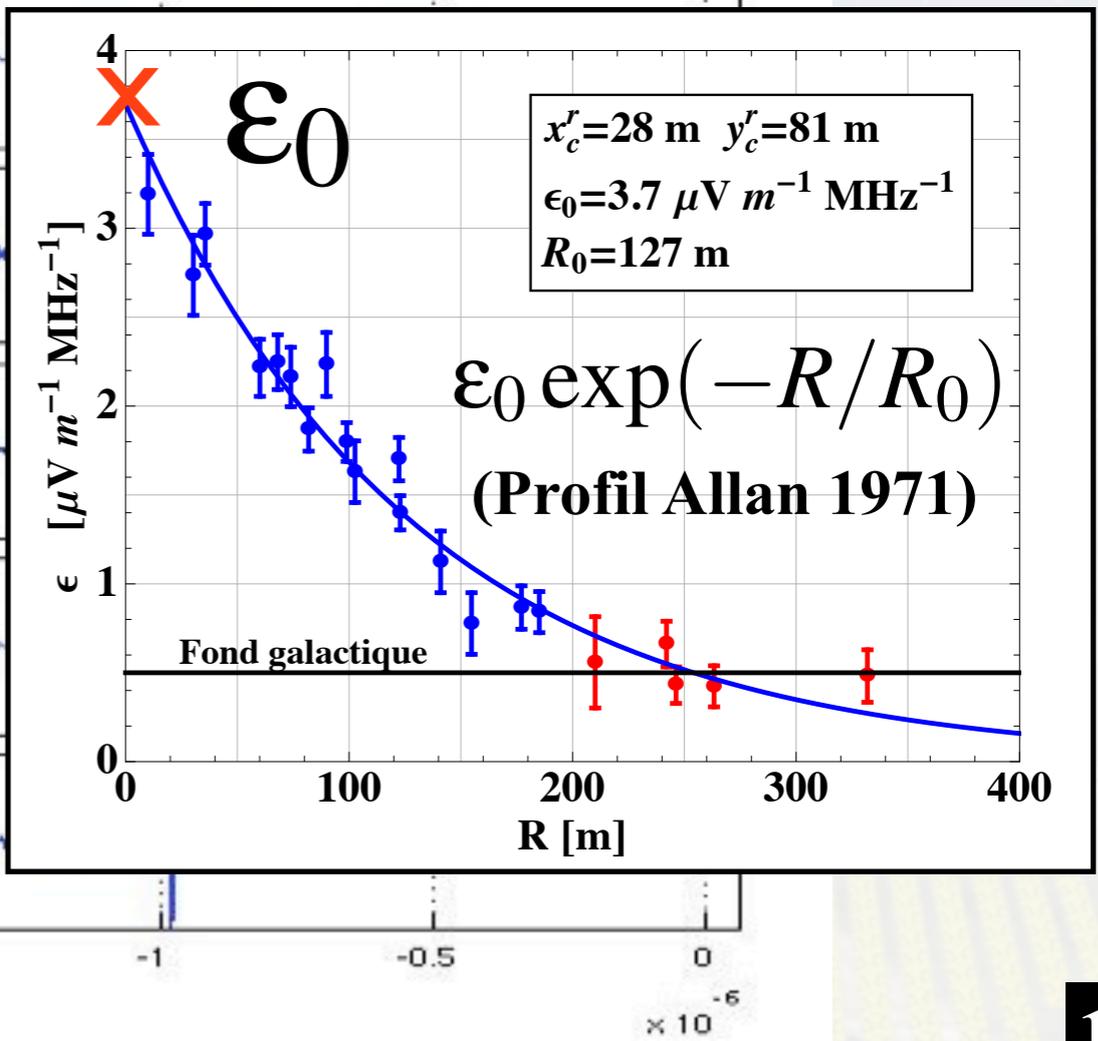
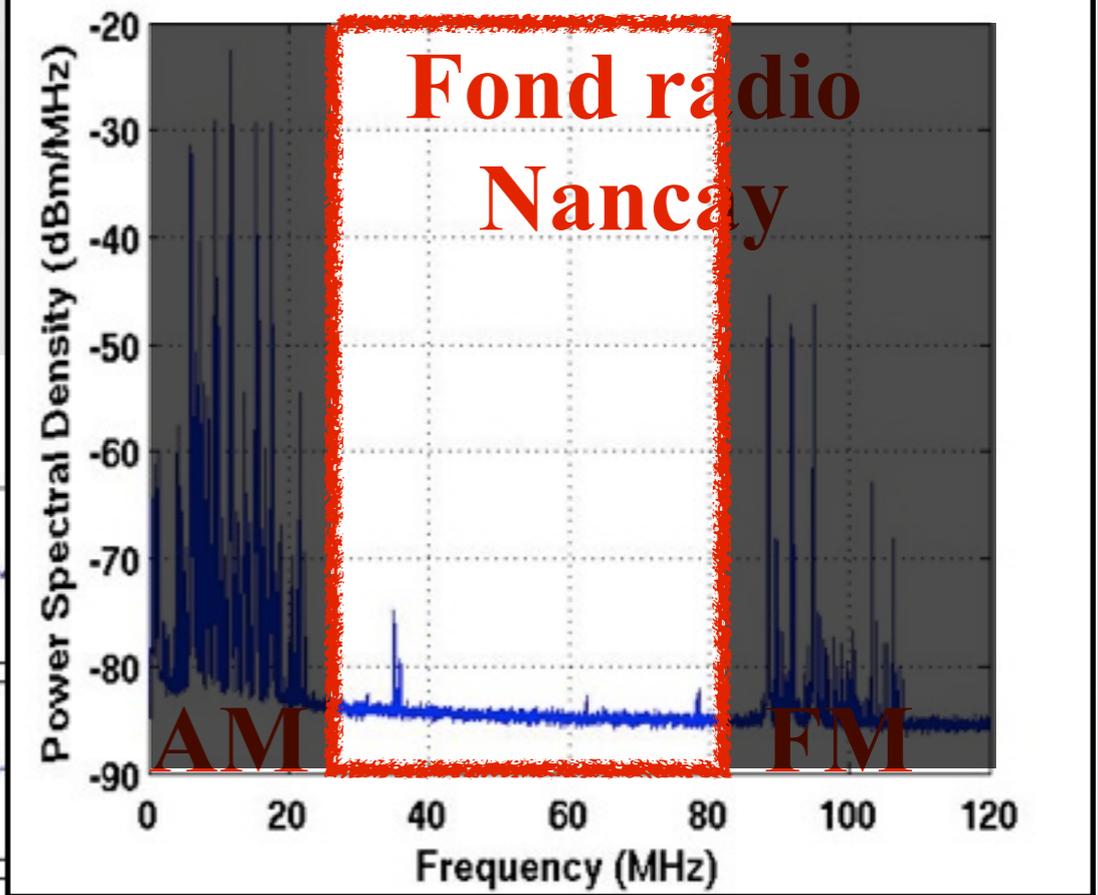
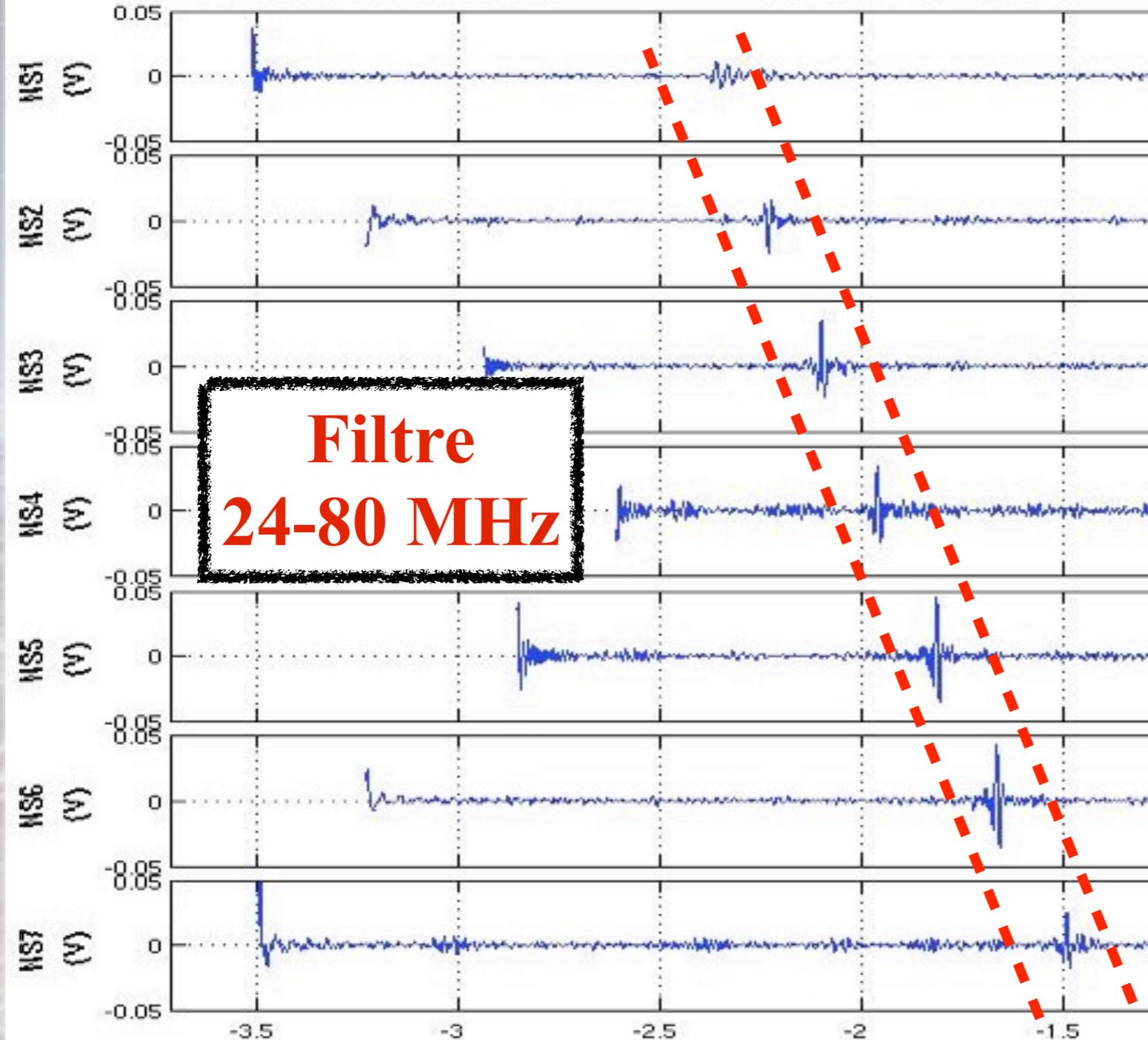
Run : 777 - Event : 823
27-Dec-2006 23:34:52



CODALEMA-II

Polarisation est-ouest

Signaux seuls (choix=0)
Filtre (choix_fil=2) 23-83 MHz
Signaux décalés en temps (choix_deca=1)
Run : 777 - Event : 823
27-Dec-2006 23:34:52



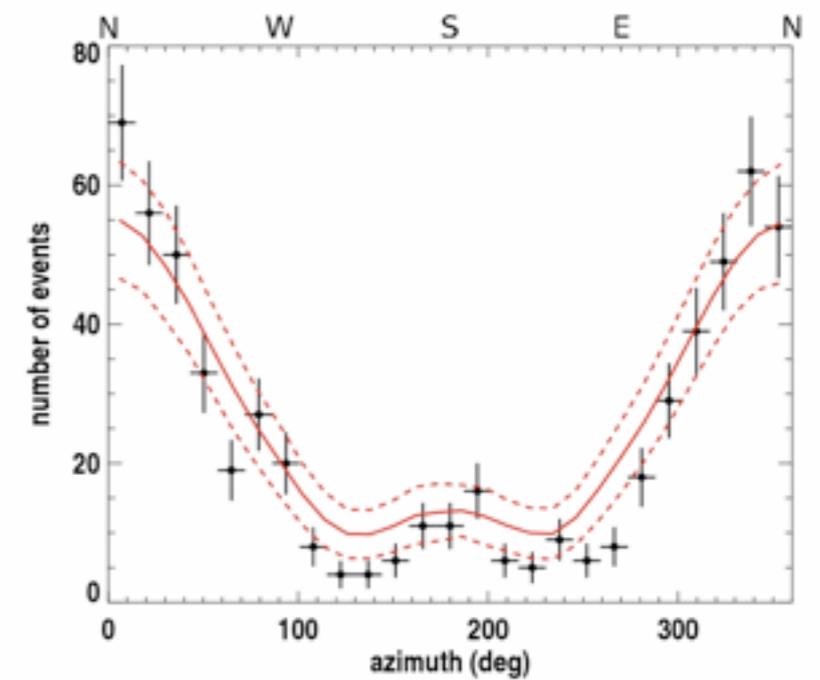
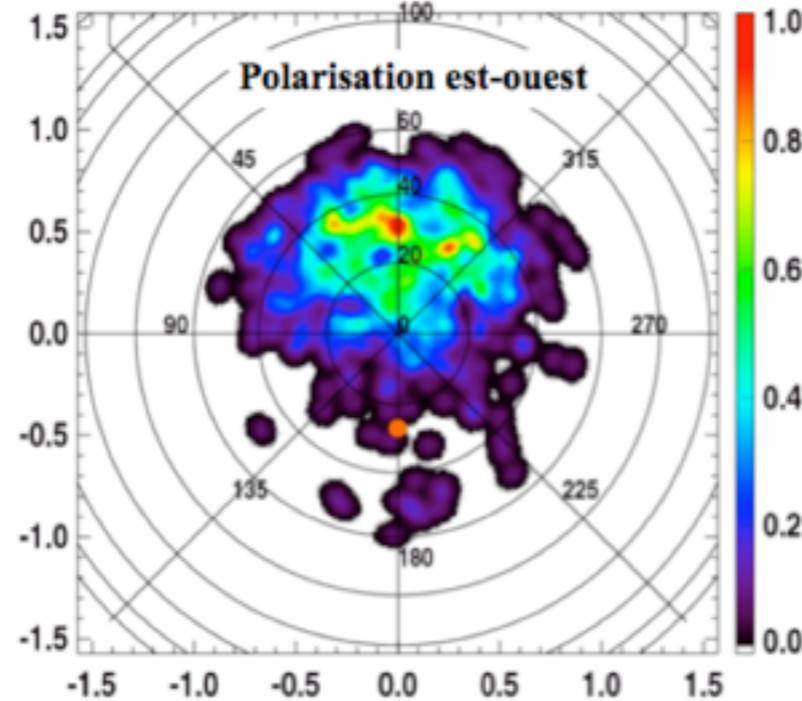
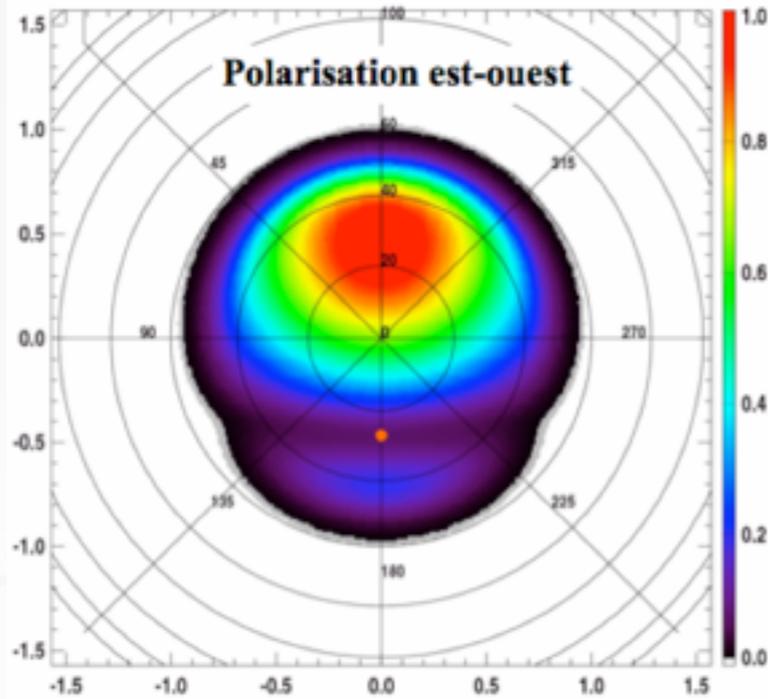
CODALEMA-II

Directions d'arrivée

Origine géomagnétique confirmée avec grande stat

Signal radio mesuré

$$\propto \begin{pmatrix} \text{Lorentz } (\vec{n} \times \vec{B}) \\ -\sin \theta \sin \phi \cos \theta_B - \cos \theta \sin \theta_B \\ \sin \theta \cos \phi \cos \theta_B \\ \sin \theta \cos \phi \sin \theta_B \end{pmatrix}$$



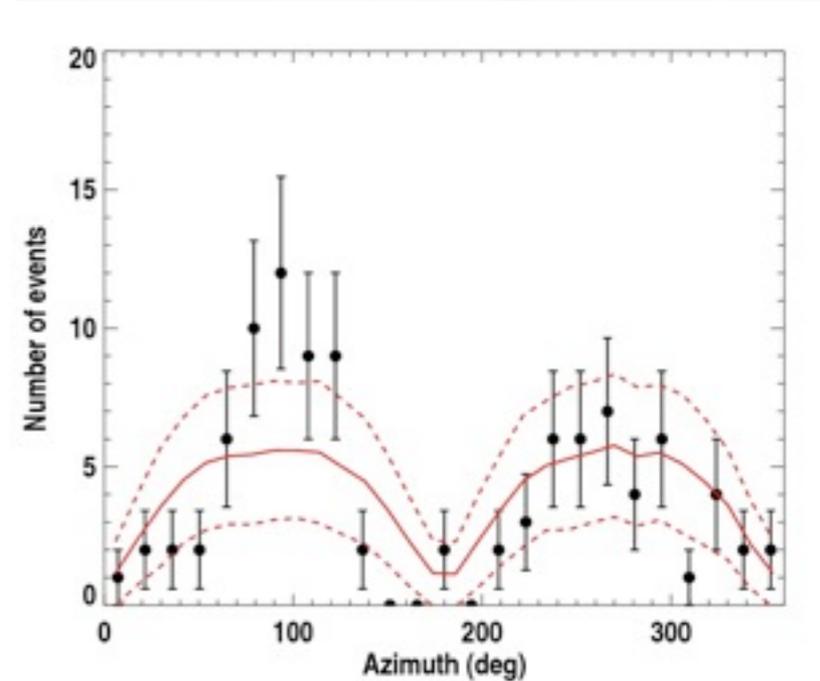
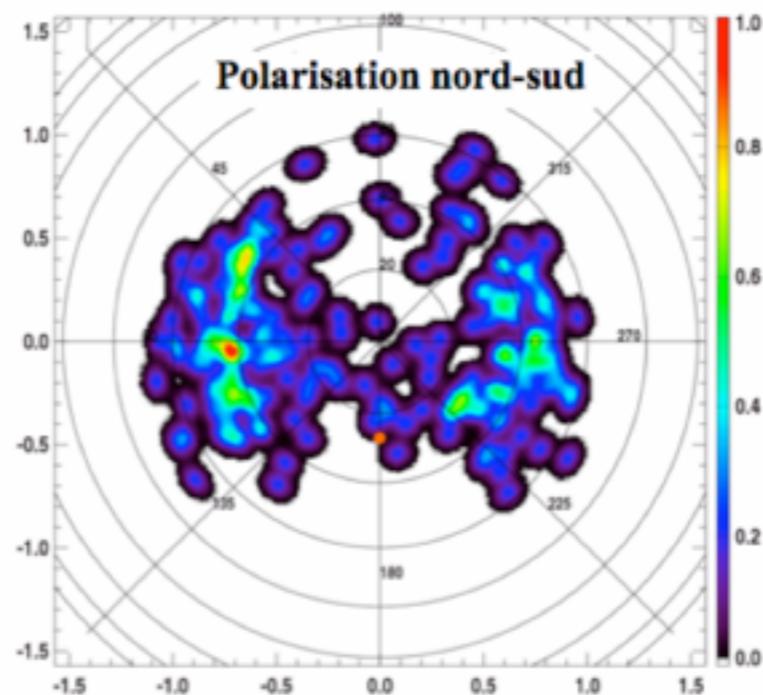
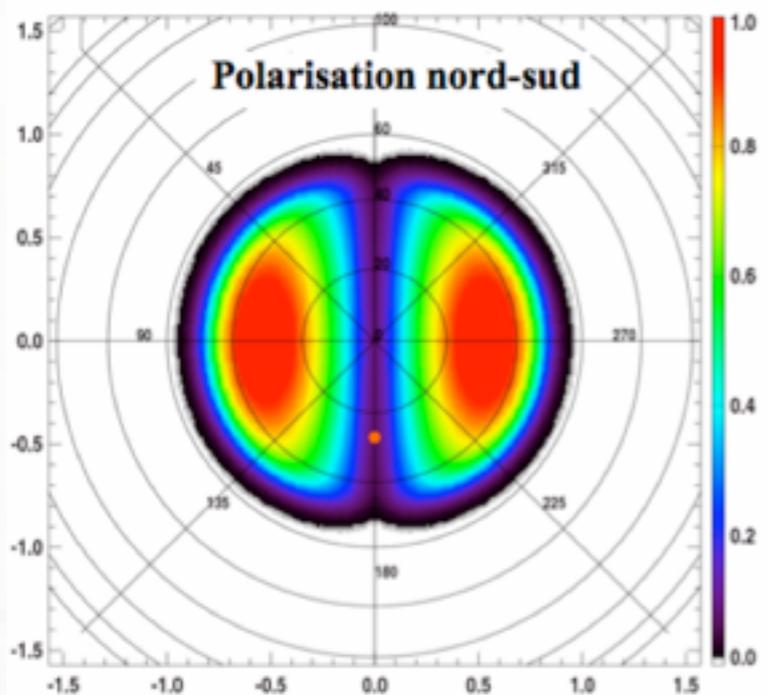
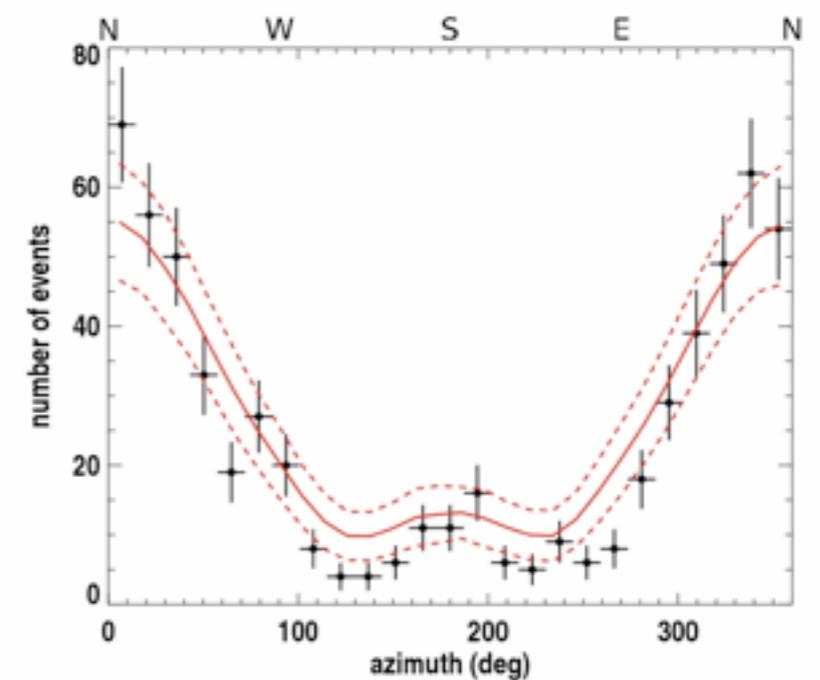
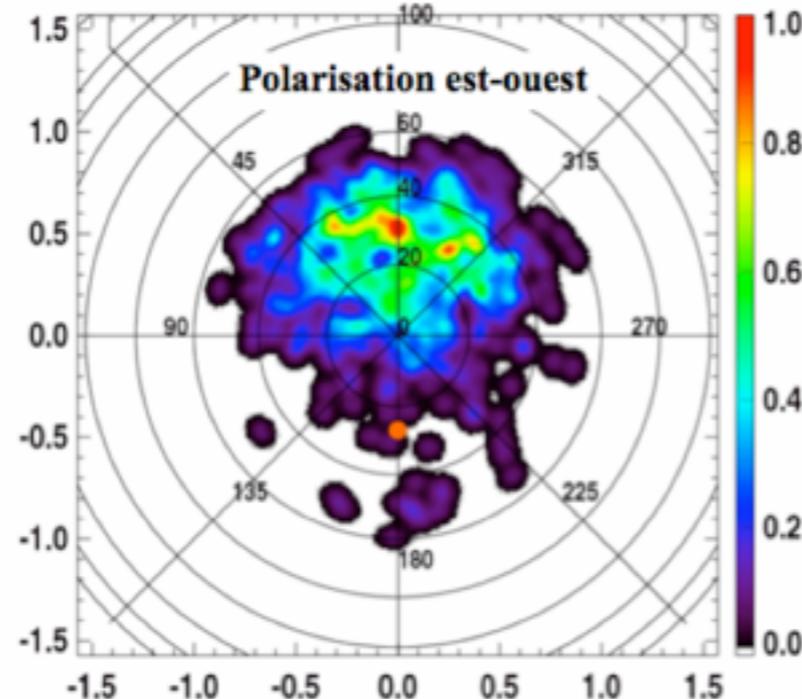
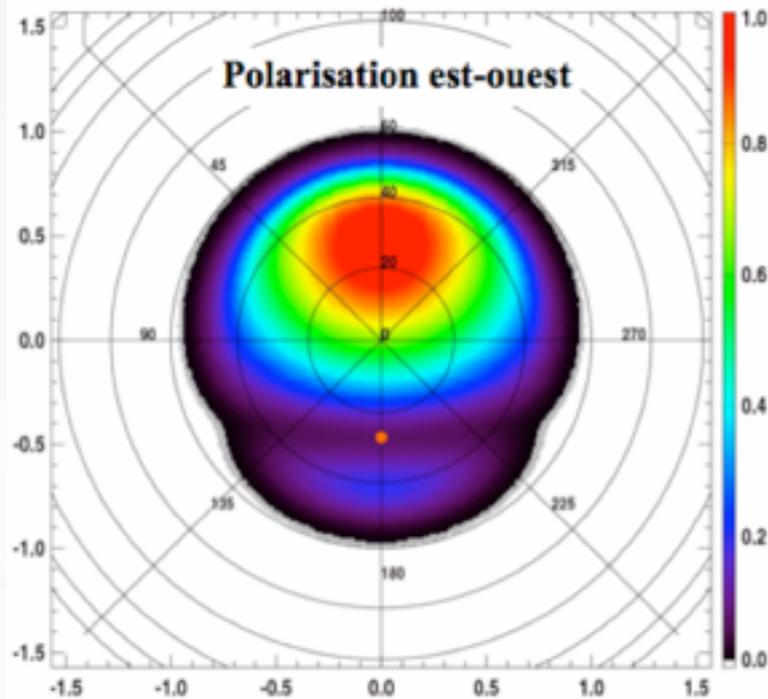
CODALEMA-II

Directions d'arrivée

Origine géomagnétique confirmée avec grande stat

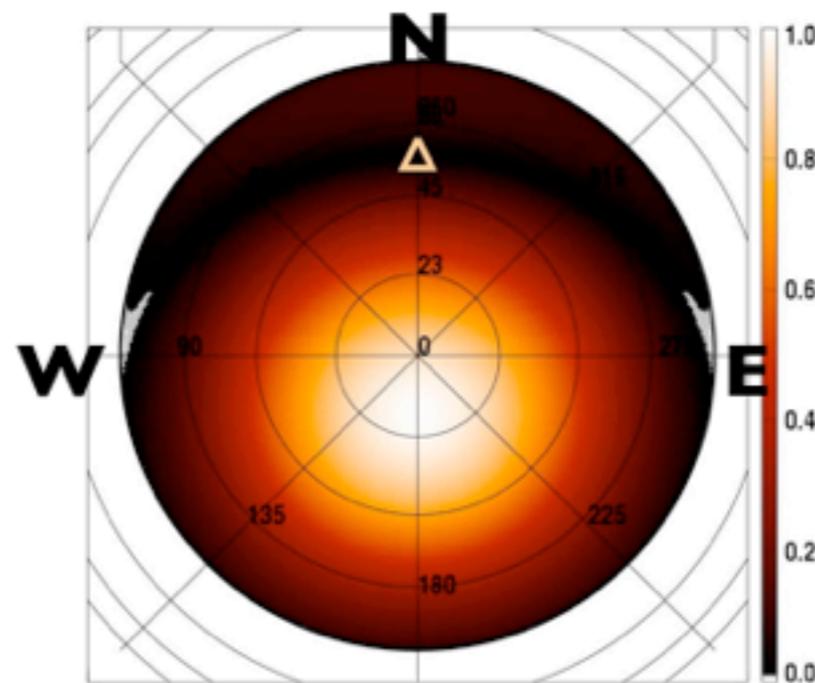
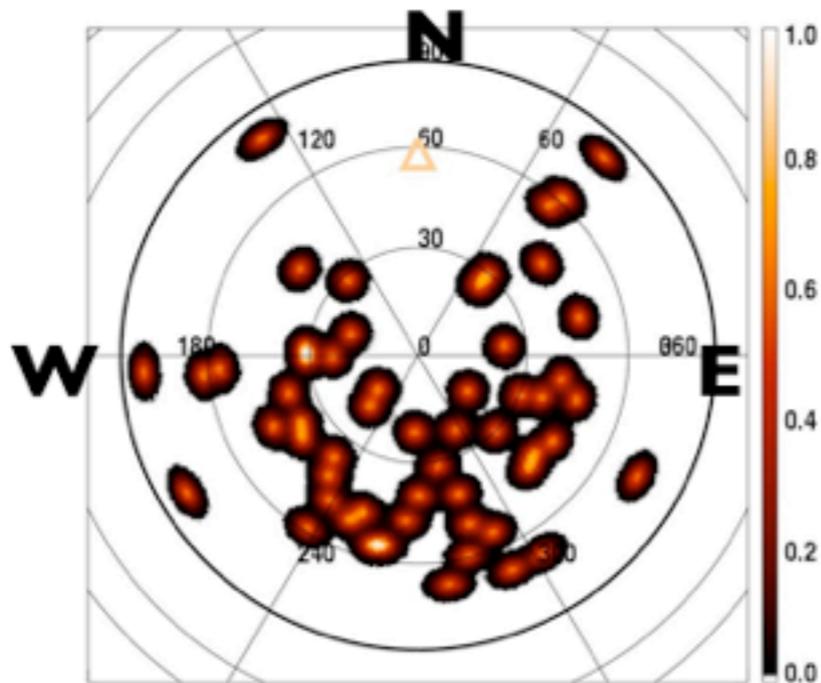
Signal radio mesuré

$$\propto \begin{pmatrix} \text{Lorentz } (\vec{n} \times \vec{B}) \\ -\sin \theta \sin \phi \cos \theta_B - \cos \theta \sin \theta_B \\ \sin \theta \cos \phi \cos \theta_B \\ \sin \theta \cos \phi \sin \theta_B \end{pmatrix}$$

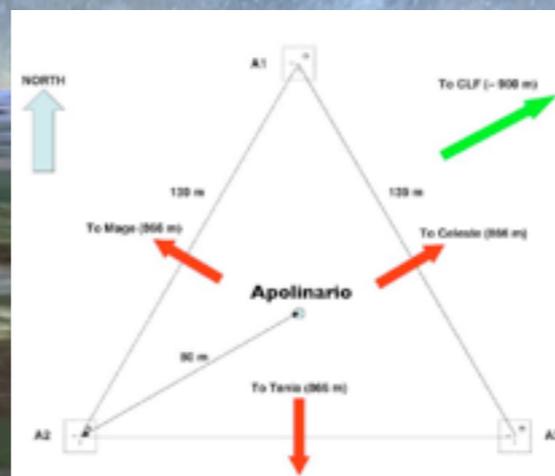


RAuger: self-trigger

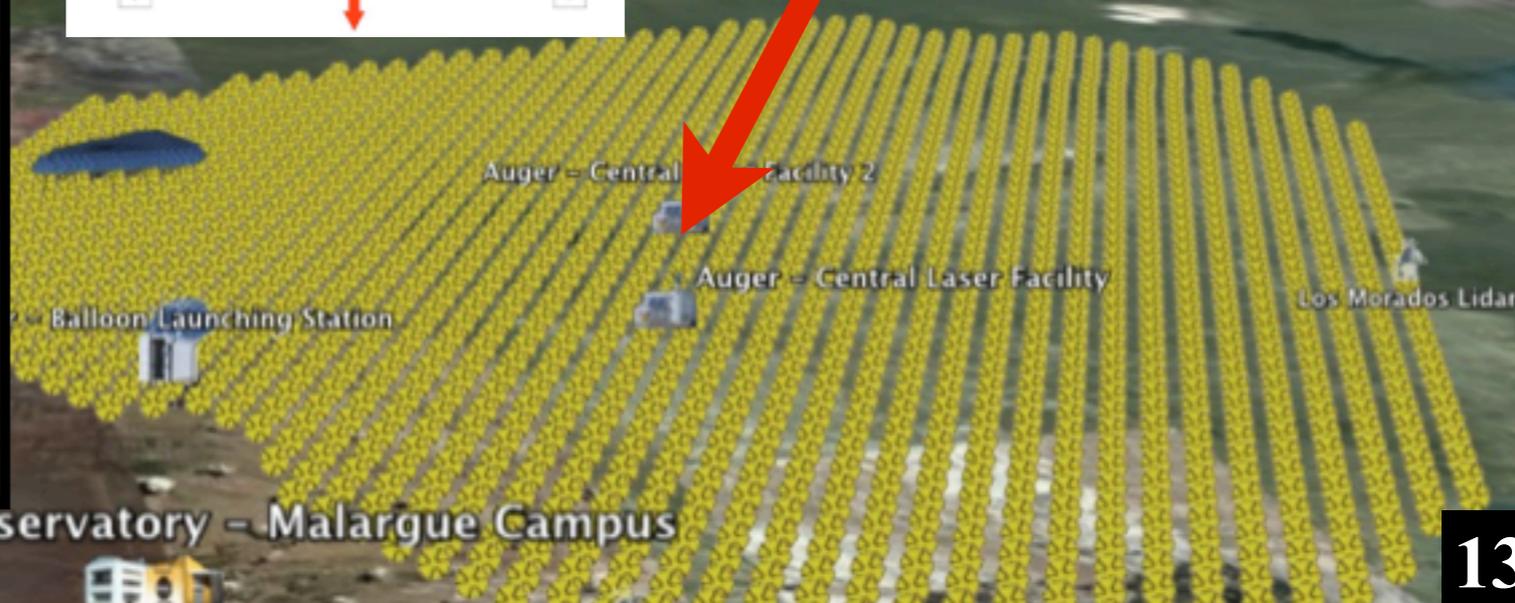
données:
76% du
sud



n X B:
68% du
sud



**Vous êtes
Ici!**



Pierre Auger Observatory - Malargue Campus

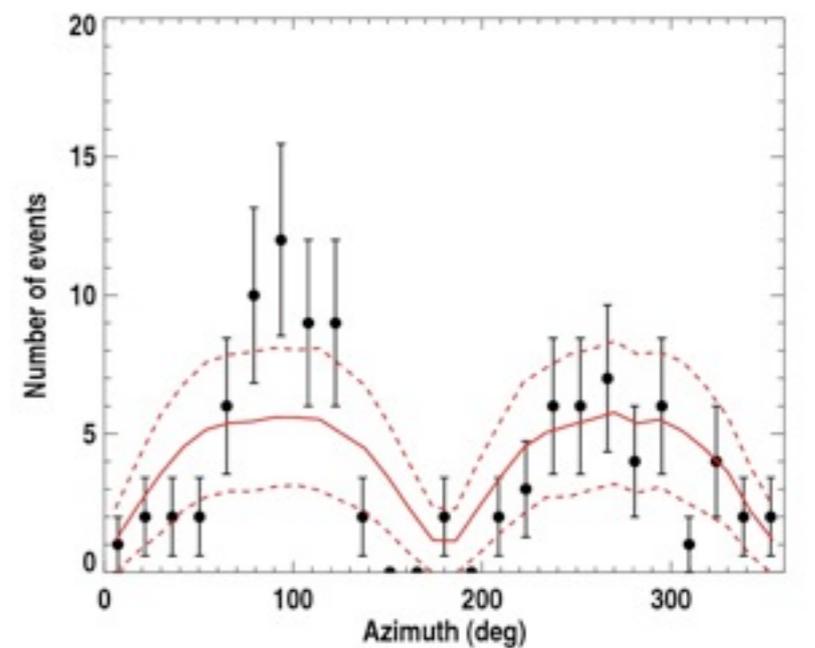
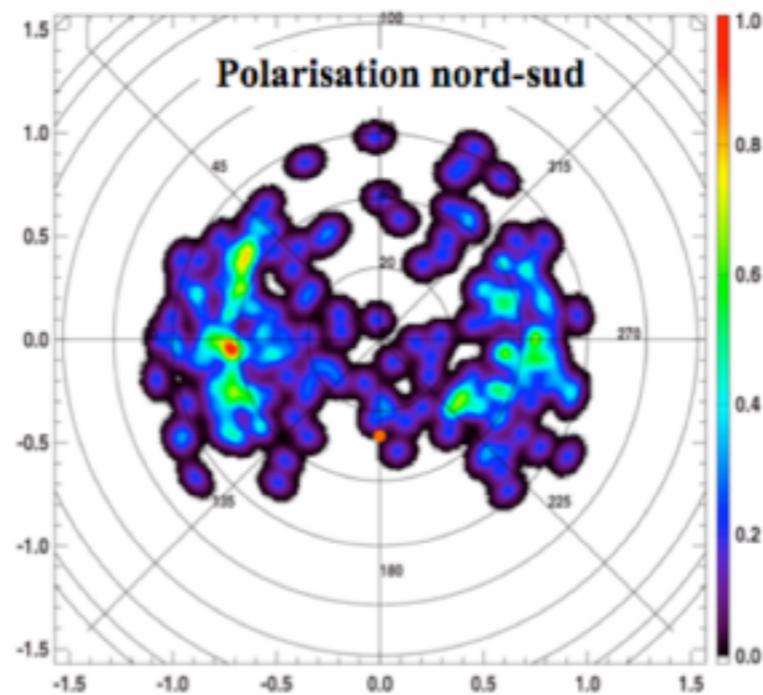
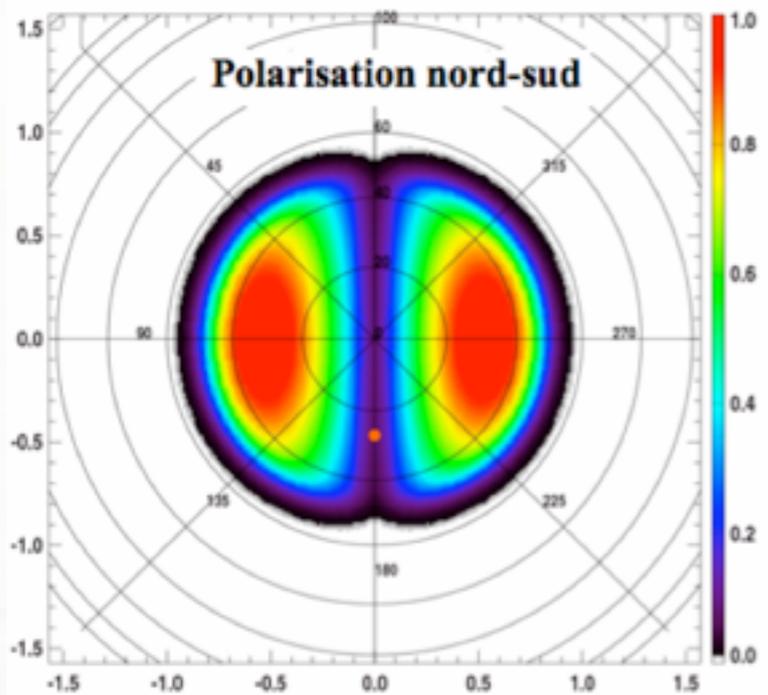
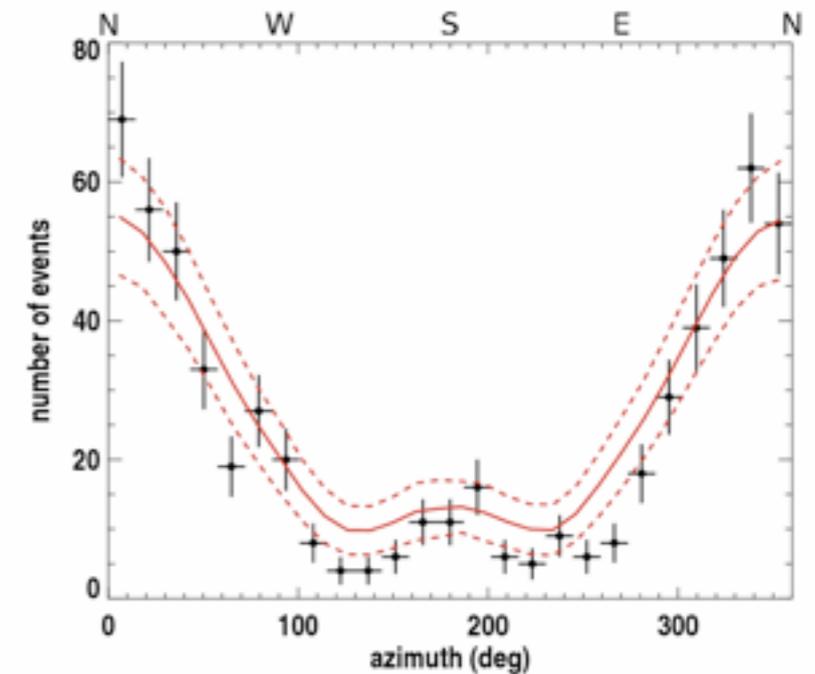
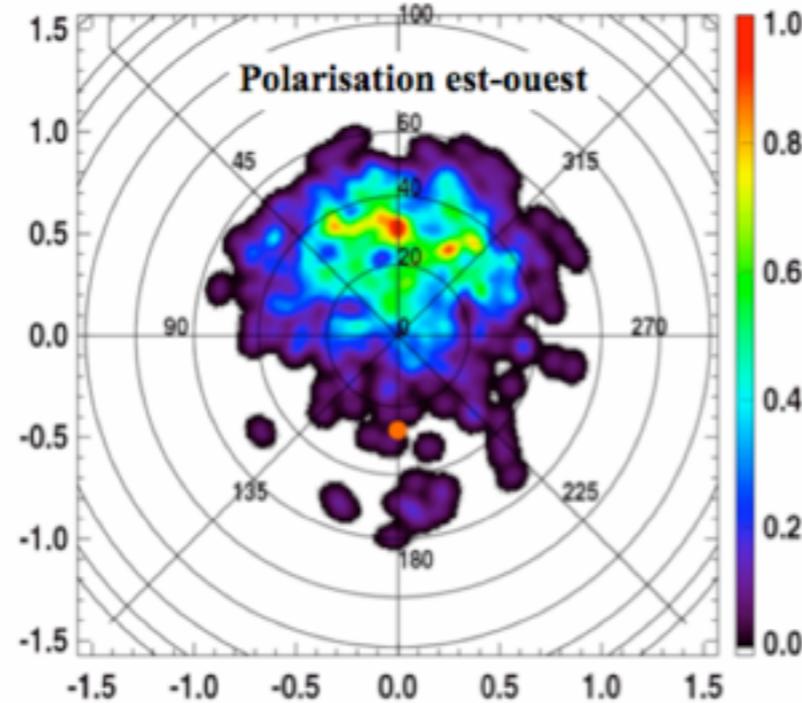
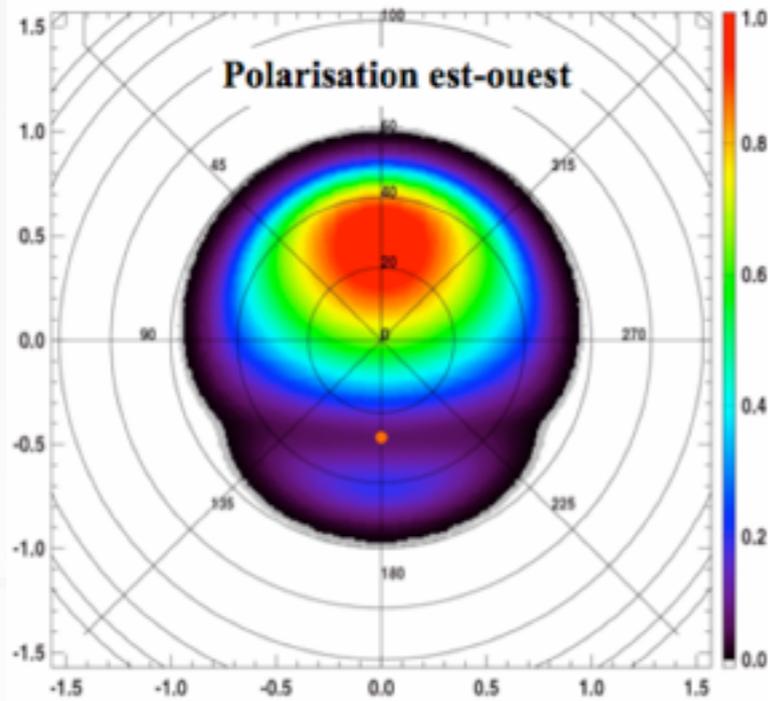
CODALEMA-II

Directions d'arrivée

Origine géomagnétique confirmée avec grande stat

Signal radio mesuré

$$\propto \begin{pmatrix} \text{Lorentz } (\vec{n} \times \vec{B}) \\ -\sin \theta \sin \phi \cos \theta_B - \cos \theta \sin \theta_B \\ \sin \theta \cos \phi \cos \theta_B \\ \sin \theta \cos \phi \sin \theta_B \end{pmatrix}$$



CODALEMA-II

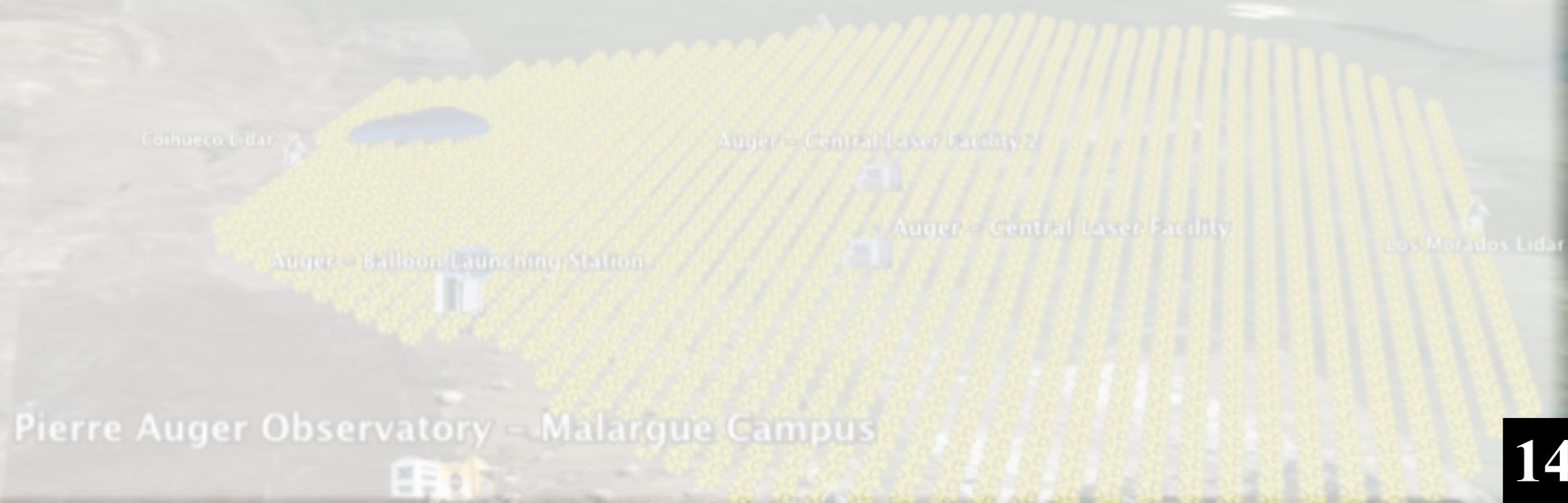
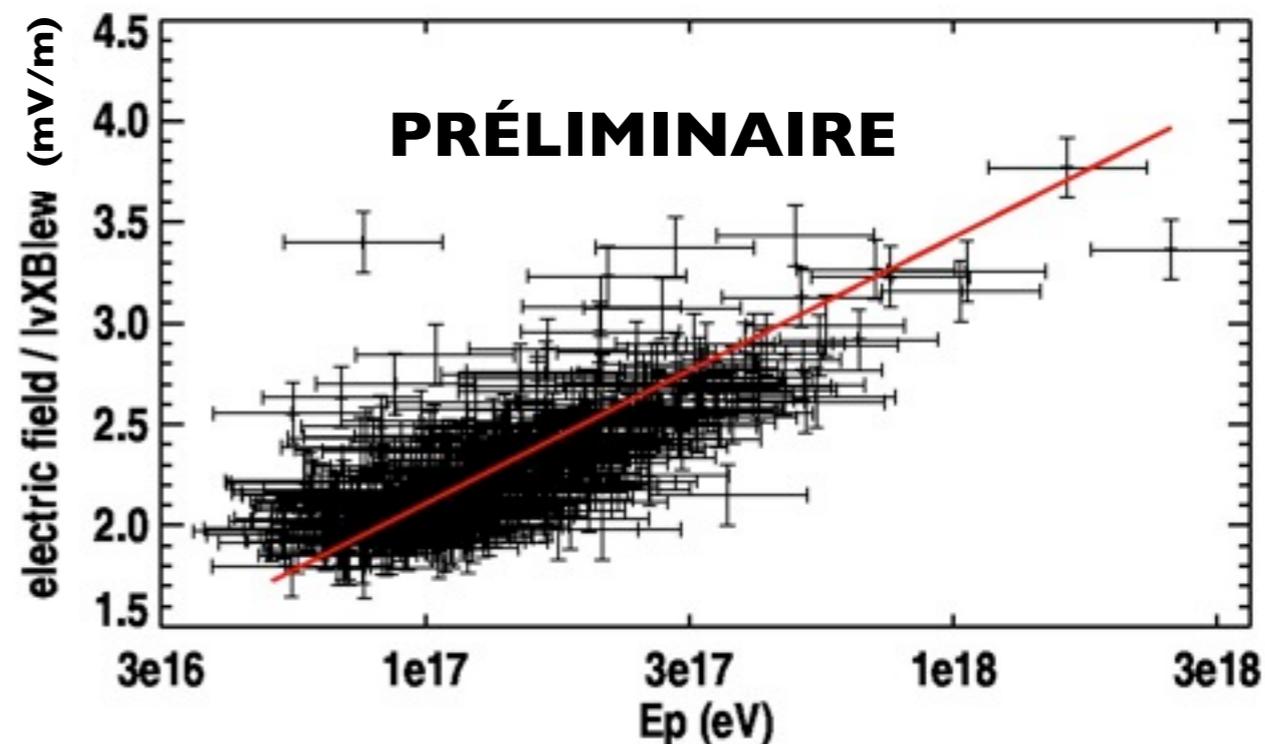
Corrélation champ électrique/énergie du primaire

$$\mathcal{E}_0^{\text{EW}} = (2.6 \pm 0.3) \left(\frac{B}{47 \mu\text{T}} \right) |(\mathbf{n} \times \mathbf{B})_{\text{EW}}| \left(\frac{E}{1 \text{ EeV}} \right)^{1.31 \pm 0.05} \text{ mV/m}$$

hypothèse profil exponentiel

la loi dépend fortement des hypothèses faites sur les erreurs selon x et y

On observe des événements avec des profils plats...



CODALEMA-II

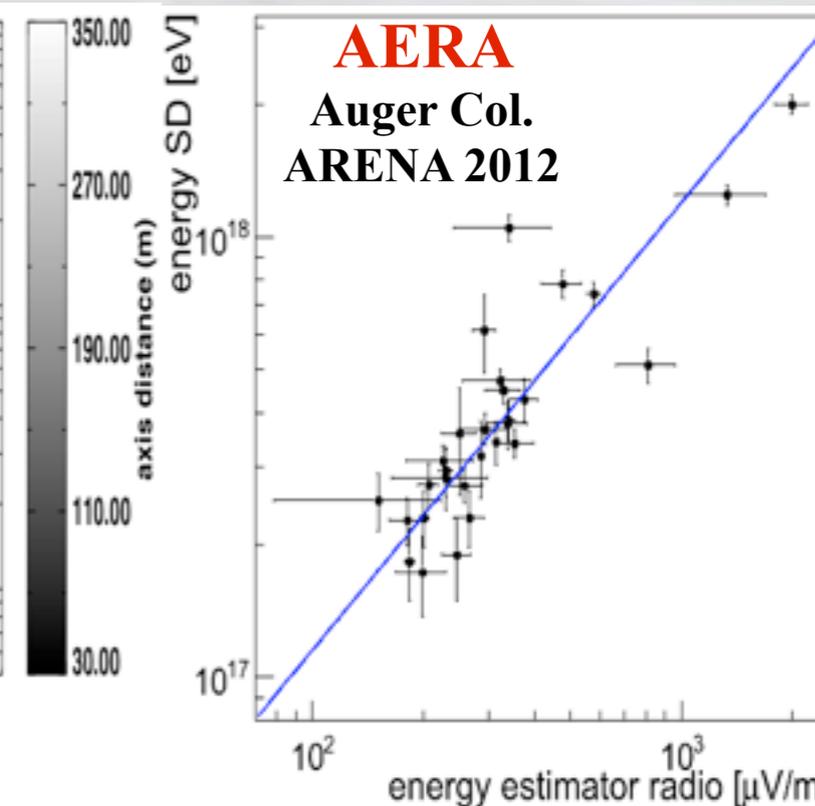
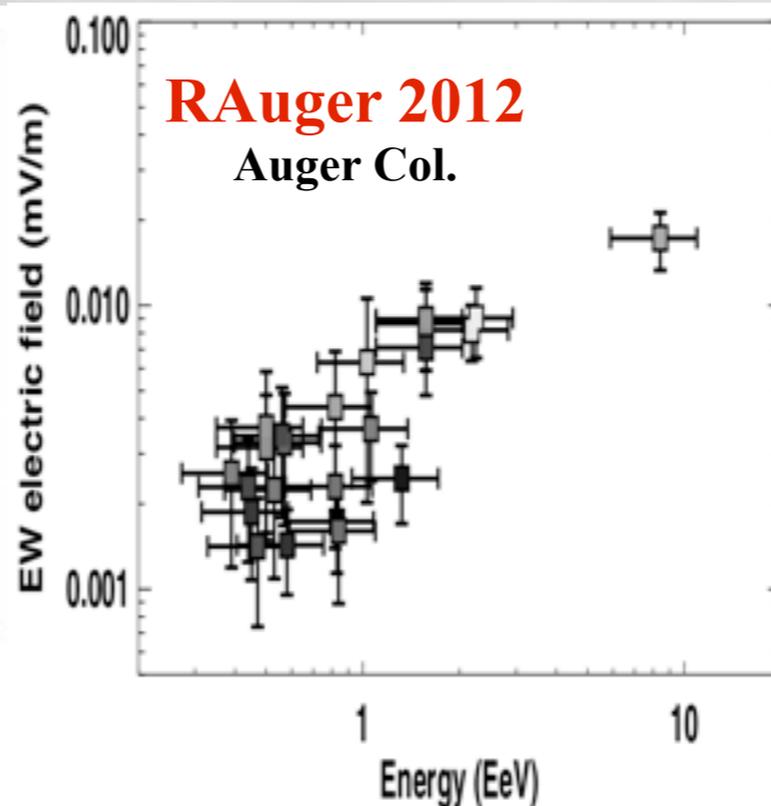
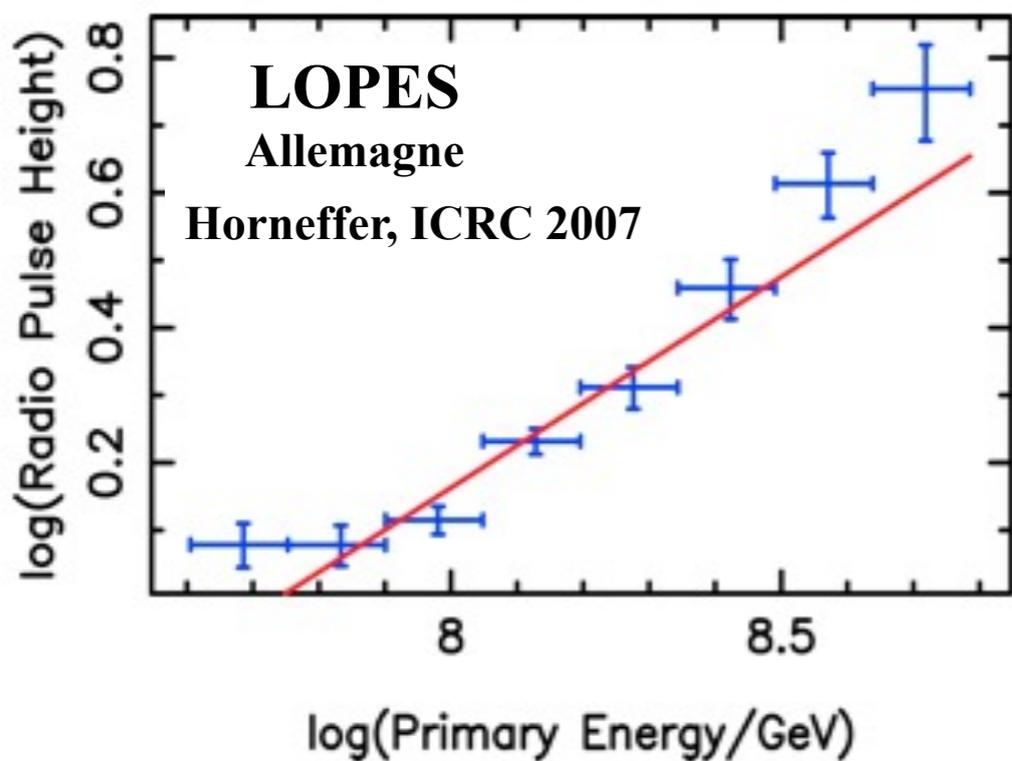
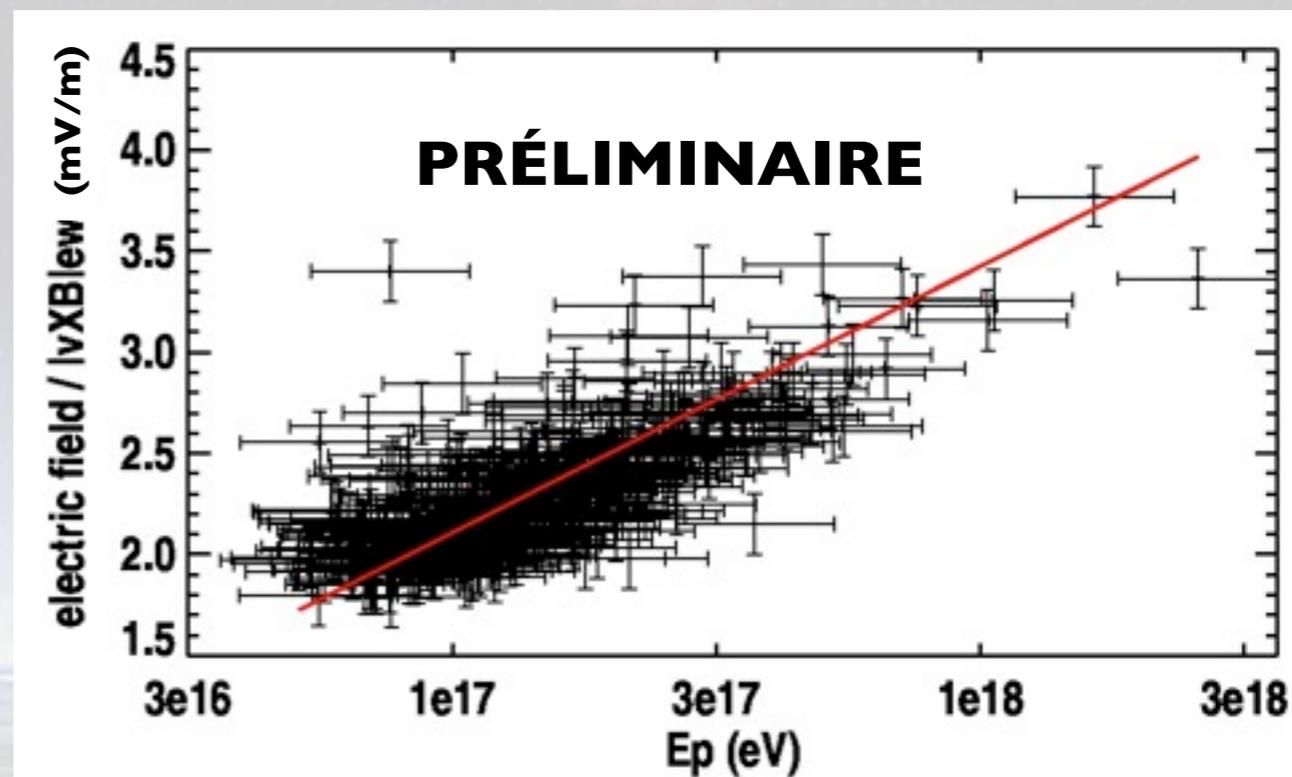
Corrélation champ électrique/énergie du primaire

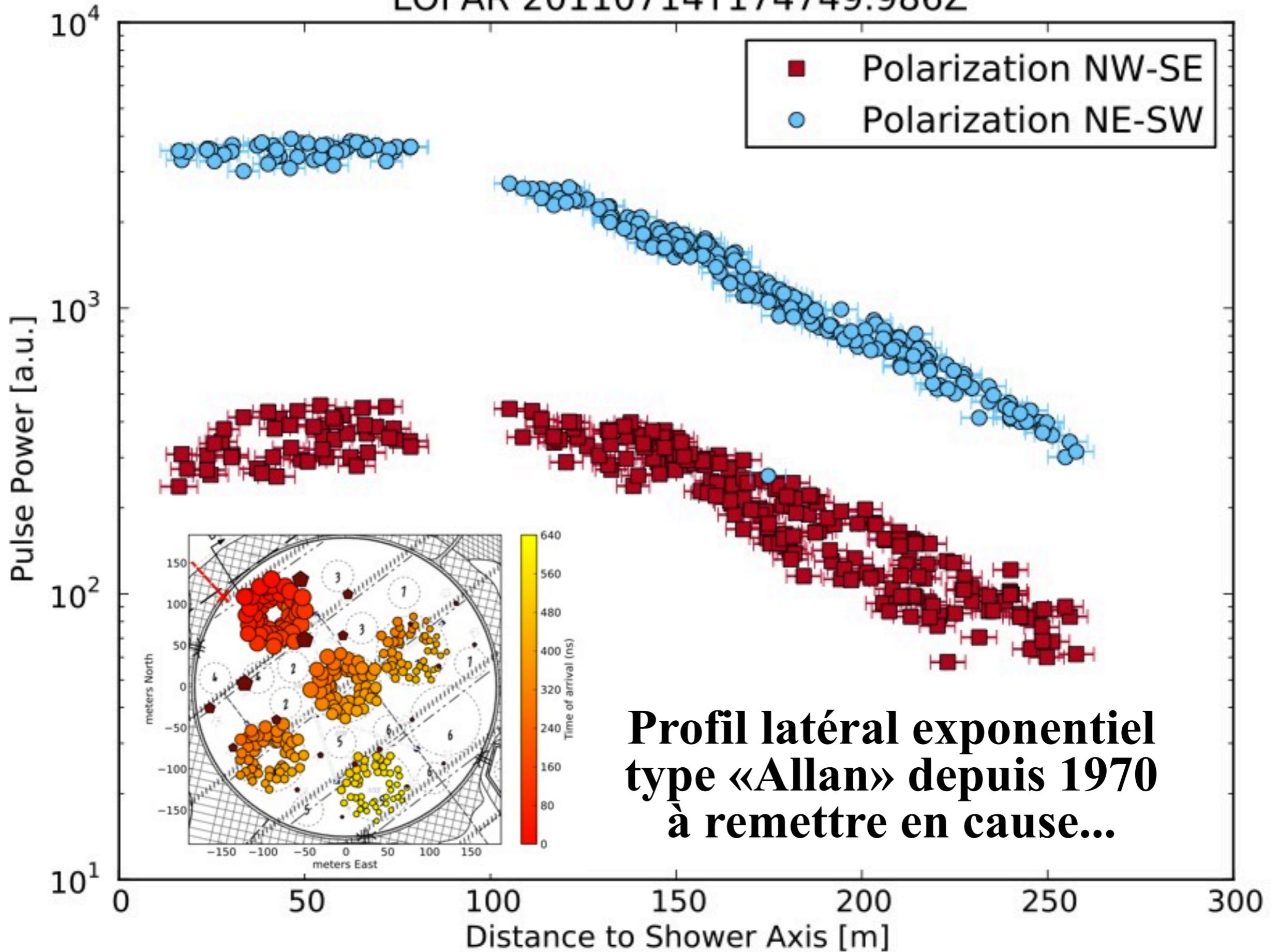
$$\mathcal{E}_0^{\text{EW}} = (2.6 \pm 0.3) \left(\frac{B}{47 \mu\text{T}} \right) |(\mathbf{n} \times \mathbf{B})_{\text{EW}}| \left(\frac{E}{1 \text{ EeV}} \right)^{1.31 \pm 0.05} \text{ mV/m}$$

hypothèse profil exponentiel

la loi dépend fortement des hypothèses faites sur les erreurs selon x et y

On observe des événements avec des profils plats...



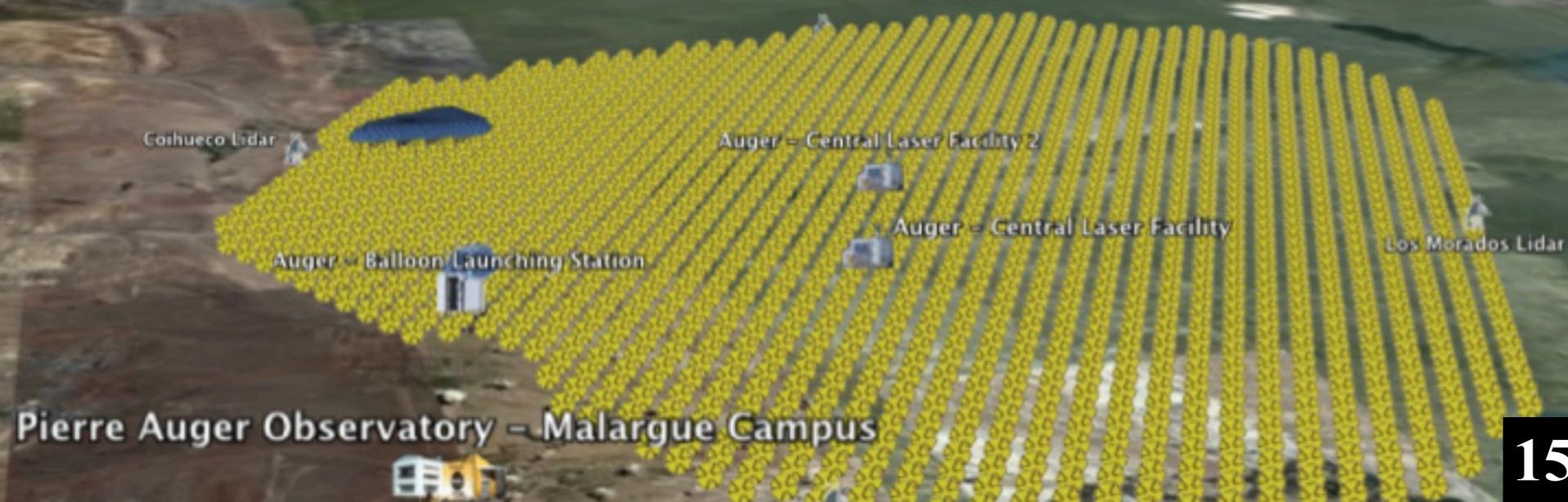


**Profil latéral exponentiel
type «Allan» depuis 1970
à remettre en cause...**

Enjeu pour la technique radio à partir de 2013 :

- Caractéristiques des rayons cosmiques à ultra-haute énergie (nature, énergie) ?
- Efficacité par rapport aux autres techniques (SD et FD sur l'expérience Auger)?

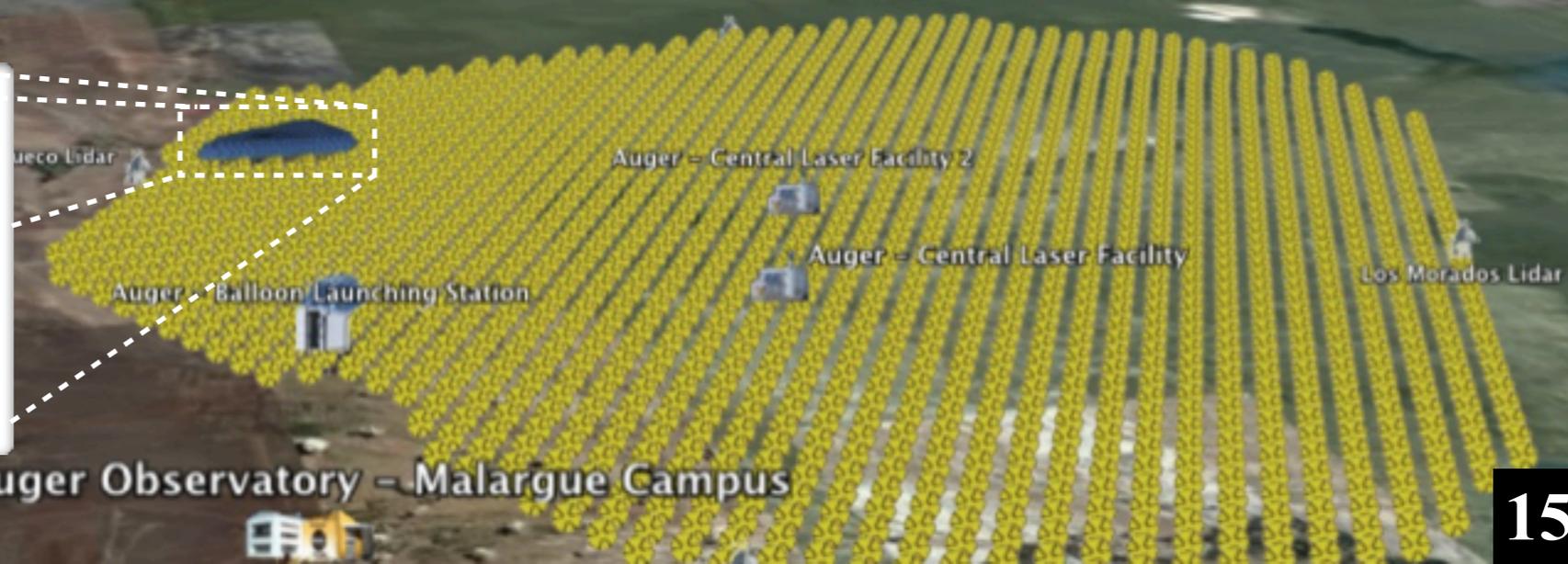
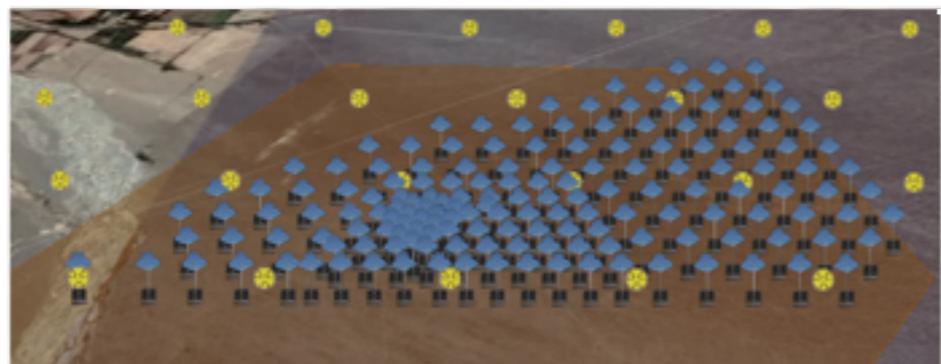
AERA doit répondre à ces questions pour envisager l'extension de la radio à plus grande échelle



Enjeu pour la technique radio à partir de 2013 :

- Caractéristiques des rayons cosmiques à ultra-haute énergie (nature, énergie) ?
- Efficacité par rapport aux autres techniques (SD et FD sur l'expérience Auger)?

AERA doit répondre à ces questions pour envisager l'extension de la radio à plus grande échelle



Pierre Auger Observatory - Malargue Campus

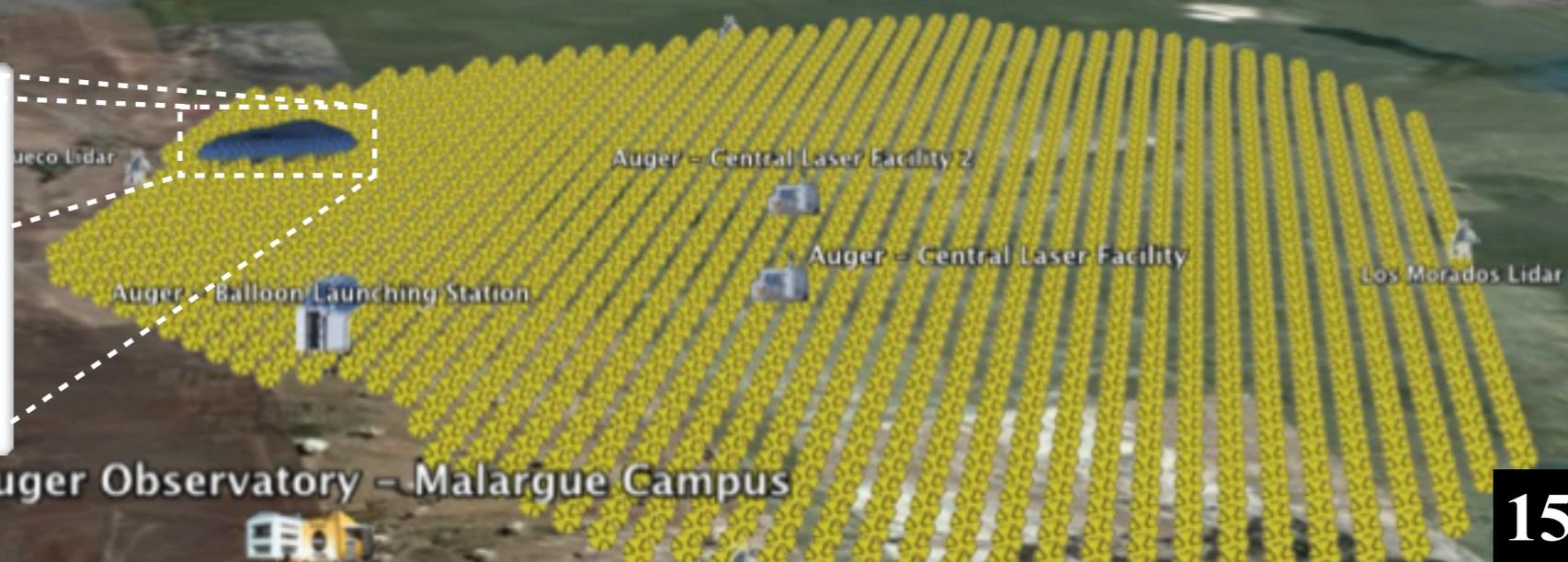
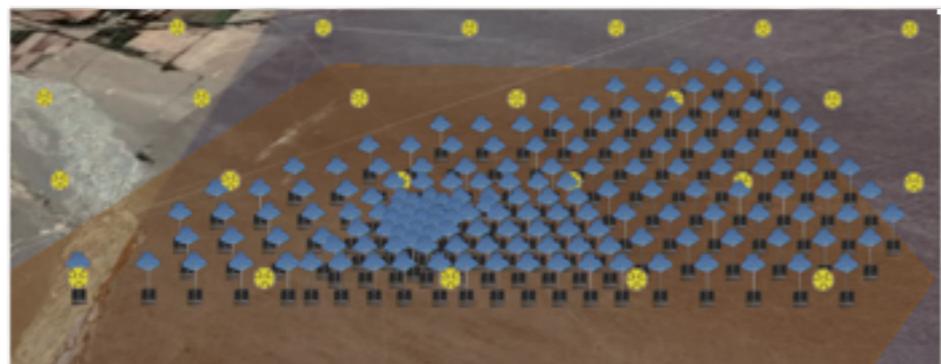


Enjeu pour la technique radio à partir de 2013 :

- Caractéristiques des rayons cosmiques à ultra-haute énergie (nature, énergie) ?
- Efficacité par rapport aux autres techniques (SD et FD sur l'expérience Auger)?

AERA doit répondre à ces questions pour envisager l'extension de la radio à plus grande échelle

**Parallèlement aux développements techniques :
Nécessité de développer des outils de simulation pour aider à caractériser le signal radio**



Plan de la présentation

- 1 **Le rayonnement cosmique d'ultra haute énergie**
- 2 **La radio détection des gerbes atmosphériques**
 - a Bref historique
 - b Radio détection selon CODALEMA & compagnie...
- 3 **Nouvel outil de simulation radio des gerbes : SELFAS**
- 4 **Nouvelles interprétations avec SELFAS**
 - a Mise en évidence de l'existence de l'excès de charge
 - b Effet de l'indice de l'air, «effet cerenkov»
 - c Signal de la mort subite de la gerbe
- 5 **Conclusion et perspectives**

Plan de la présentation

- 1 Le rayonnement cosmique d'ultra haute énergie
- 2 La radio détection des gerbes atmosphériques
 - a Bref historique
 - b Radio détection selon CODALEMA & compagnie...
- 3 **Nouvel outil de simulation radio des gerbes : SELFAS**
- 4 **Nouvelles interprétations avec SELFAS**
 - a Mise en évidence de l'existence de l'excès de charge
 - b Effet de l'indice de l'air, «effet cerenkov»
 - c Signal de la mort subite de la gerbe
- 5 **Conclusion et perspectives**

Pierre Auger Observatory - Malargue Campus



Radio émission des gerbes : approches modernes

Macroscopique

En référence à
Kahn & Lerche

I. Roy. Soc. Lond. Proc. Ser. A(1966)

Front de gerbe
comme
une source unique

Courant transverse

Le code MGMR

Scholten et al

- + Gain en temps de calcul
- Simplification du front de gerbe
 - pas de dispersion latérale
 - pas de distribution angulaire

Microscopique

Initialement proposée par
Falcke et Gorham:

Astropart. 236 Physics 19 (2003)

Considérer chaque
particule secondaire du
front de gerbe

Les codes REAS, SELFAS, ZHAires

- + Description complète de la zone d'émission (front de gerbe)
- Temps de calcul

Radio émission des gerbes : approches modernes

SELFAS

Simulation of **E**lectric **F**ield emitted by **A**ir
Shower

Développé durant ma thèse

- Outil autonome
pas de générateur de gerbes
- Basé sur le concept
d'universalité des gerbes,
(diverses paramétrisations)
Lafebre et al AP, 31(3) :243 – 254, 2009.
- Formalisme de champ
électrique différent

- Astropart. Phys., 35(11):733 – 741, 2012.
- AIP Proc. ARENA 2012 to be published
- NIMA Nov. 2010 10.1016/j.nima.2010.10.123.

Microscopique

Initialement proposée par

Falcke et Gorham:

Astropart. 236 Physics 19 (2003)

Considérer chaque
particule secondaire du
front de gerbe

Les codes REAS, SELFAS, ZHAires

**+ Description complète de la zone
d'émission (front de gerbe)**

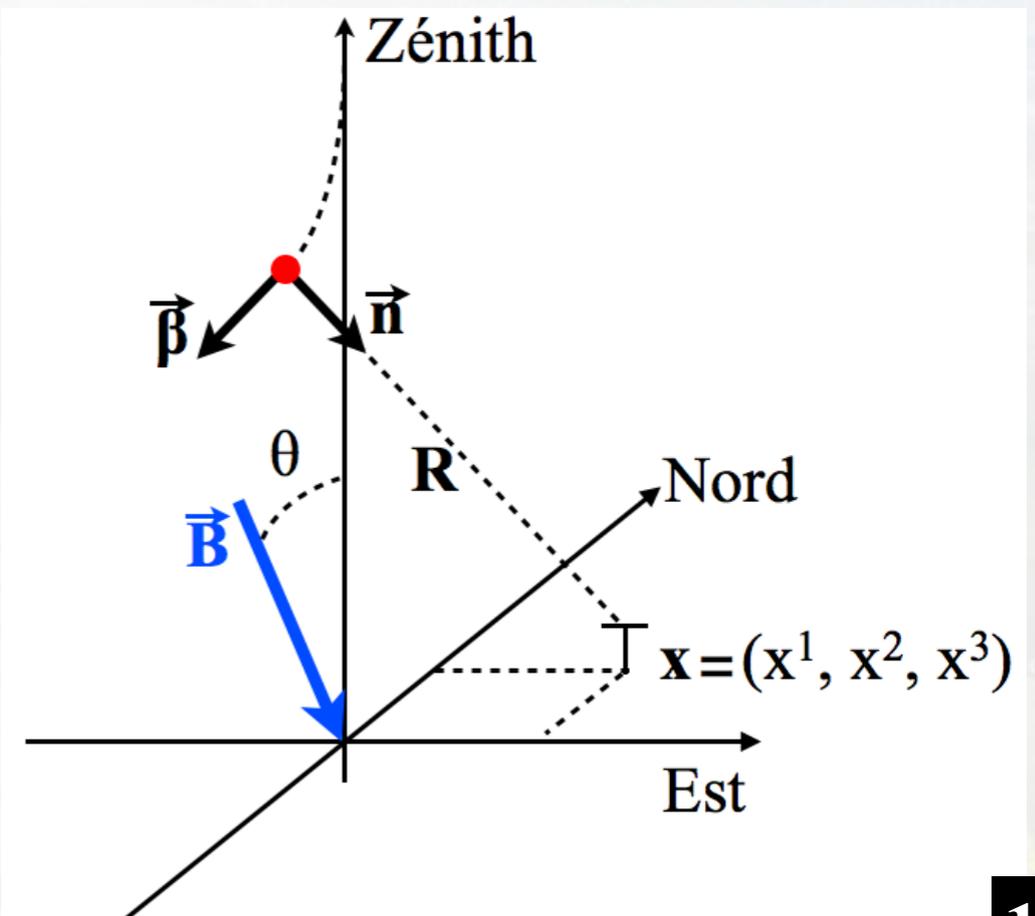
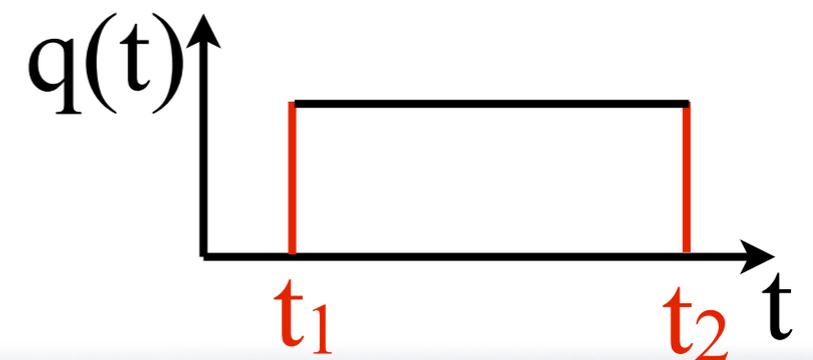
- Temps de calcul

SELFAS : Principe

• Modélisation du champ électrique pour une particule

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

reçu en \mathbf{x} à $t = t_{\text{ret}} + \frac{R(t_{\text{ret}})}{c}$

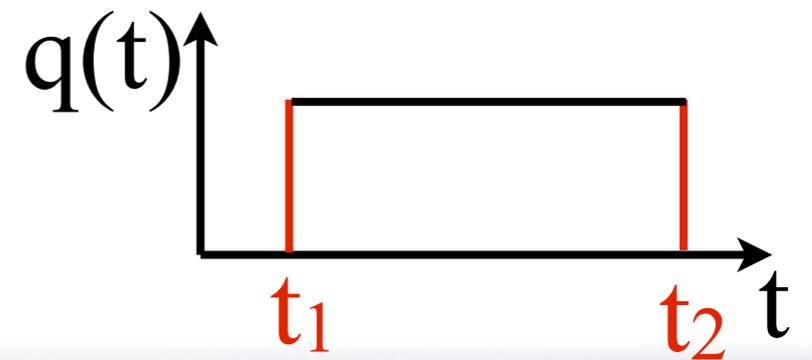


SELFAS : Principe

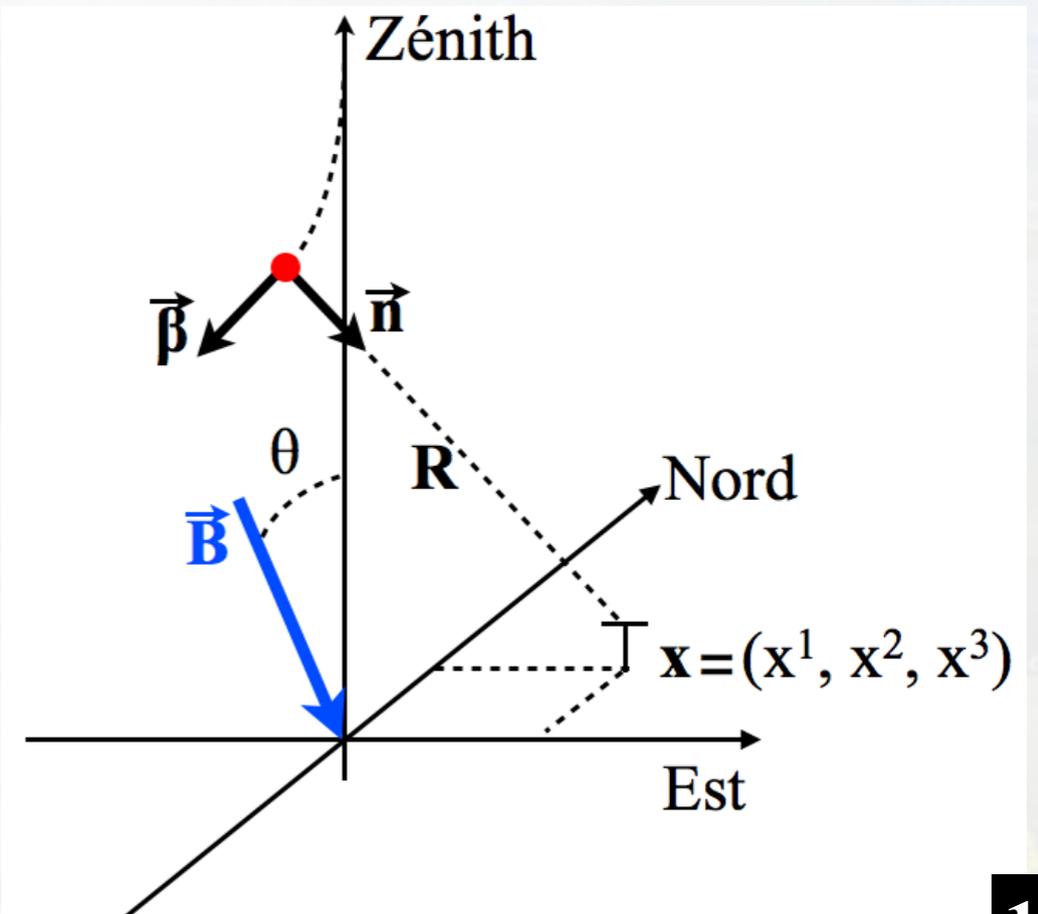
• Modélisation du champ électrique pour une particule

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

reçu en \mathbf{x} à $t = t_{\text{ret}} + \frac{R(t_{\text{ret}})}{c}$



Contribution type
coulombienne

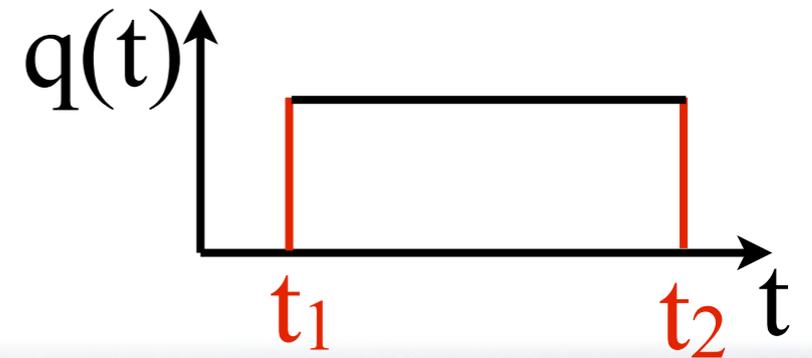


SELFAS : Principe

• Modélisation du champ électrique pour une particule

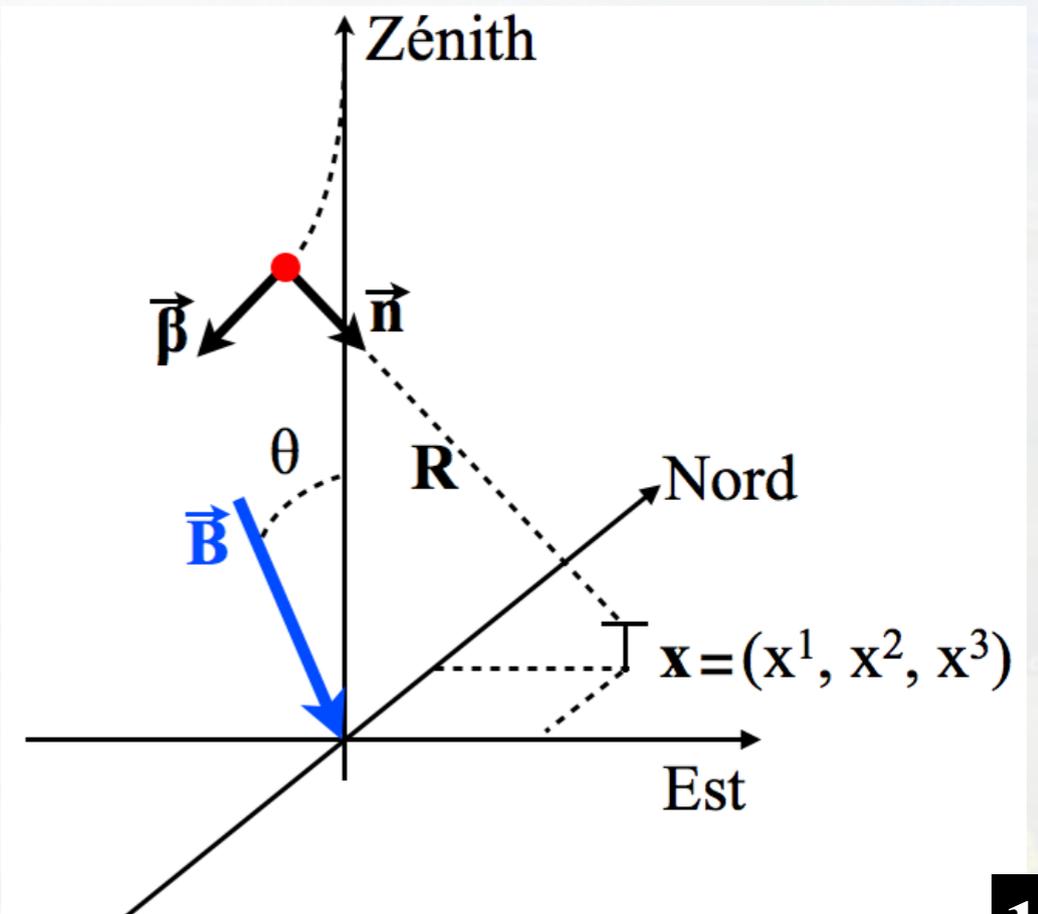
$$\mathbf{E}(\mathbf{x}, t) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left\{ \left[\frac{\mathbf{n}q(t_{\text{ret}})}{R^2(1 - \boldsymbol{\beta} \cdot \mathbf{n})} \right]_{\text{ret}} + \frac{1}{c} \frac{\partial}{\partial t} \left[\frac{\mathbf{n}q(t_{\text{ret}})}{R(1 - \boldsymbol{\beta} \cdot \mathbf{n})} \right]_{\text{ret}}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

reçu en \mathbf{x} à $t = t_{\text{ret}} + \frac{R(t_{\text{ret}})}{c}$



Contribution type coulombienne

Variation de la charge

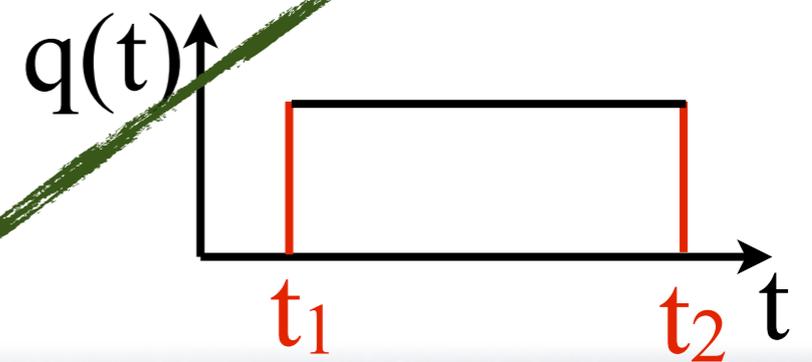


SELFAS : Principe

• Modélisation du champ électrique pour une particule

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

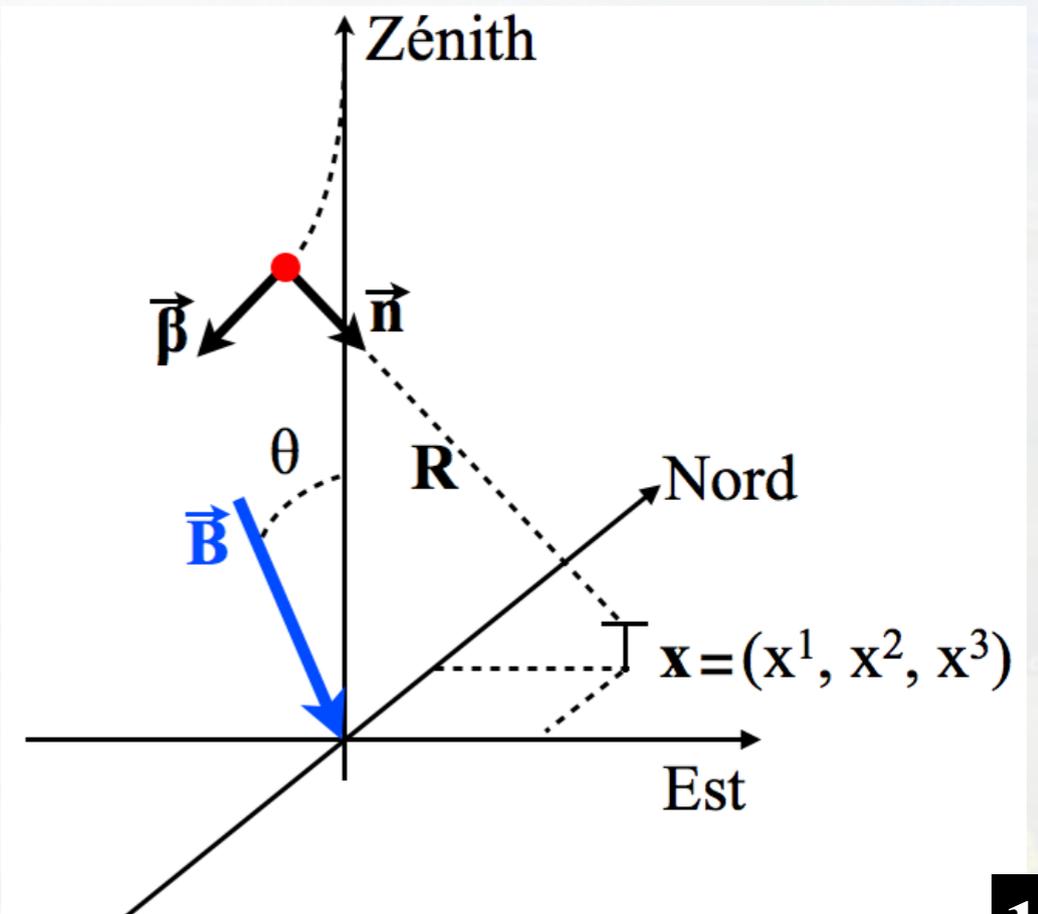
reçu en \mathbf{x} à $t = t_{\text{ret}} + \frac{R(t_{\text{ret}})}{c}$



Contribution type coulombienne

Variation de la charge

Variation du courant

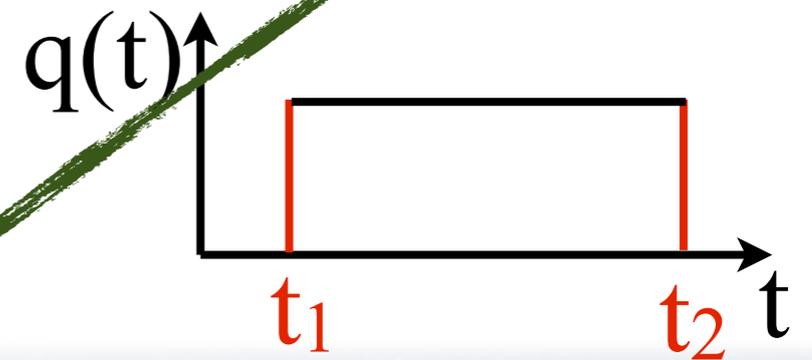


SELFAS : Principe

• Modélisation du champ électrique pour une particule

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

reçu en \mathbf{x} à $t = t_{\text{ret}} + \frac{R(t_{\text{ret}})}{c}$



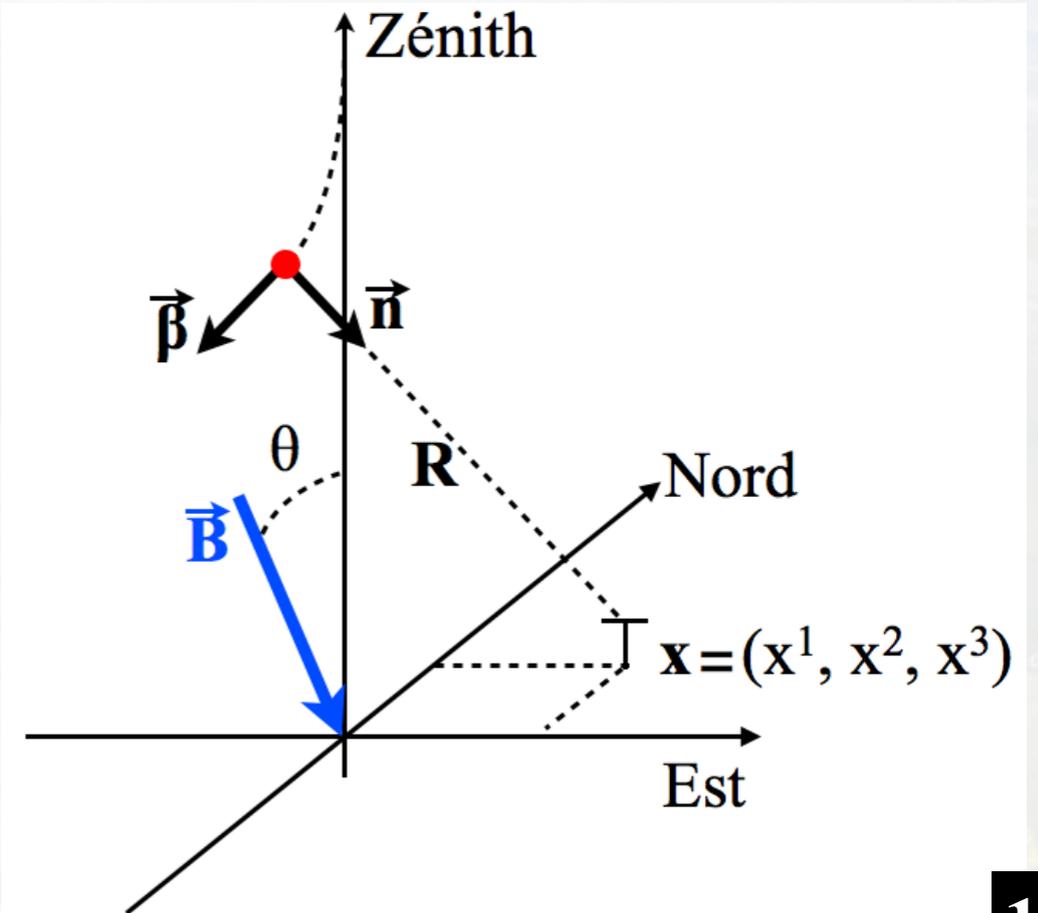
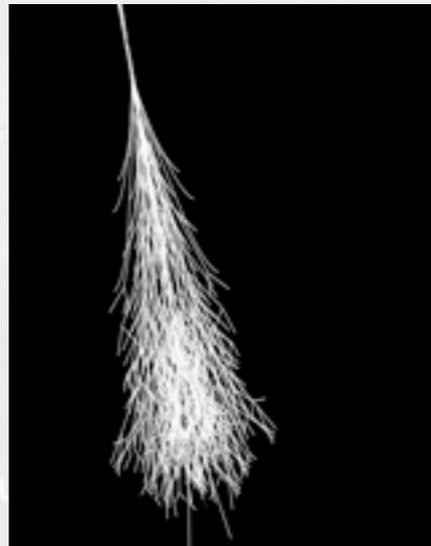
Contribution type coulombienne

Variation de la charge

Variation du courant

• Appliquée à toutes les particules générées

$$\mathbf{E}_{\text{tot}}(\mathbf{x}, t) = \sum_{i=1}^{\zeta} \mathbf{E}_i(\mathbf{x}, t)$$



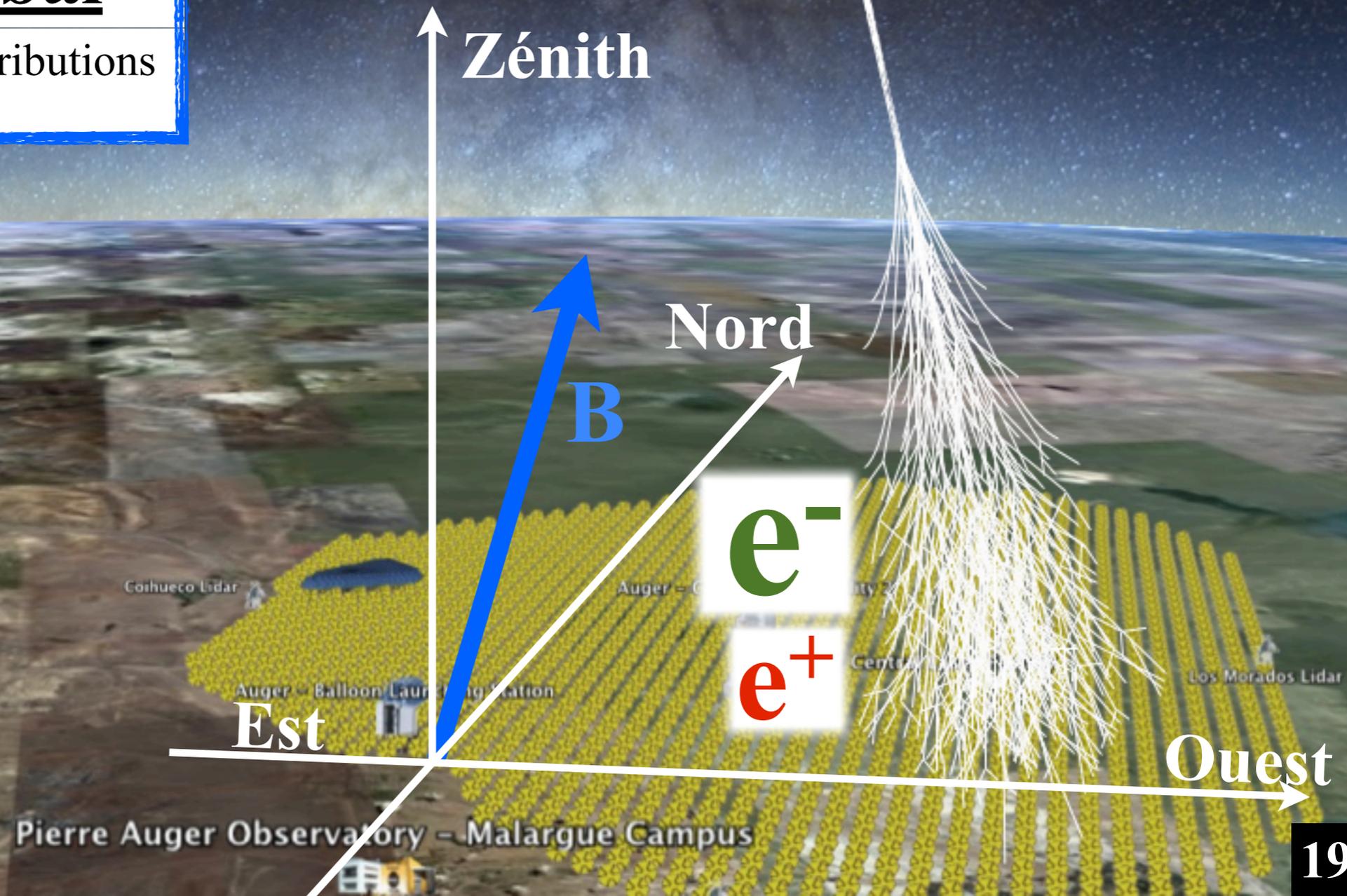
Finalement :

Dans SELFAS, le champ électrique des gerbes dans le domaine du MHz est la somme de trois contributions

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

Coulombien global

Sommation de toutes les contributions coulombiennes



Finalement :

Dans SELFAS, le champ électrique des gerbes dans le domaine du MHz est la somme de trois contributions

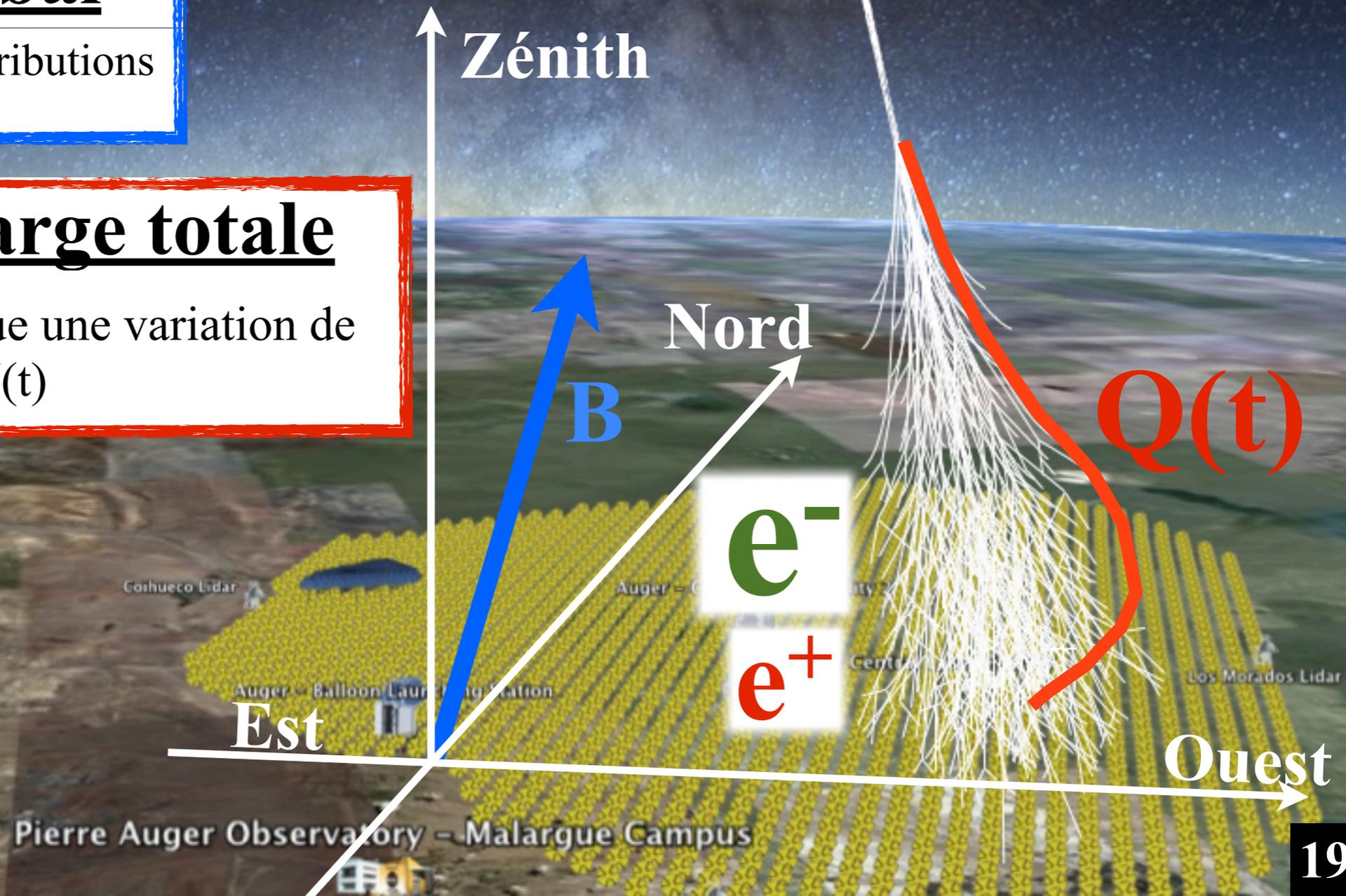
$$\mathbf{E}_{tot}(\mathbf{x}, t) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left\{ \sum_{i=1} \left[\frac{n_i q_i(t_{ret})}{R_i^2 (1 - \beta_i \cdot \mathbf{n}_i)} \right]_{ret} + \frac{1}{c} \frac{\partial}{\partial t} \sum_{i=1} \left[\frac{n_i q_i(t_{ret})}{R_i (1 - \beta_i \cdot \mathbf{n}_i)} \right]_{ret} -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

Coulombien global

Sommation de toutes les contributions coulombiennes

Variation de charge totale

L'excès d'électrons implique une variation de charge globale $Q(t) = \alpha(t) N(t)$



Finalemment :

Dans SELFAS, le champ électrique des gerbes dans le domaine du MHz est la somme de trois contributions

$$E_{tot}(x, t) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left\{ \sum_{i=1} \left[\frac{n_i q_i(t_{ret})}{R_i^2 (1 - \beta_i \cdot n_i)} \right]_{ret} + \frac{1}{c} \frac{\partial}{\partial t} \sum_{i=1} \left[\frac{n_i q_i(t_{ret})}{R_i (1 - \beta_i \cdot n_i)} \right]_{ret} + \frac{1}{c^2} \frac{\partial}{\partial t} \sum_{i=1} \left[\frac{v_i q_i(t_{ret})}{R_i (1 - \beta_i \cdot n_i)} \right]_{ret} \right\}$$

Coulombien global

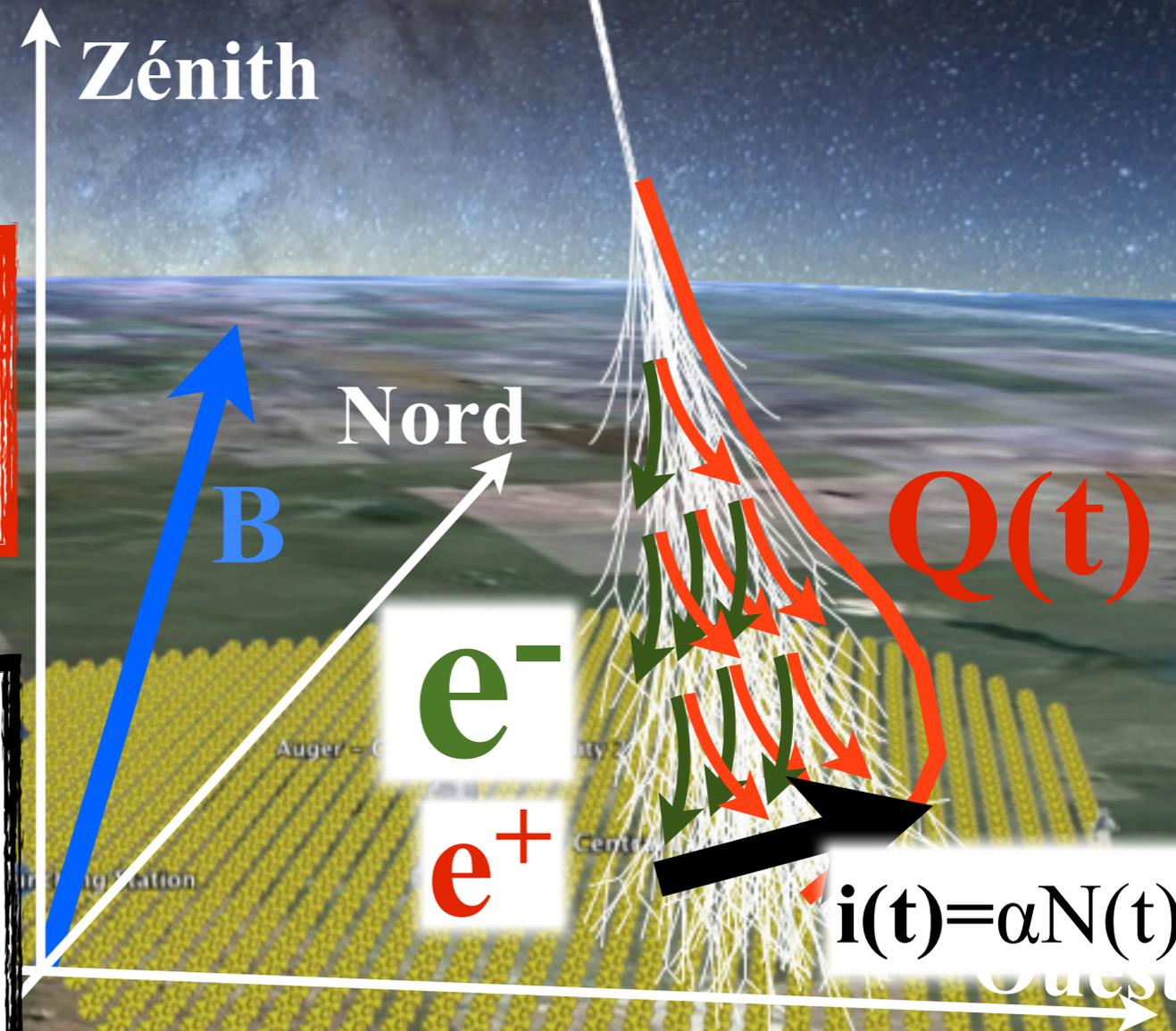
Sommation de toutes les contributions coulombiennes

Variation de charge totale

L'excès d'électrons implique une variation de charge globale $Q(t) = \alpha(t) N(t)$

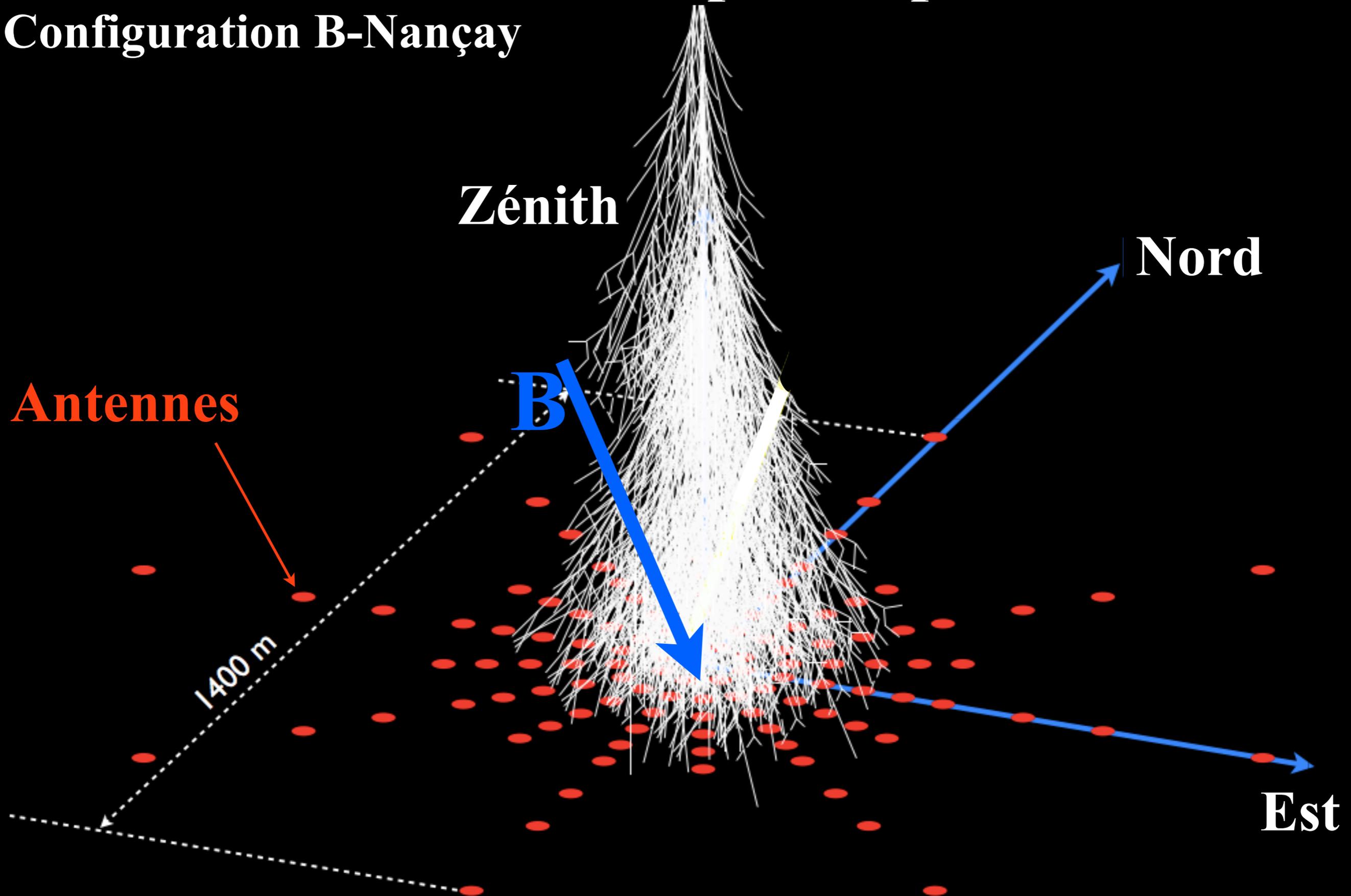
Variation du courant transverse

La déviation systématique des électrons et positrons dans le champ géomagnétique implique un courant transverse proportionnel à $N(t)$

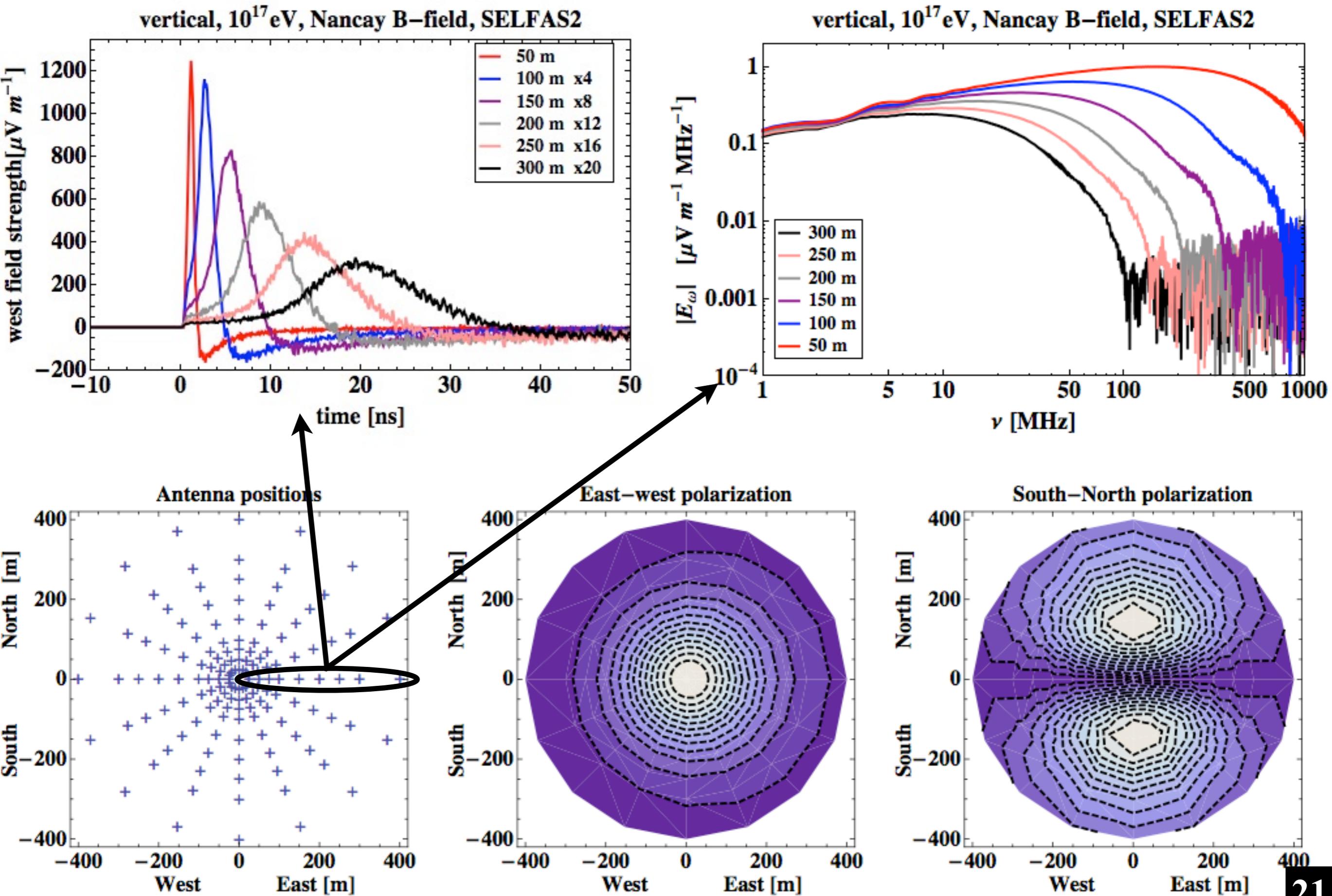


SELFAS : 10^{17} eV initiée par un proton

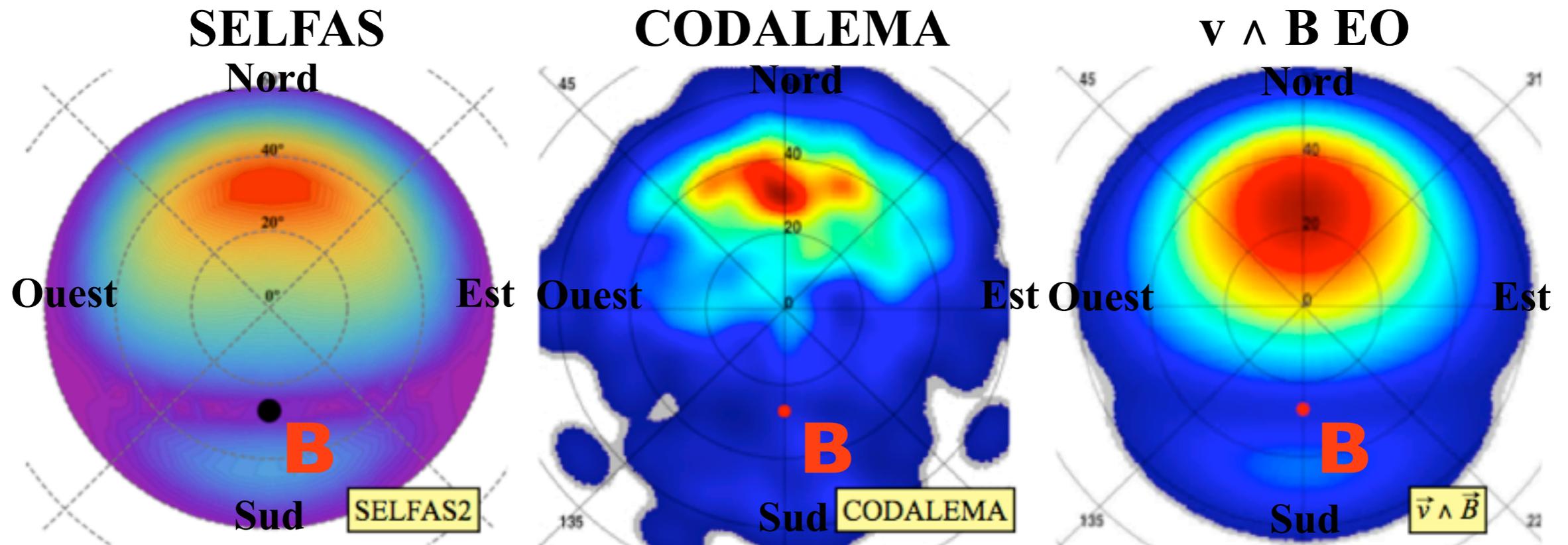
Configuration B-Nançay



SELFAS : Proton vertical de 10^{17} eV B-Nançay



Première estimation de carte du ciel pour le site de CODALEMA



- Mécanisme de Lorentz respecté au premier ordre
- SELFAS reproduit la dépendance à la direction d'arrivée des gerbes

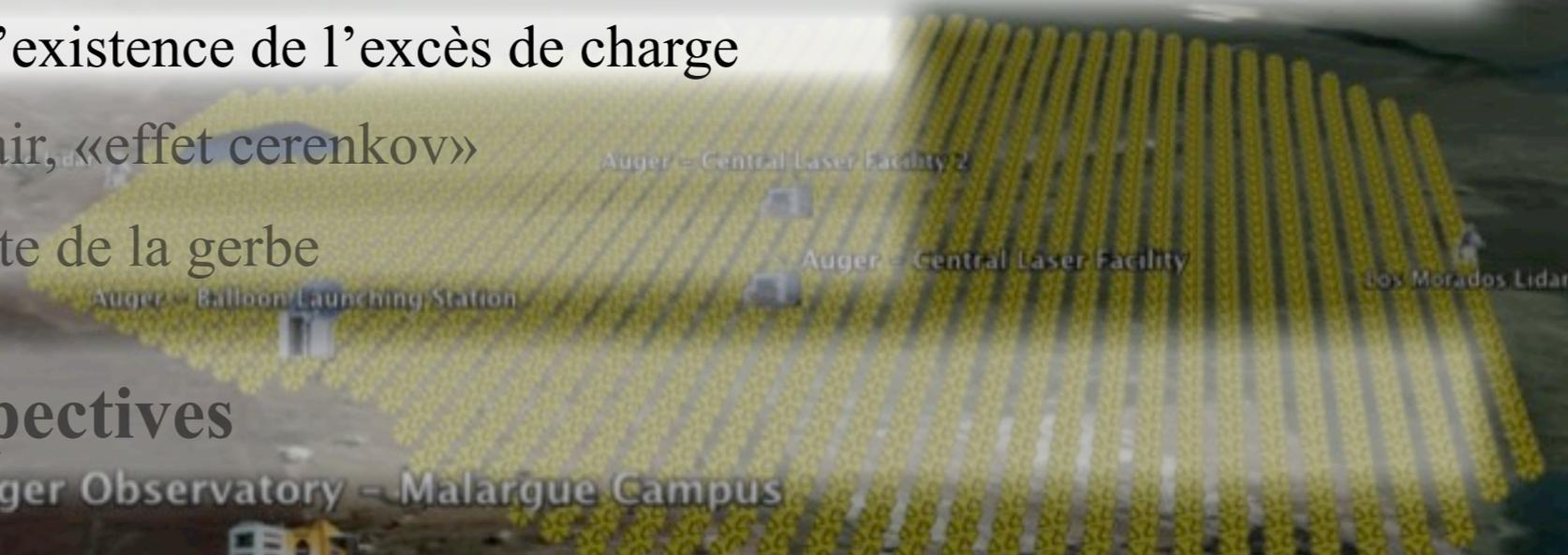
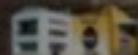
Plan de la présentation

- 1 **Le rayonnement cosmique d'ultra haute énergie**
- 2 **La radio détection des gerbes atmosphériques**
 - a Bref historique
 - b Radio détection selon CODALEMA & compagnie...
- 3 **Nouvel outil de simulation radio des gerbes : SELFAS**
- 4 **Nouvelles interprétations avec SELFAS**
 - a Mise en évidence de l'existence de l'excès de charge
 - b Effet de l'indice de l'air, «effet cerenkov»
 - c Signal de la mort subite de la gerbe
- 5 **Conclusion et perspectives**

Plan de la présentation

- 1 Le rayonnement cosmique d'ultra haute énergie
- 2 La radio détection des gerbes atmosphériques
 - a Bref historique
 - b Radio détection selon CODALEMA & compagnie...
- 3 **Nouvel outil de simulation radio des gerbes : SELFAS**
- 4 **Nouvelles interprétations avec SELFAS**
 - a Mise en évidence de l'existence de l'excès de charge
 - b Effet de l'indice de l'air, «effet cerenkov»
 - c Signal de la mort subite de la gerbe
- 5 **Conclusion et perspectives**

Pierre Auger Observatory - Malargue Campus



Selon SELFAS : deux contributions au champ

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



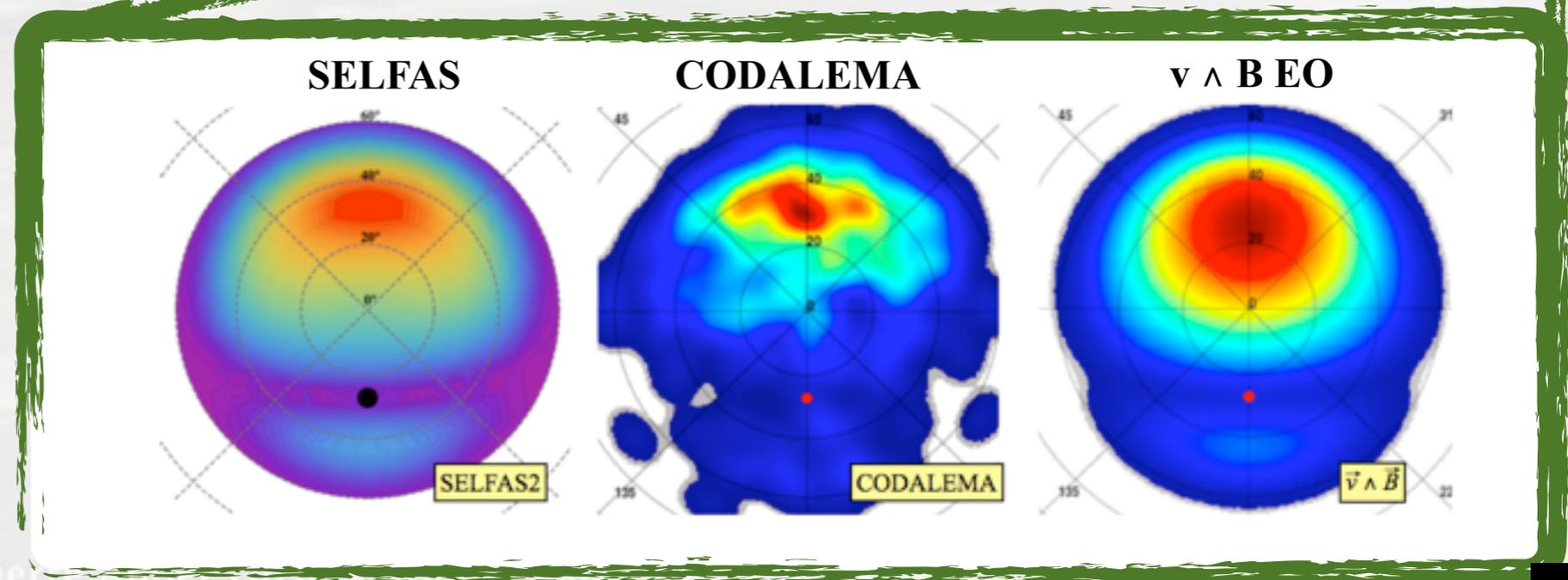
Selon SELFAS : deux contributions au champ

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

négligeable

**Courant
transverse**

**Dominante
Expé+Simu**



Selon SELFAS : deux contributions au champ

$$\mathbf{E}_{\text{tot}}(\mathbf{x}, t) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left\{ \sum_{i=1}^{\zeta} \left[\frac{n_i q_i(t_{\text{ret}})}{R_i(1 - \beta_i \cdot \mathbf{n}_i)} \right]_{\text{ret}} \right.$$

négligeable

$$\frac{1}{c} \frac{\partial}{\partial t} \sum_{i=1}^{\zeta} \left[\frac{n_i q_i(t_{\text{ret}})}{R_i(1 - \beta_i \cdot \mathbf{n}_i)} \right]_{\text{ret}}$$

Excès de charge

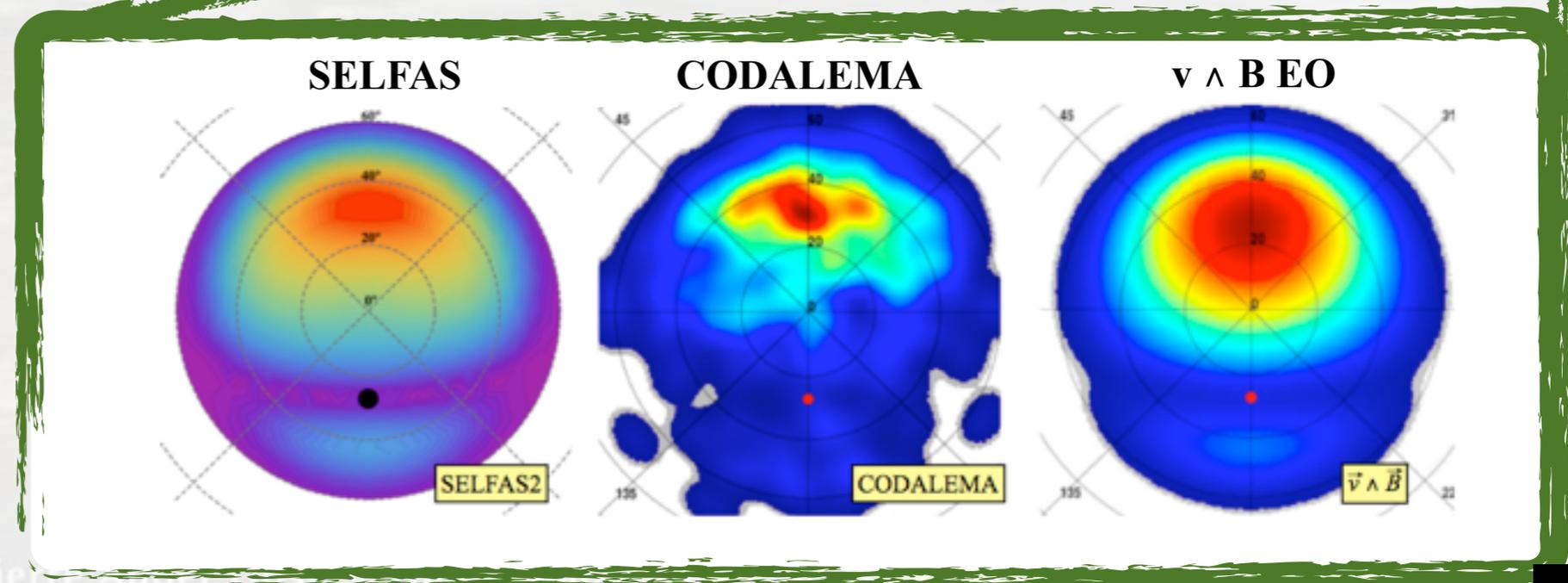
$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial}{\partial t} \sum_{i=1}^{\zeta} \left[\frac{\mathbf{v}_i q_i(t_{\text{ret}})}{R_i(1 - \beta_i \cdot \mathbf{n}_i)} \right]_{\text{ret}}$$

**Courant
transverse**

**Quel est sa contribution?
Mise en évidence?**

????

**Dominante
Expé+Simu**



Selon SELFAS : deux contributions au champ

$$\mathbf{E}_{\text{tot}}(\mathbf{x}, t) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left\{ \sum_{i=1}^{\zeta} \left[\frac{n_i q_i(t_{\text{ret}})}{R_i(1 - \beta_i \cdot \mathbf{n}_i)} \right]_{\text{ret}} \right.$$

$$\frac{1}{c} \frac{\partial}{\partial t} \sum_{i=1}^{\zeta} \left[\frac{n_i q_i(t_{\text{ret}})}{R_i(1 - \beta_i \cdot \mathbf{n}_i)} \right]_{\text{ret}}$$

Excès de charge

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial}{\partial t} \sum_{i=1}^{\zeta} \left[\frac{\mathbf{v}_i q_i(t_{\text{ret}})}{R_i(1 - \beta_i \cdot \mathbf{n}_i)} \right]_{\text{ret}}$$

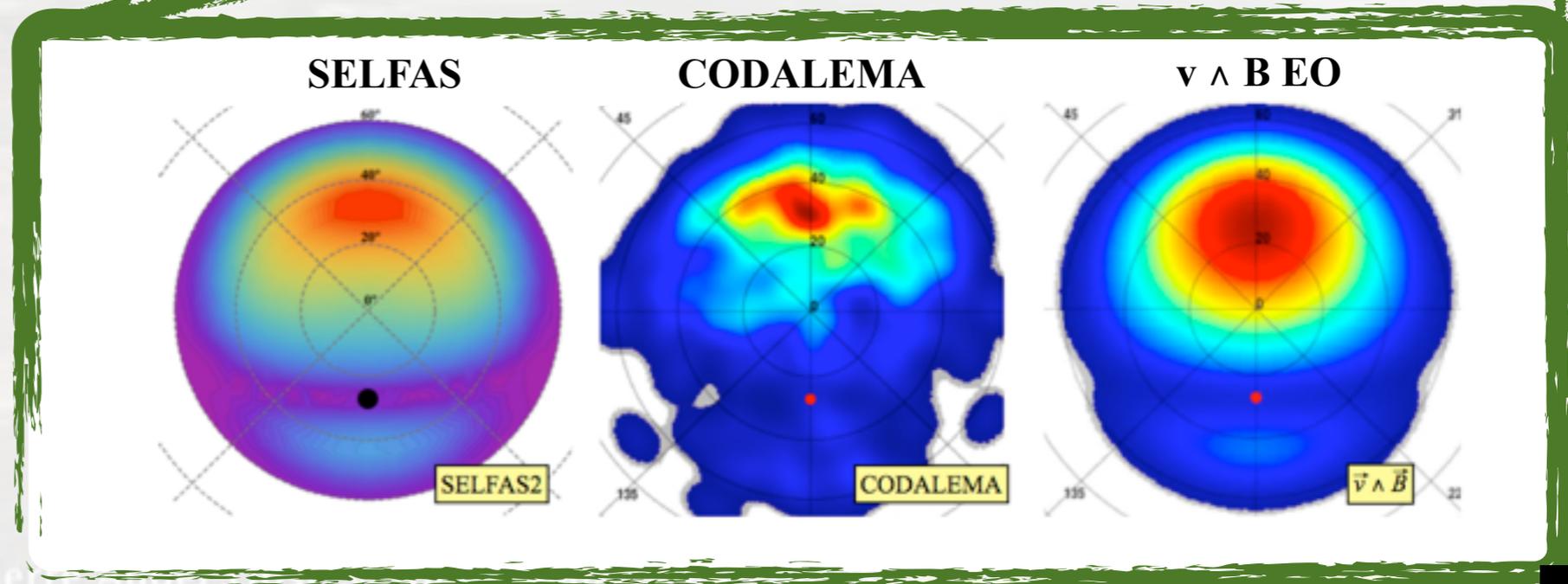
Courant transverse

Quel est sa contribution?
Mise en évidence?

????

Dominante
Expé+Simu

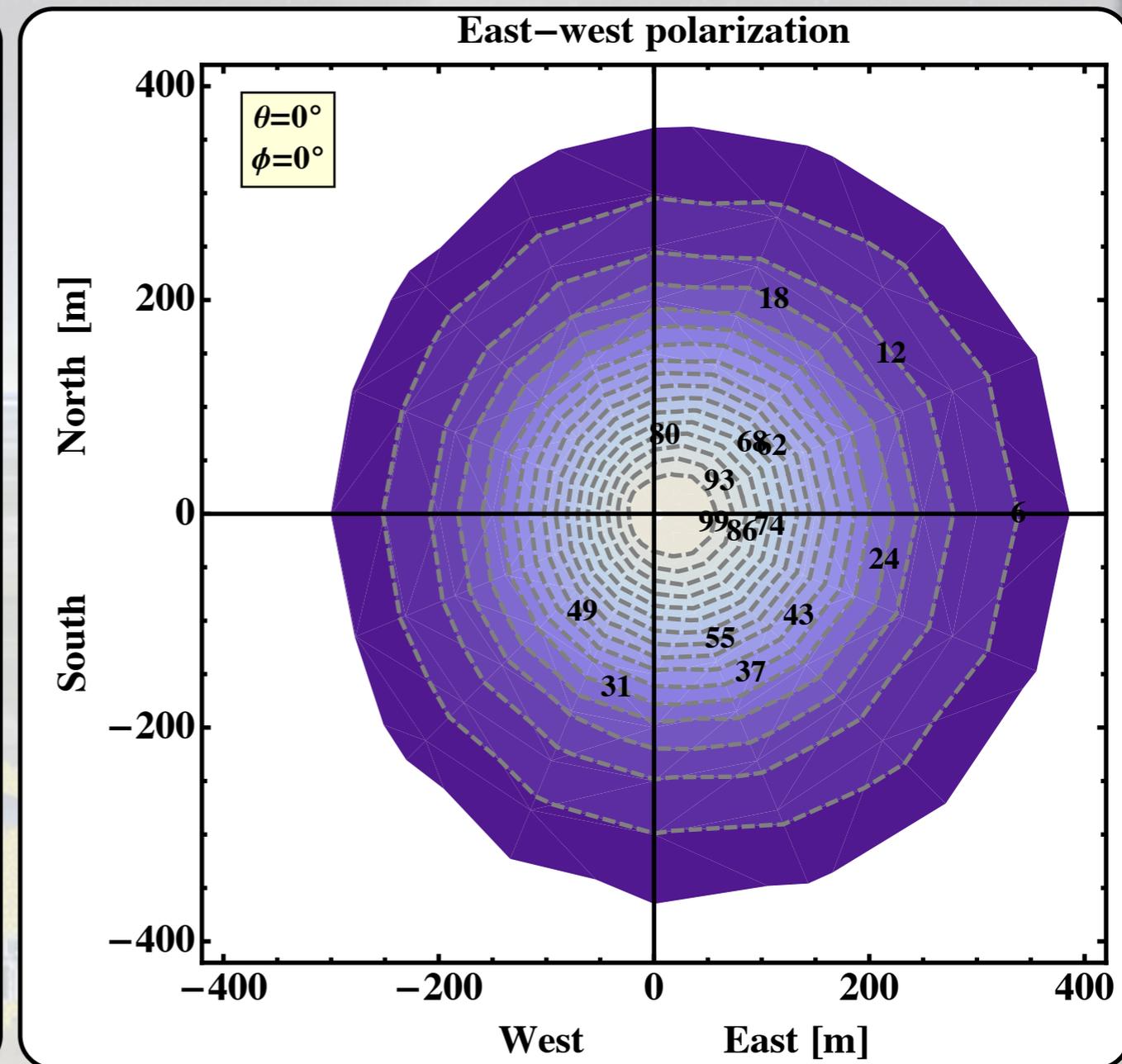
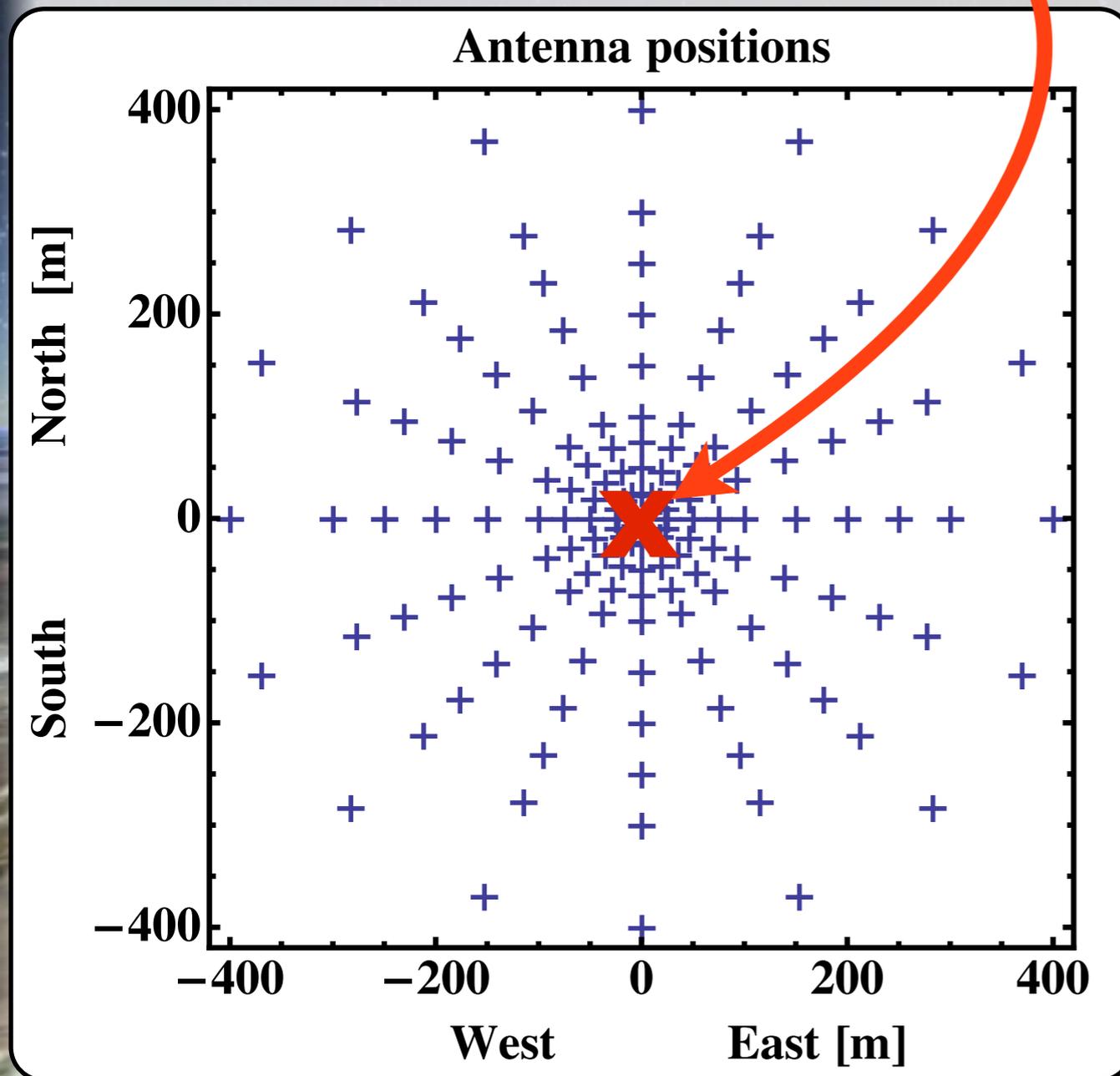
➔ **Utilisation**
de SELFAS



10^{17} eV, 145 AntennesPosition du coeur en (0,0)

Topologie du signal au sol

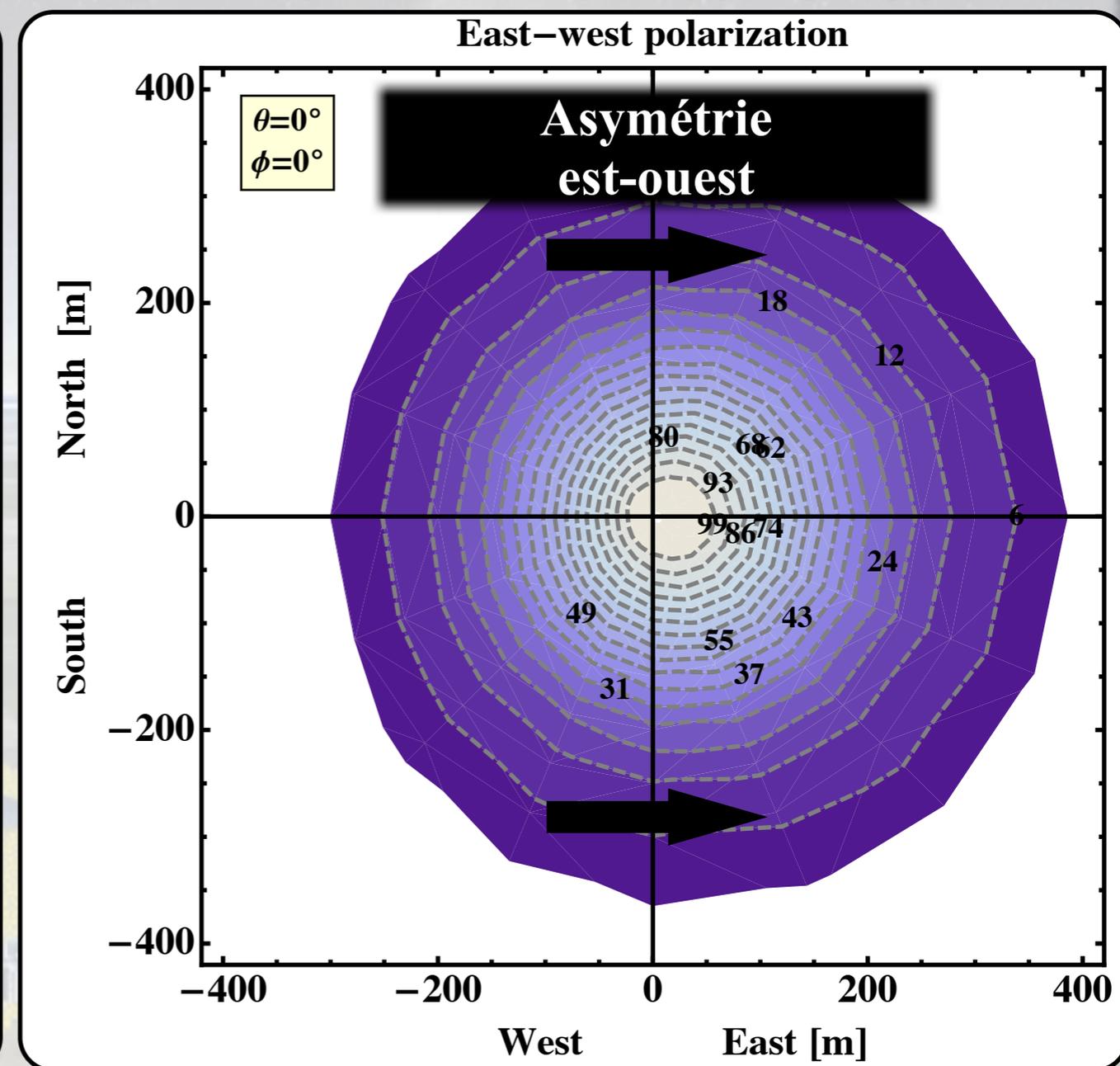
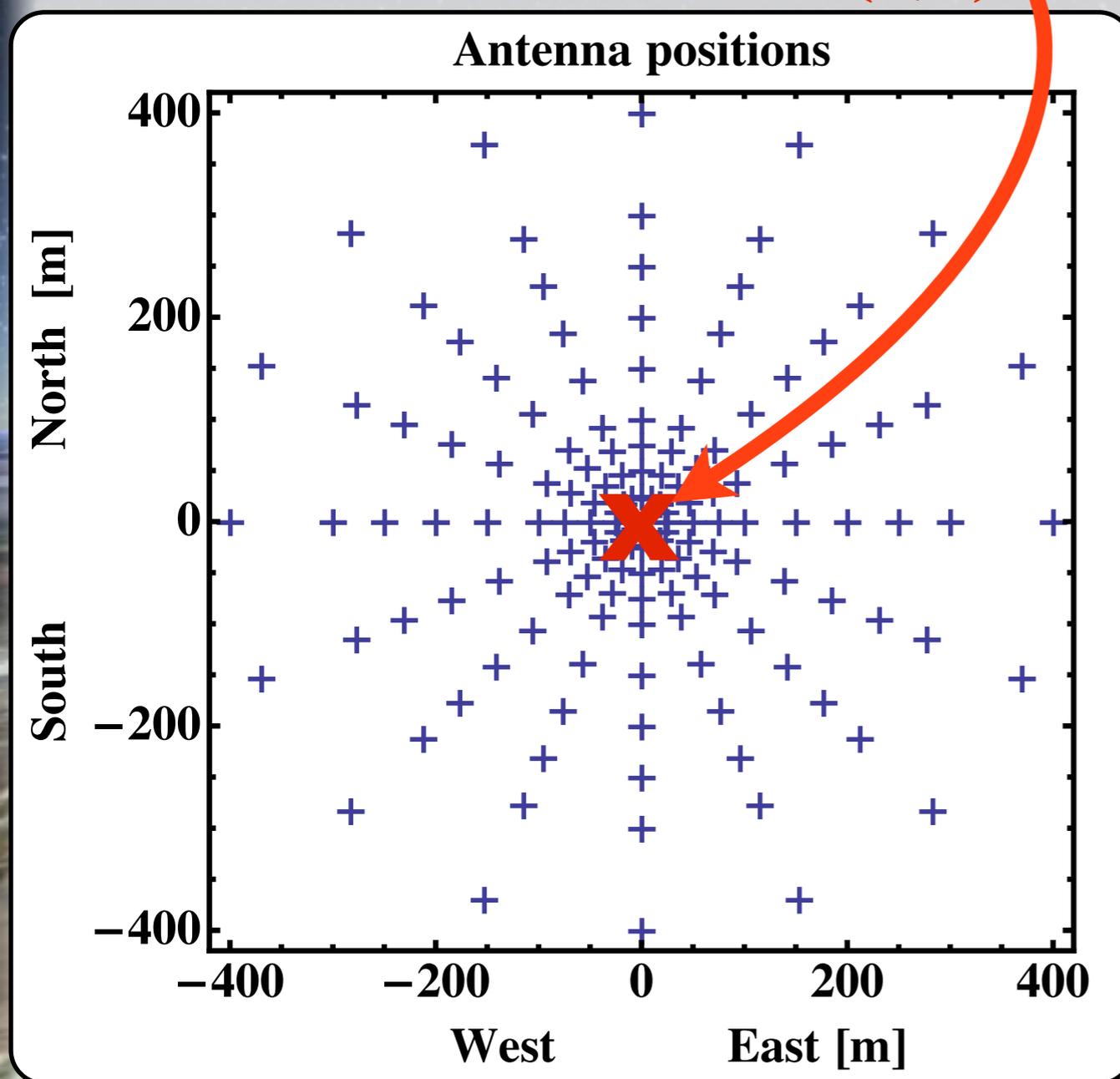
Polarisation est-ouest



10^{17} eV, 145 AntennesPosition du coeur en (0,0)

Topologie du signal au sol

Polarisation est-ouest



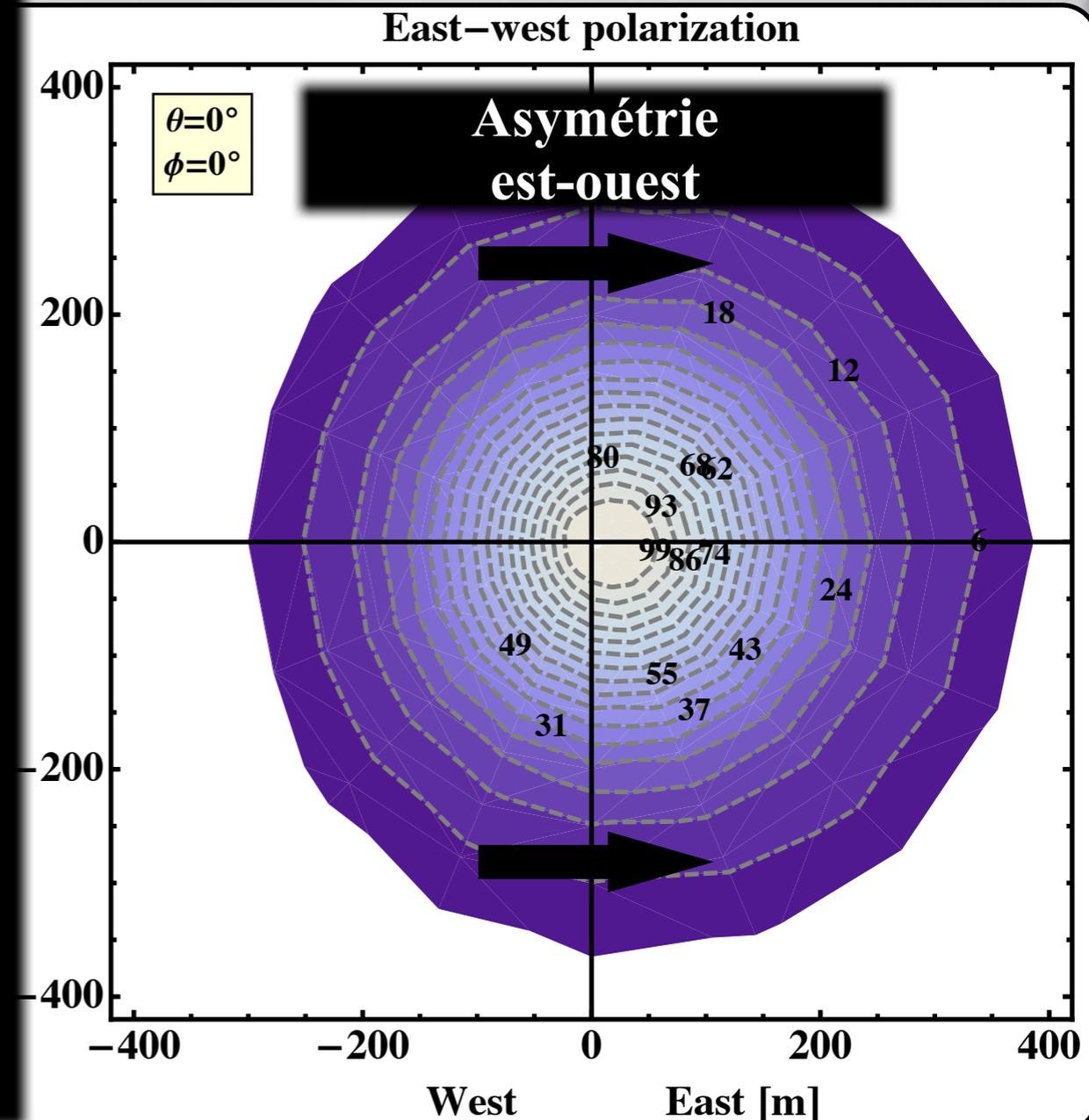
1017 - V - 145 - A - 1

**Asymétrie est-ouest du
signal radio :**

**conséquence de la
contribution excès de
charge**

Pourquoi?

**Topologie du signal au sol
Polarisation est-ouest**



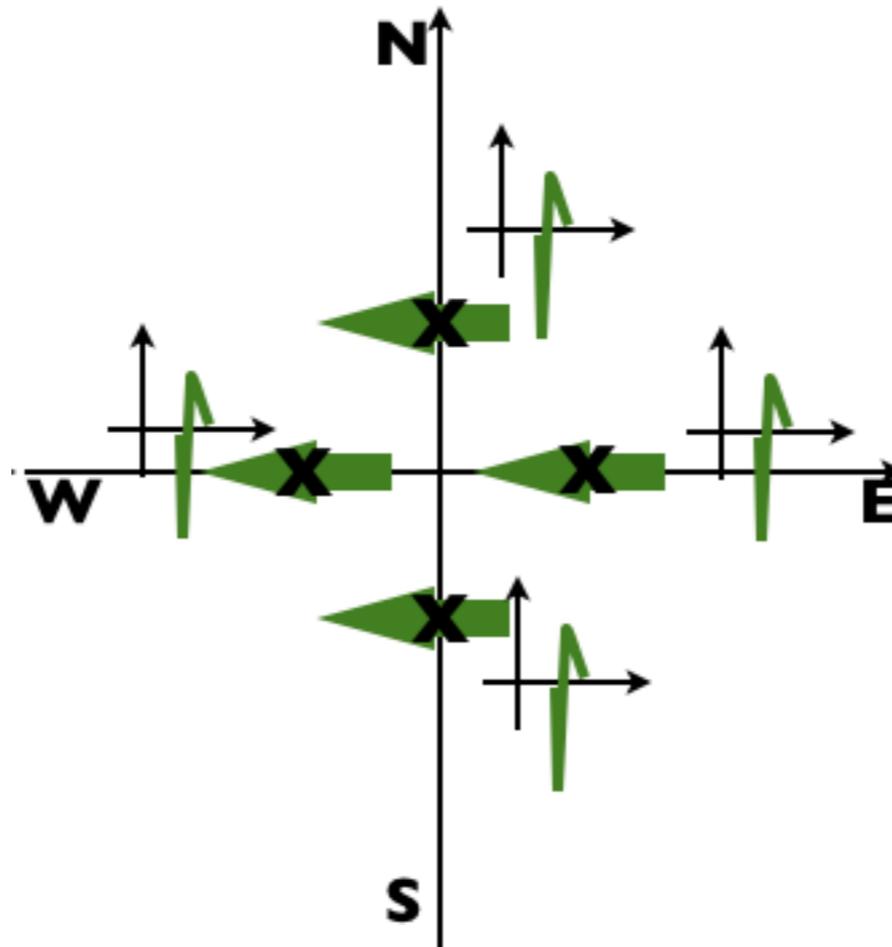
SE/FAS2

Asymétrie est-ouest
du signal radio :

Conséquence de la
contribution excès de charge

Orientation du champ selon le mécanisme

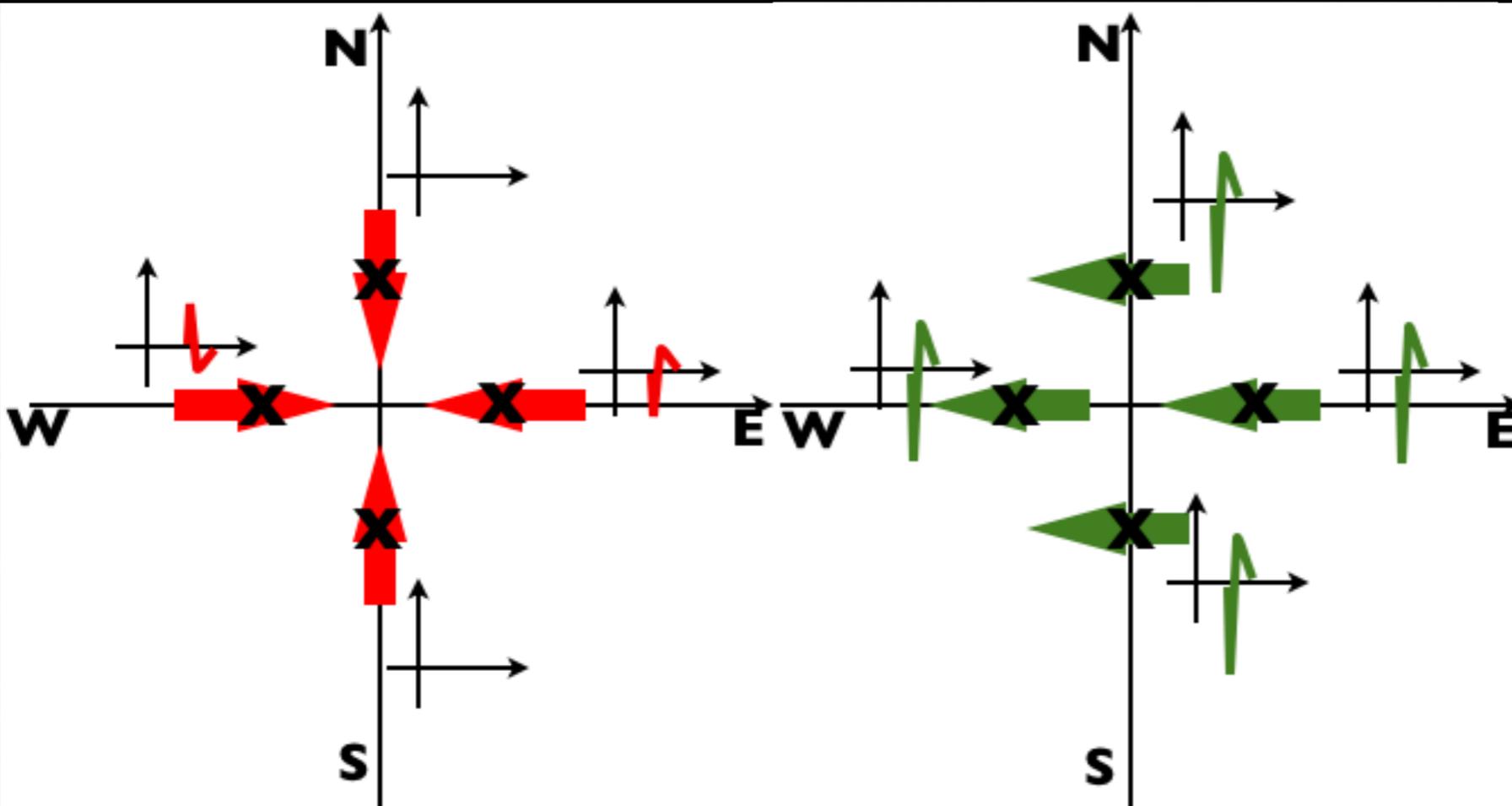
Courant transverse
orientation du champ



Orientation du champ selon le mécanisme

Excès de charge
orientation du champ

Courant transverse
orientation du champ

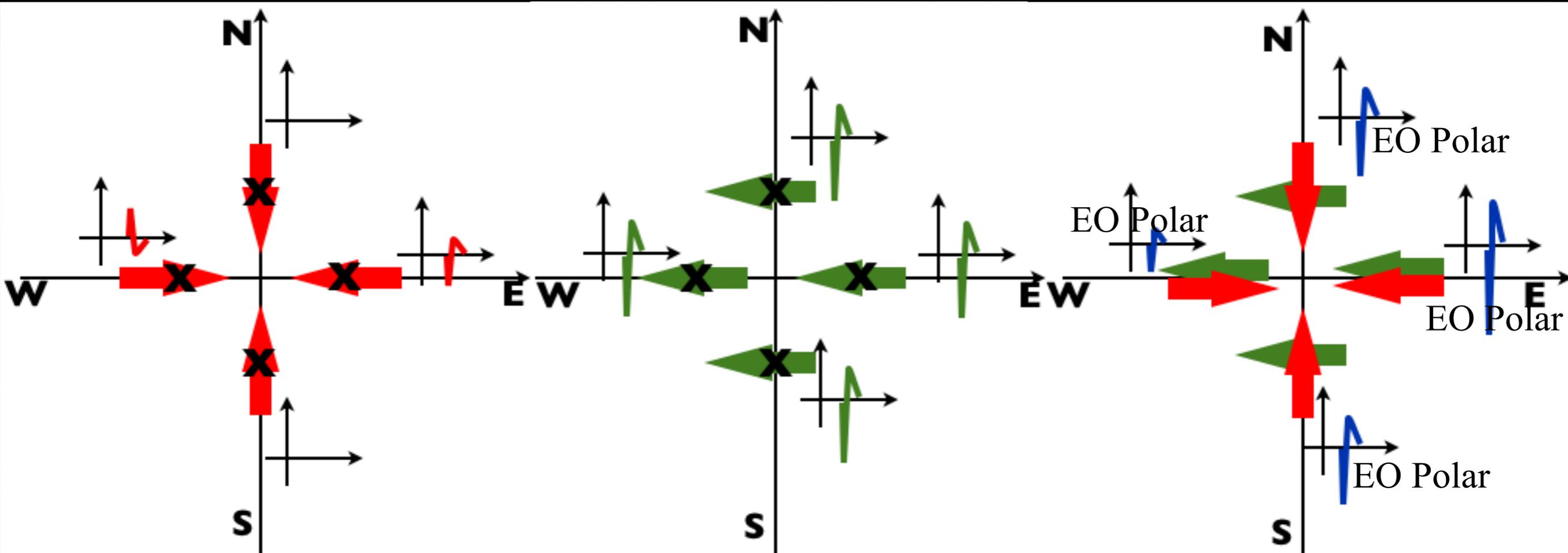


Orientation du champ selon le mécanisme

**Excès de charge
orientation du champ**

**Courant transverse
orientation du champ**

Total



Auger - Balloon Launching Station

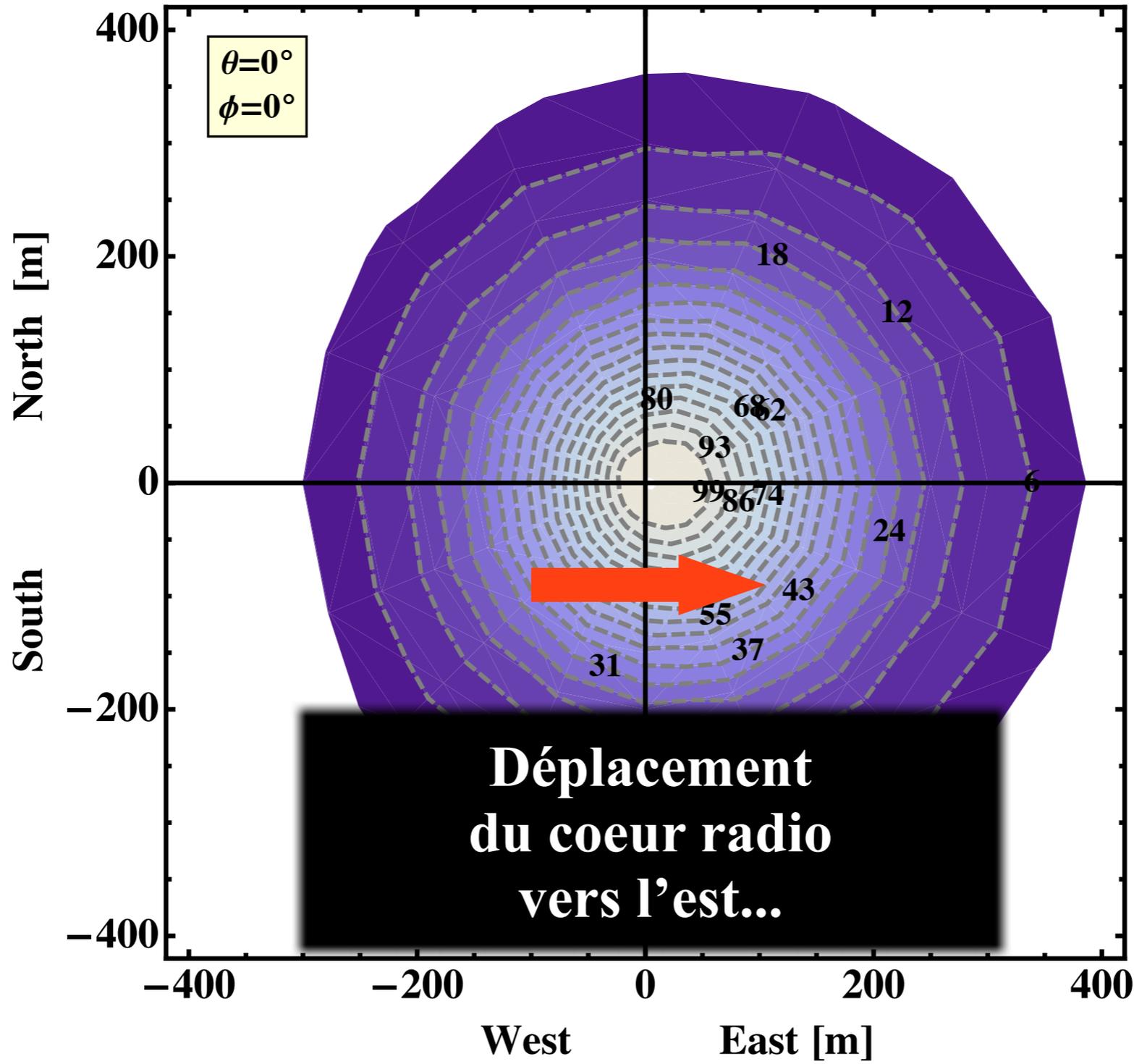
Auger - Central Laser Facility

Los Morados Lidar

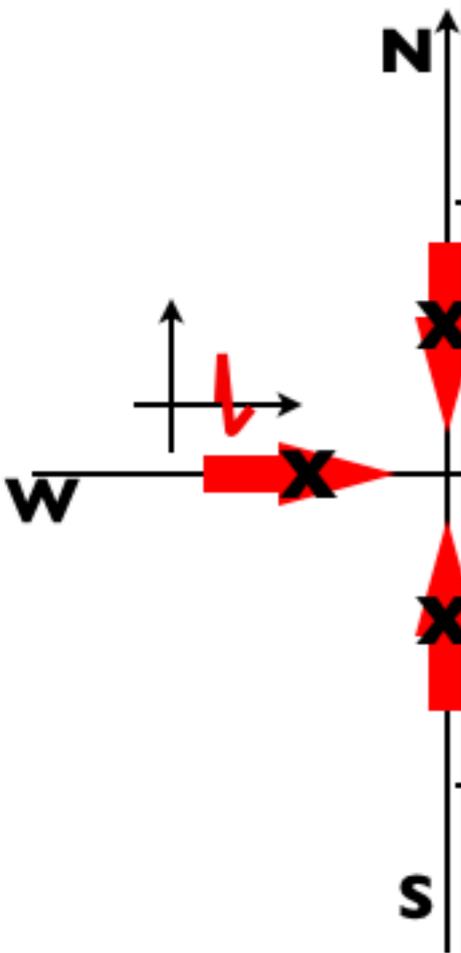
Pierre Auger Observatory - Malargue Campus

Orientation du champ selon le mécanisme

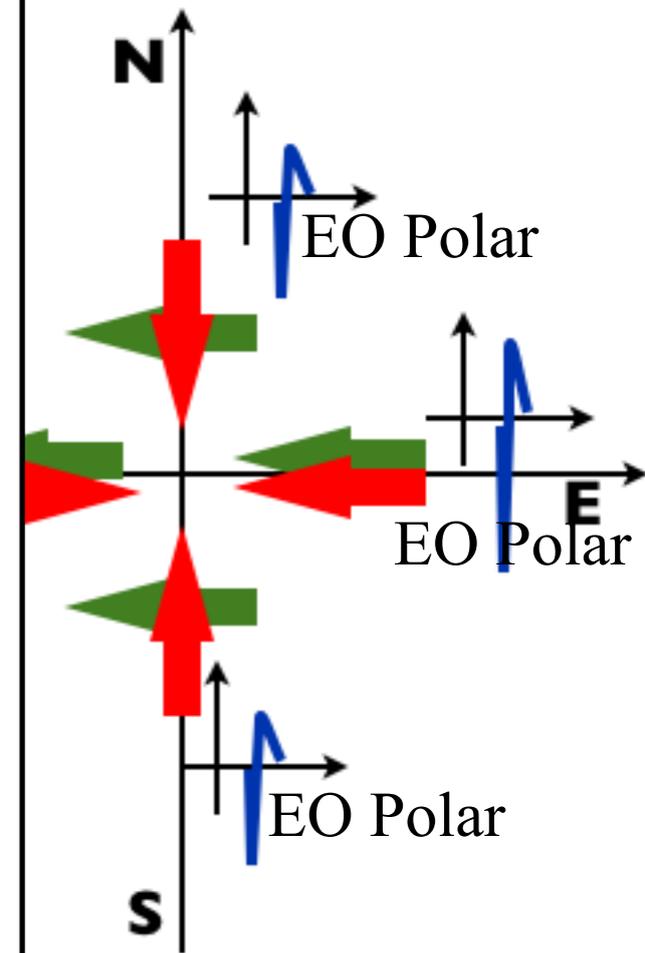
East-west polarization

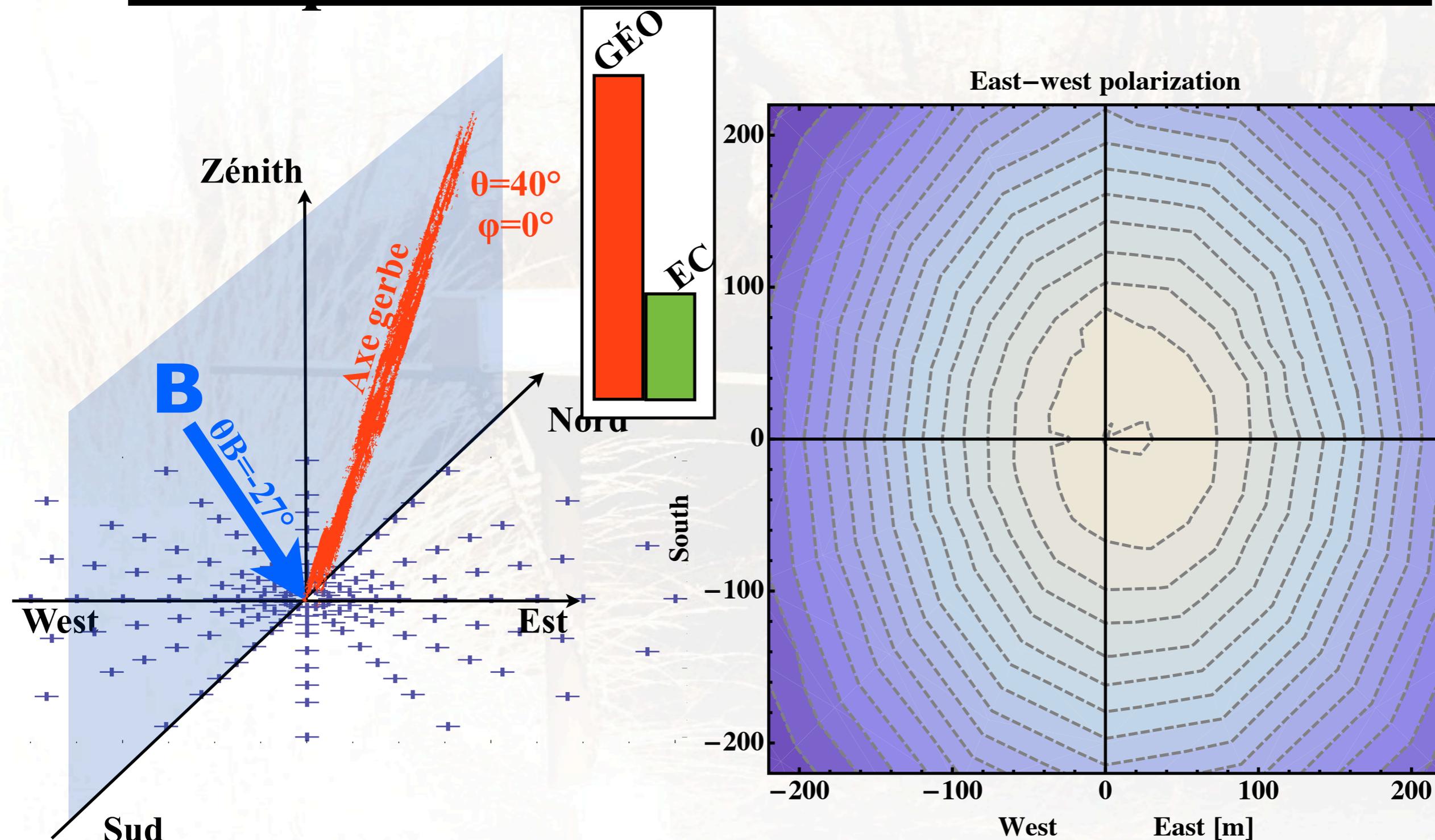


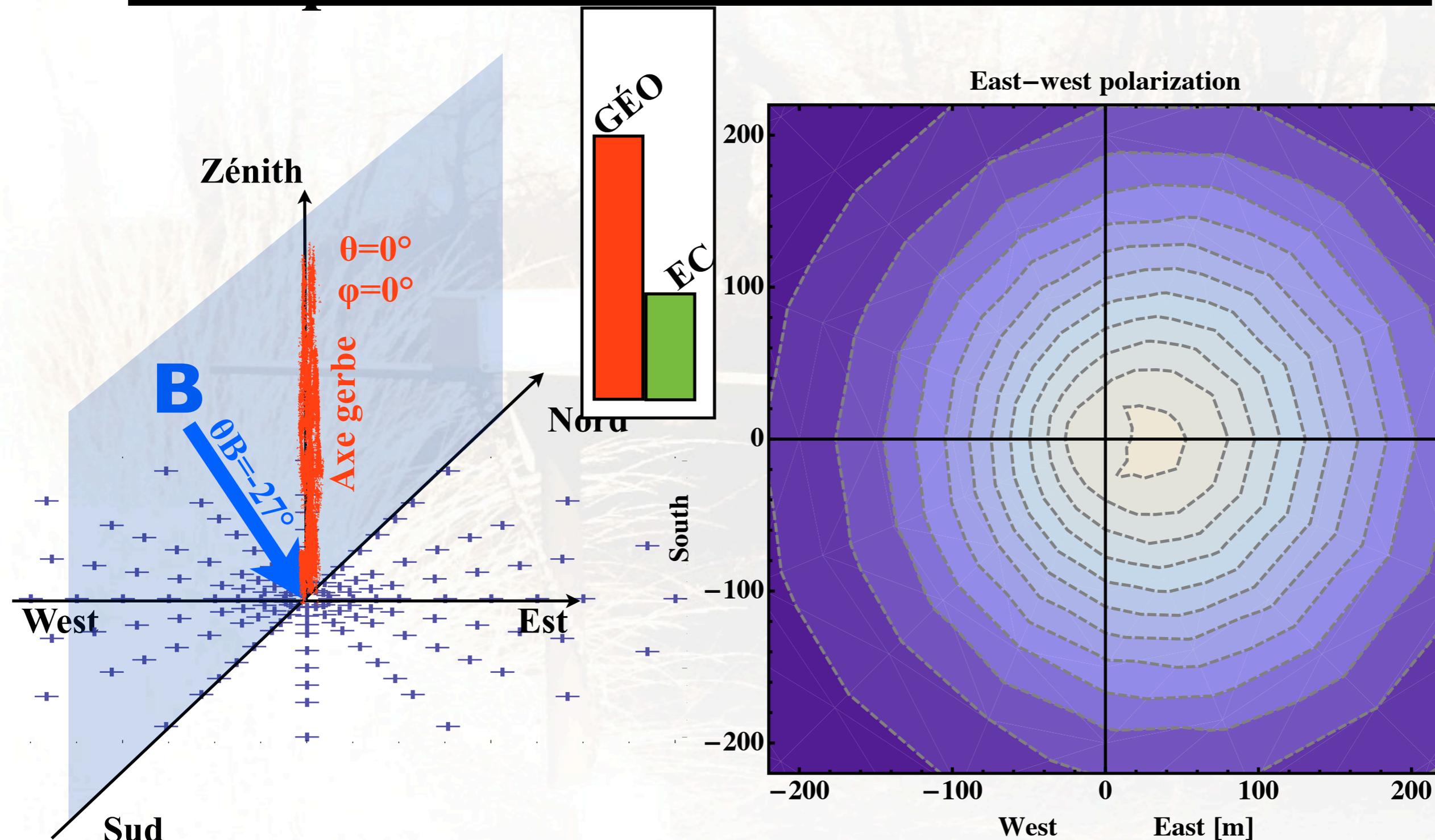
Excès de
orientation

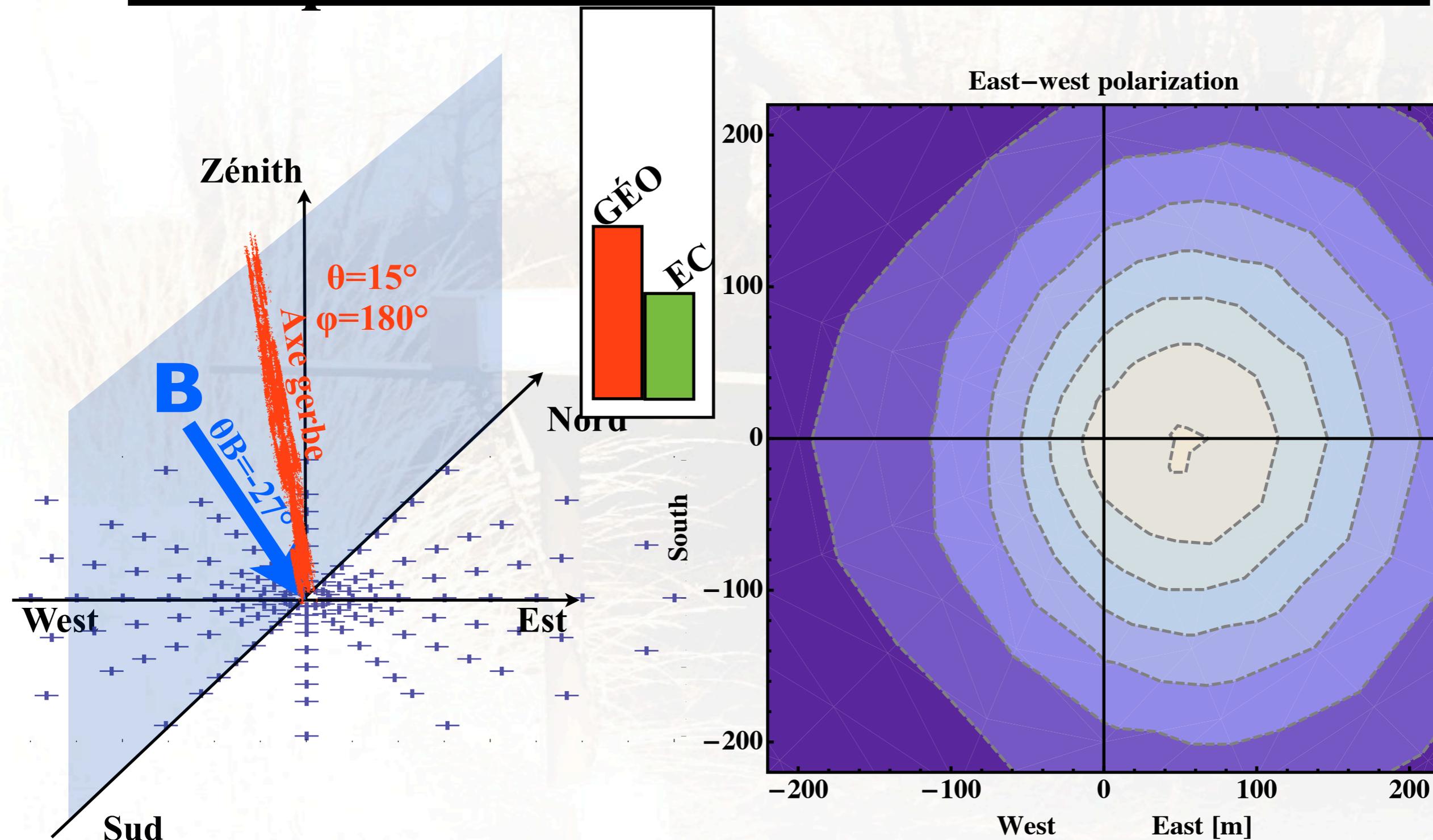


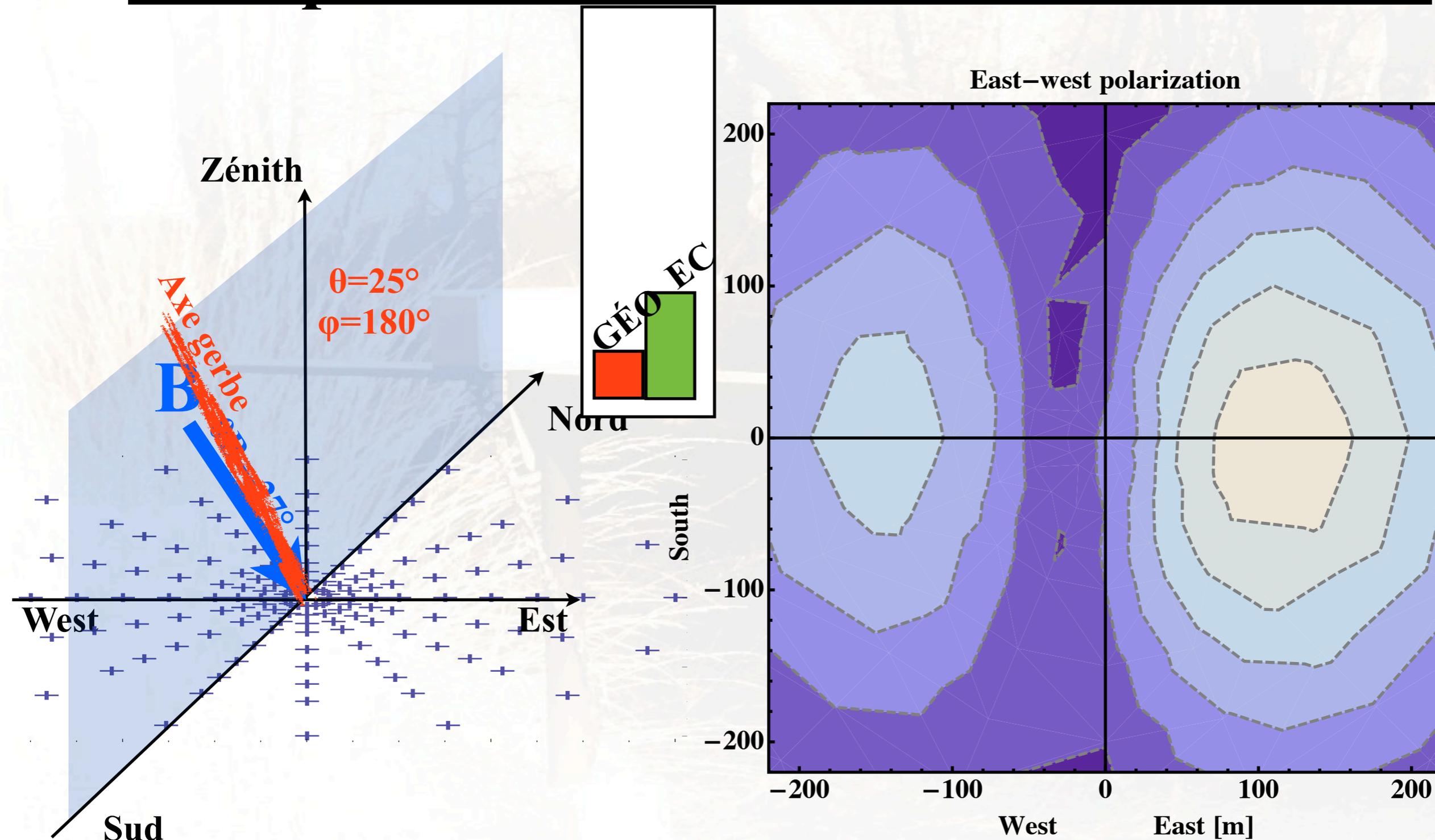
Total

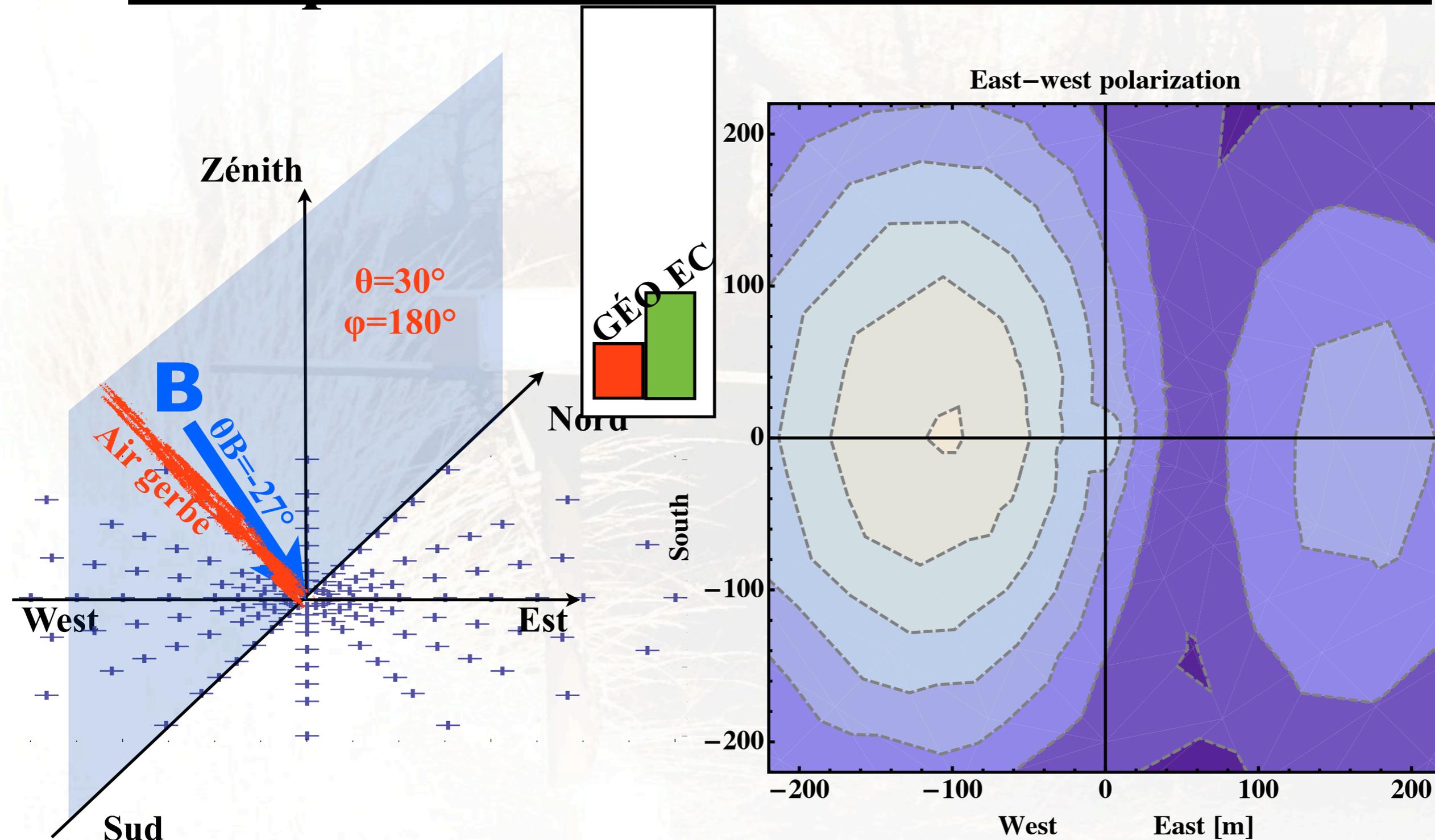


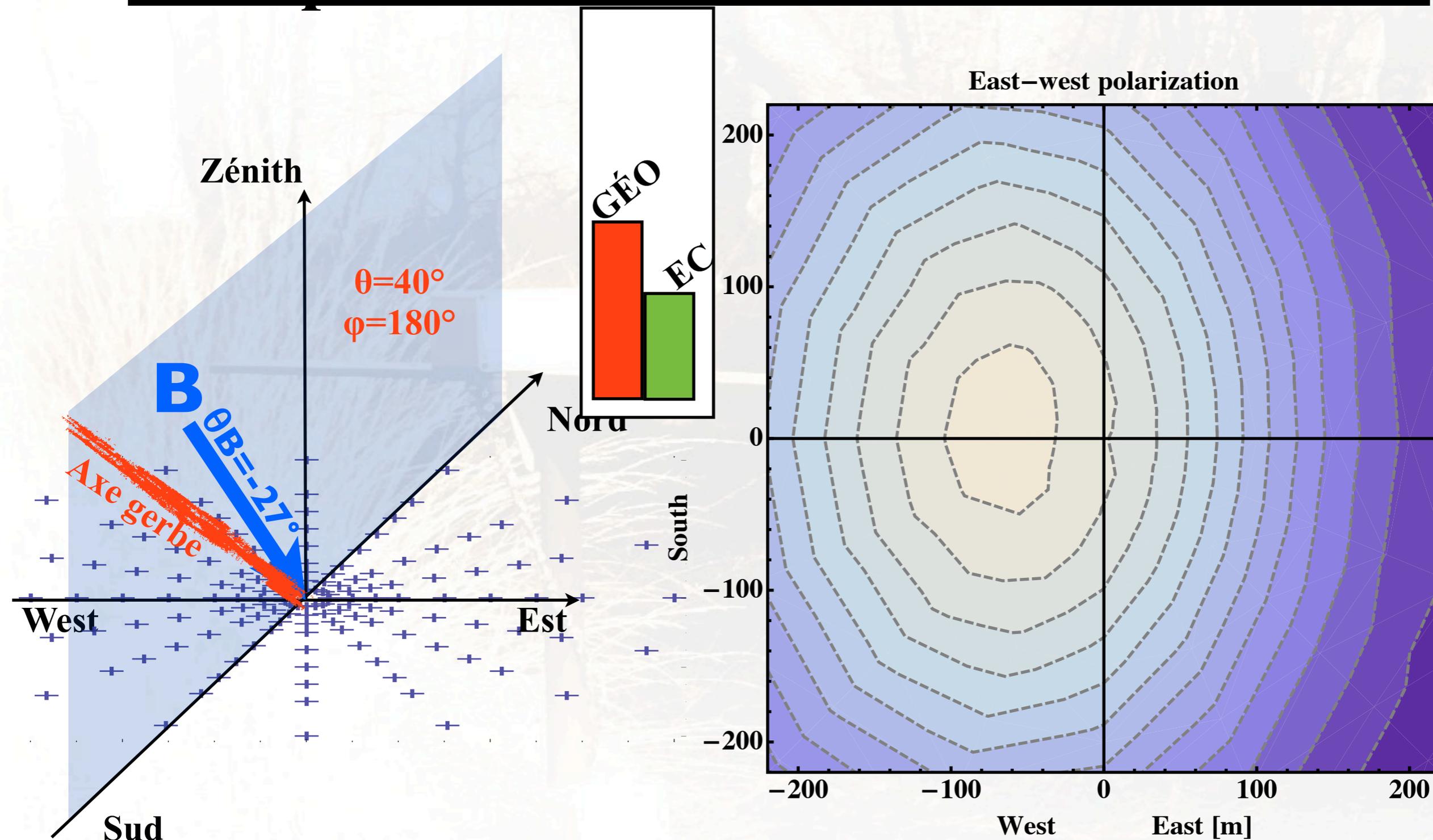
Effet pour différentes directions d'arrivée

Effet pour différentes directions d'arrivée

Effet pour différentes directions d'arrivée

Effet pour différentes directions d'arrivée

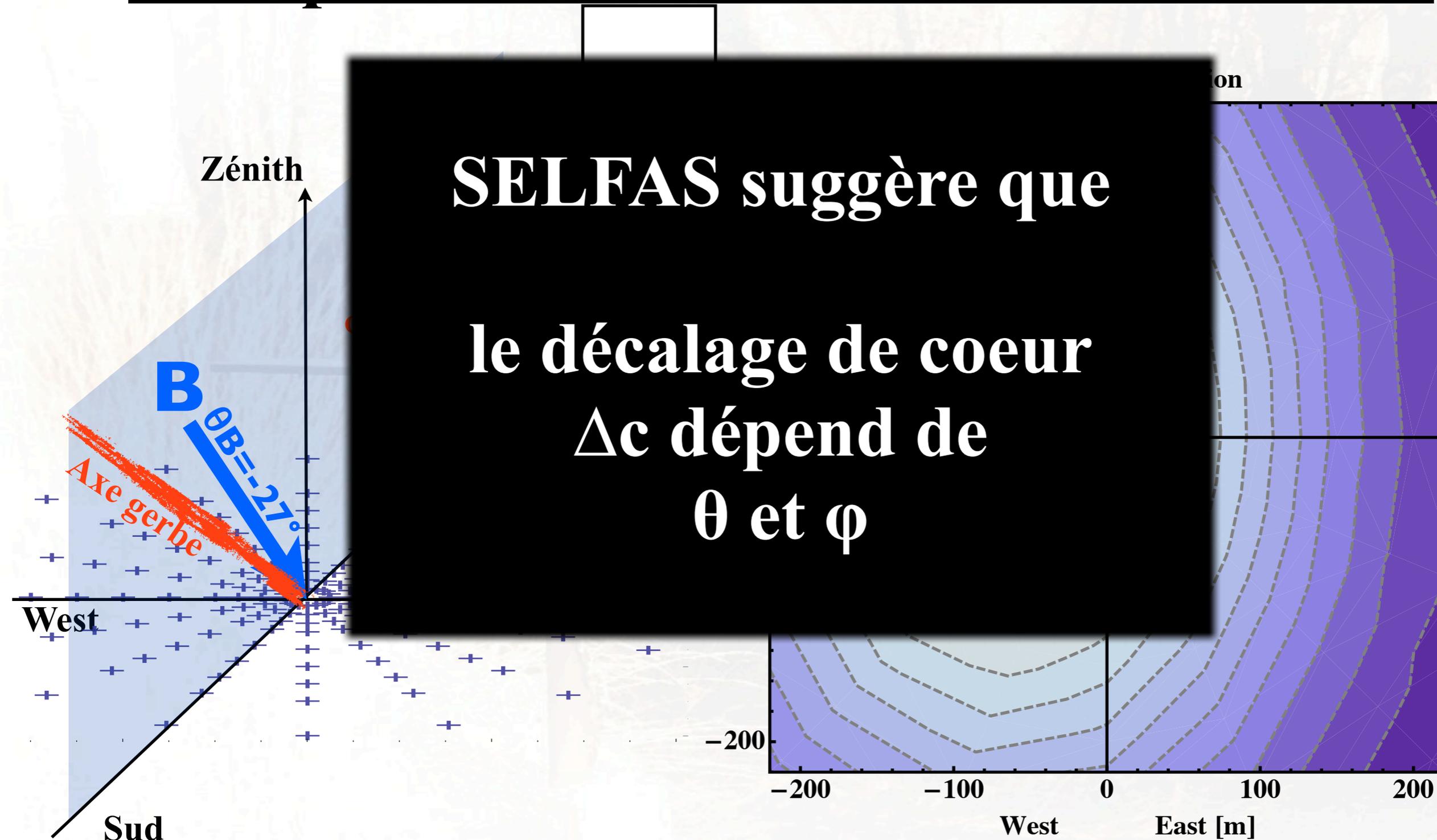
Effet pour différentes directions d'arrivée

Effet pour différentes directions d'arrivée

Effet pour différentes directions d'arrivée

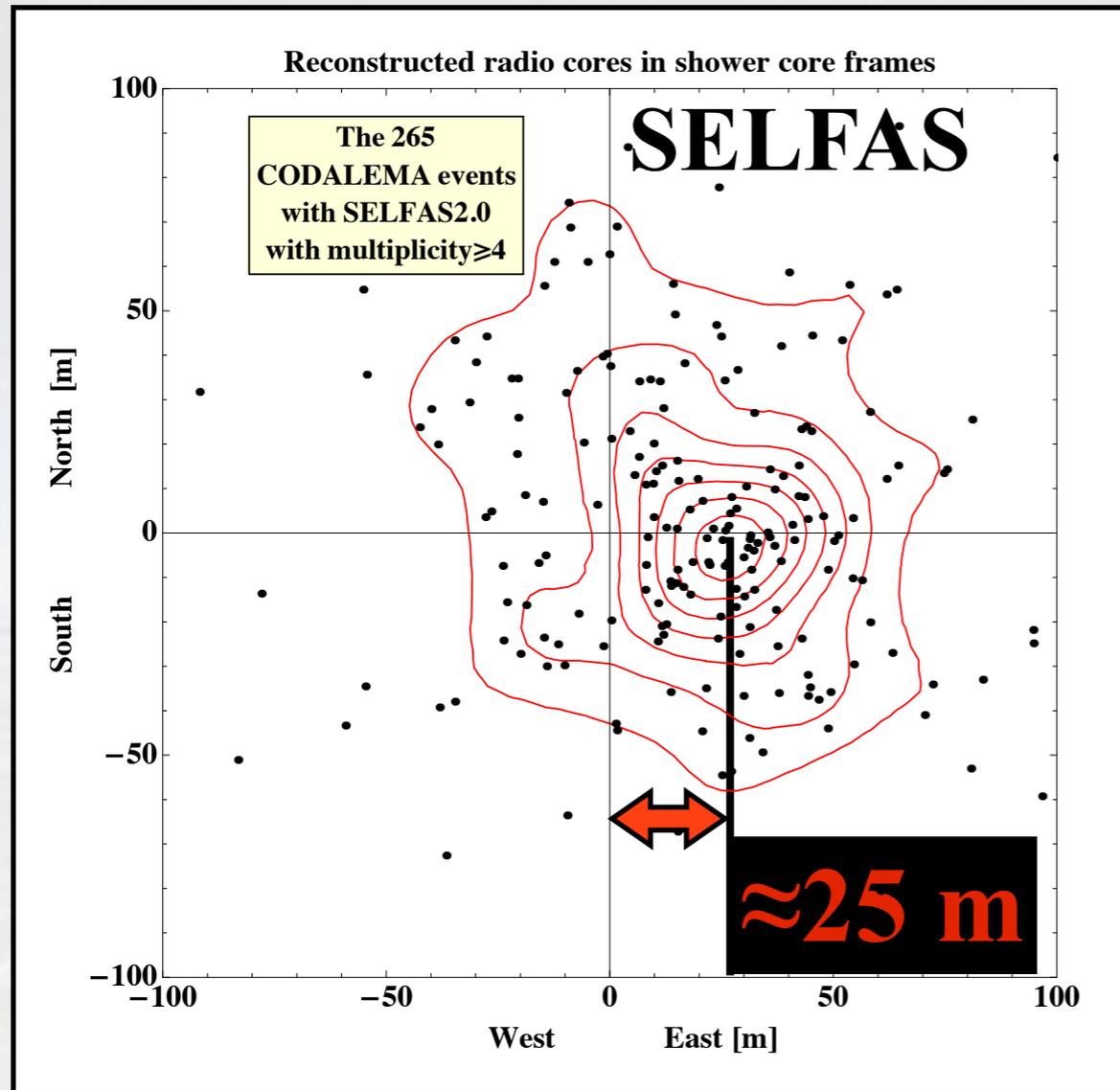
SELFAS suggère que

le décalage de coeur
 Δc dépend de
 θ et φ



SELFAS vs CODALEMA data

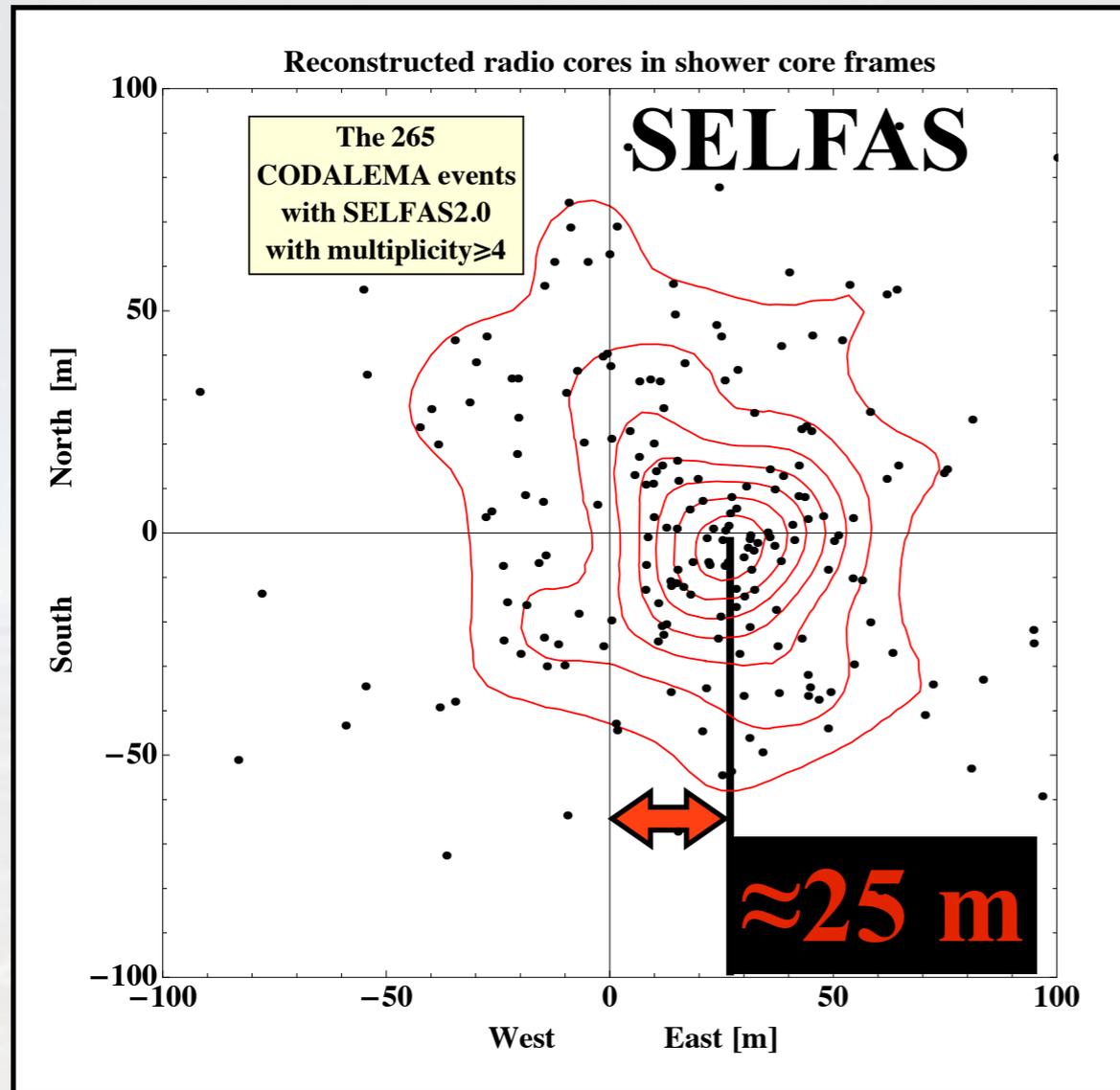
Pour chaque évènement reconstruit, le référentiel est centré sur le coeur particules simulé



Décalage moyen des coeurs radio vers l'est

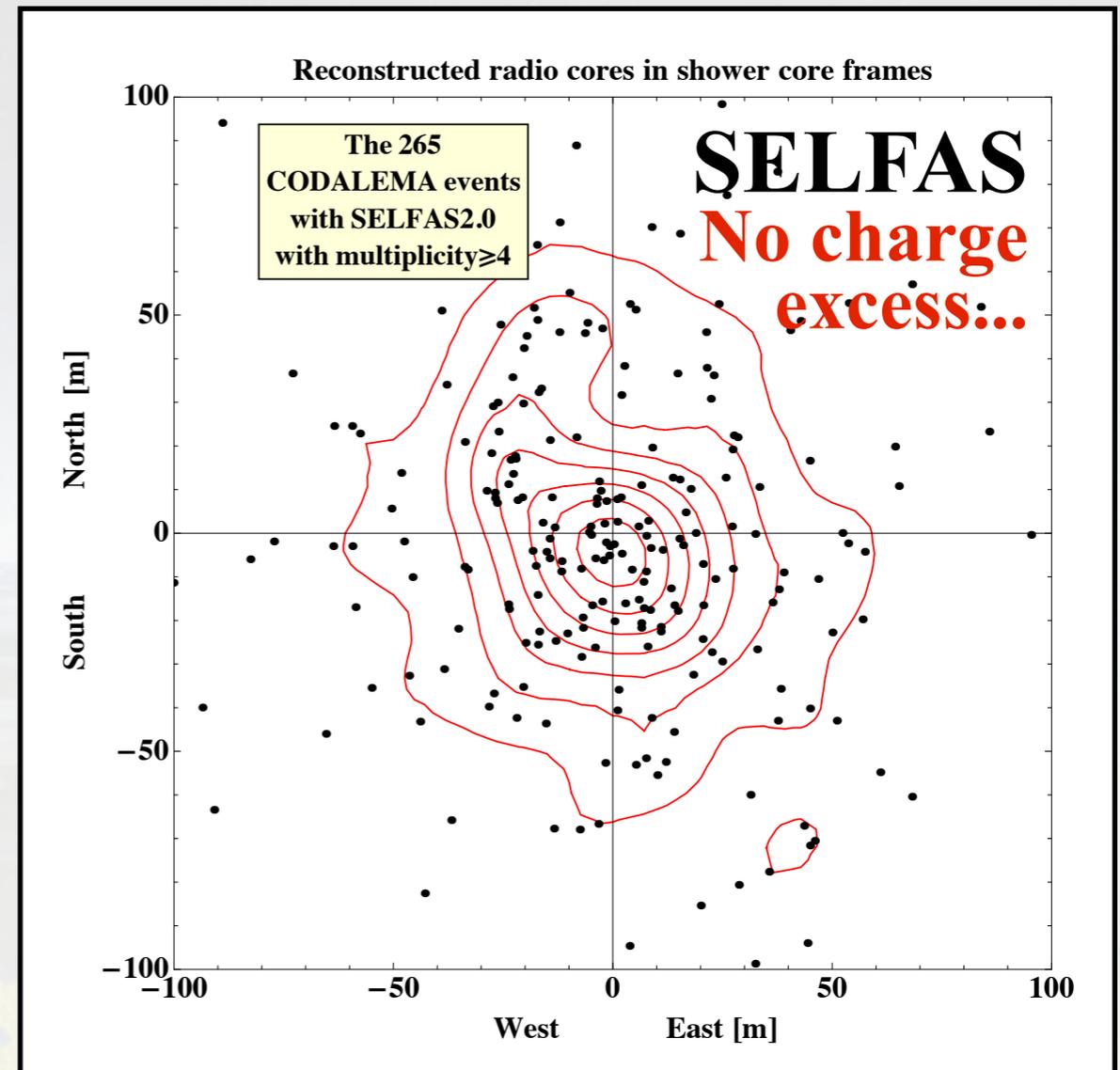
SELFAS vs CODALEMA data

Pour chaque évènement reconstruit, le référentiel est centré sur le coeur particules simulé



Décalage moyen des coeurs radio vers l'est

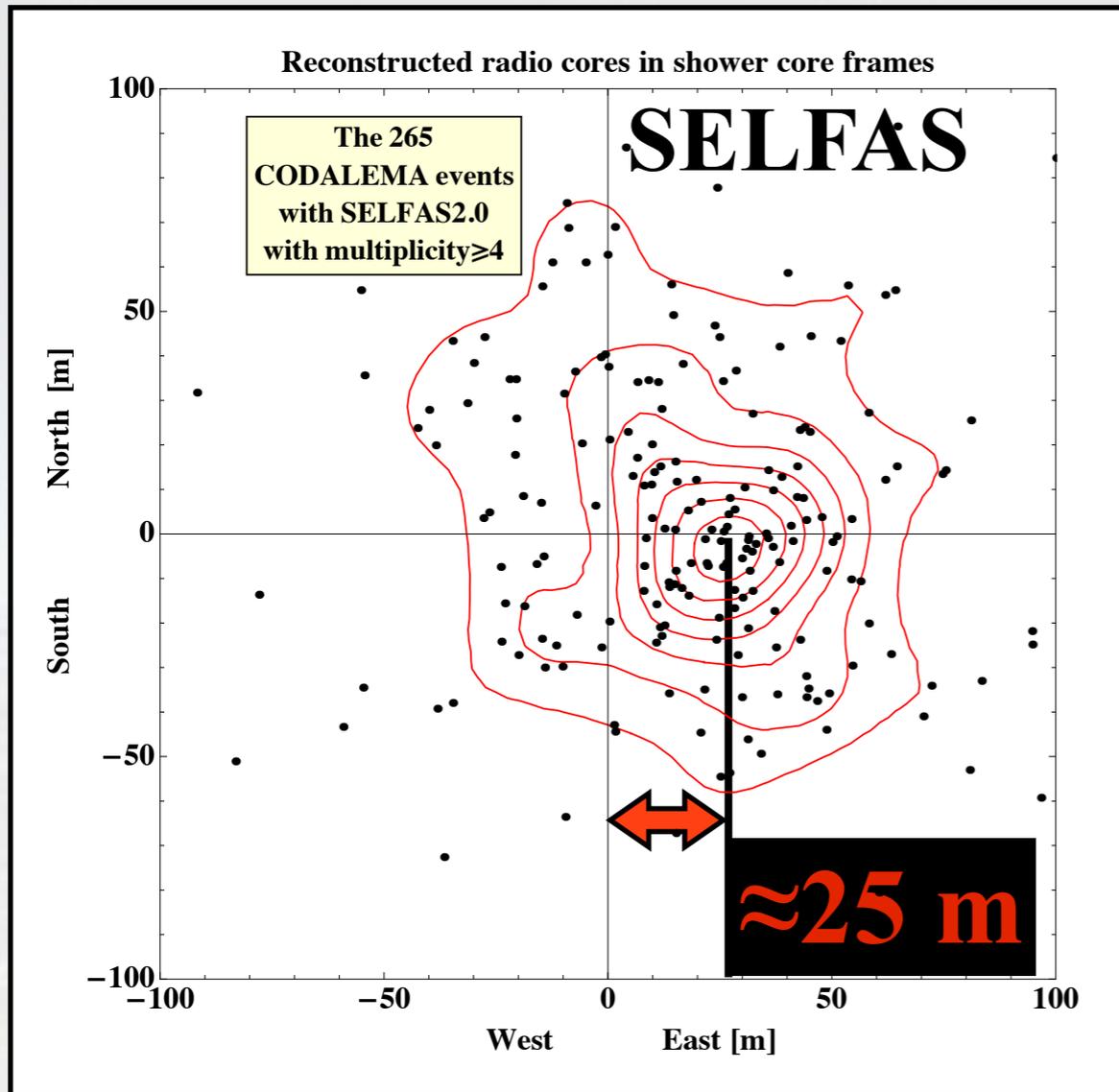
Pour chaque évènement reconstruit, le référentiel est centré sur le coeur particules simulé



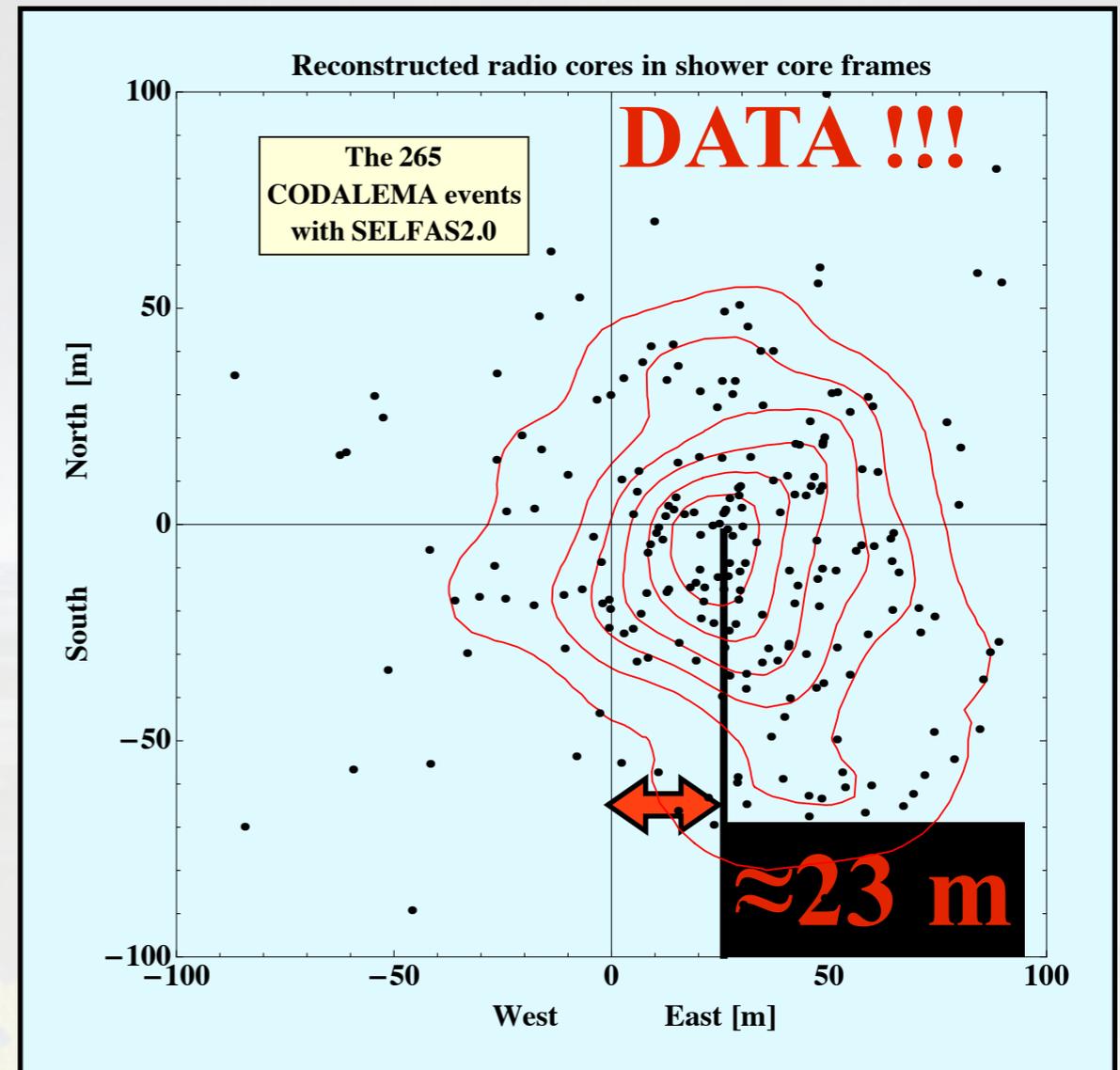
Aucun décalage moyen des coeurs radio vers l'est

SELFAS vs CODALEMA data

Pour chaque évènement reconstruit, le référentiel est centré sur le coeur particules simulé



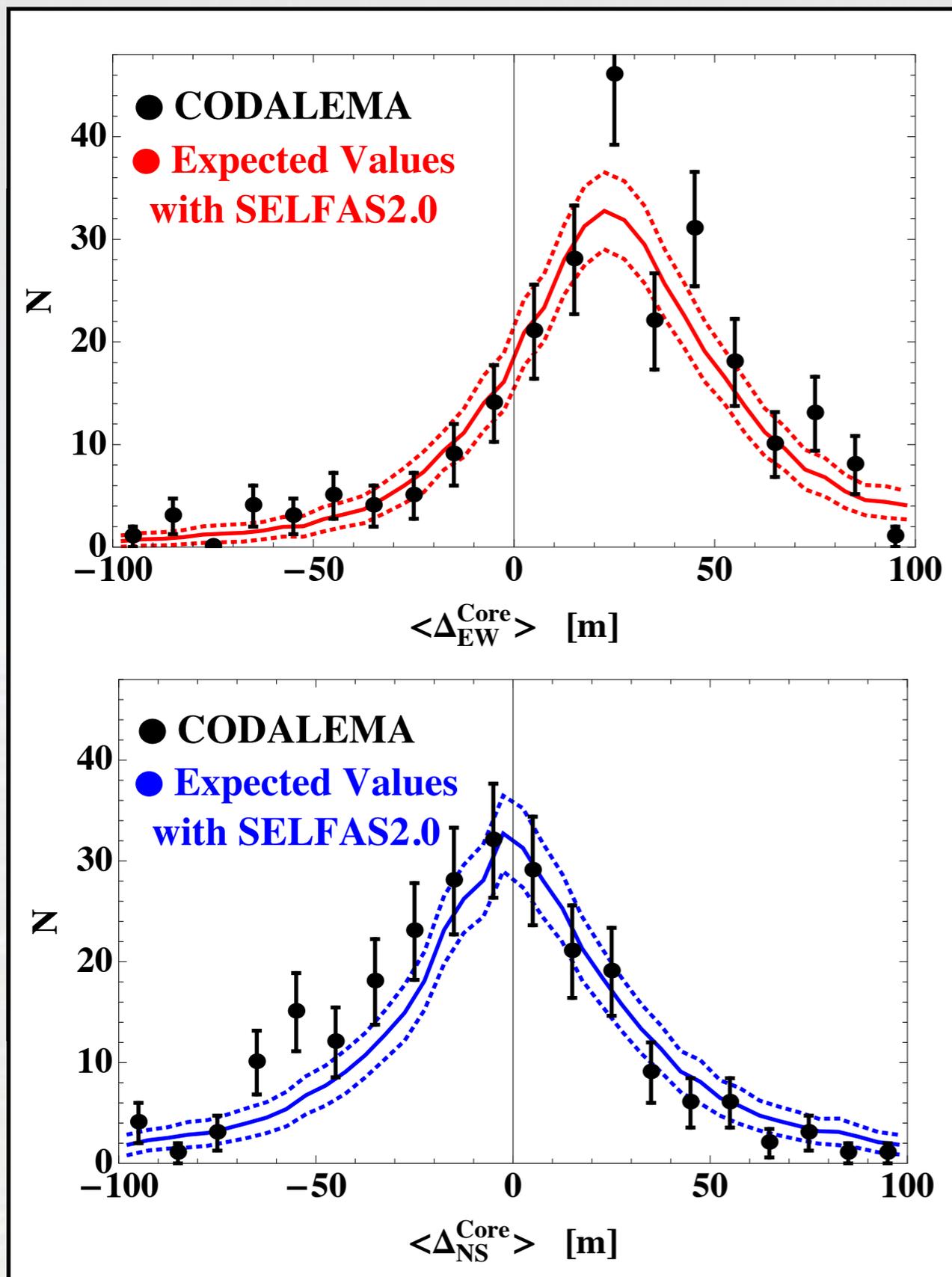
Pour chaque évènement reconstruit, le référentiel est centré sur le coeur particules simulé



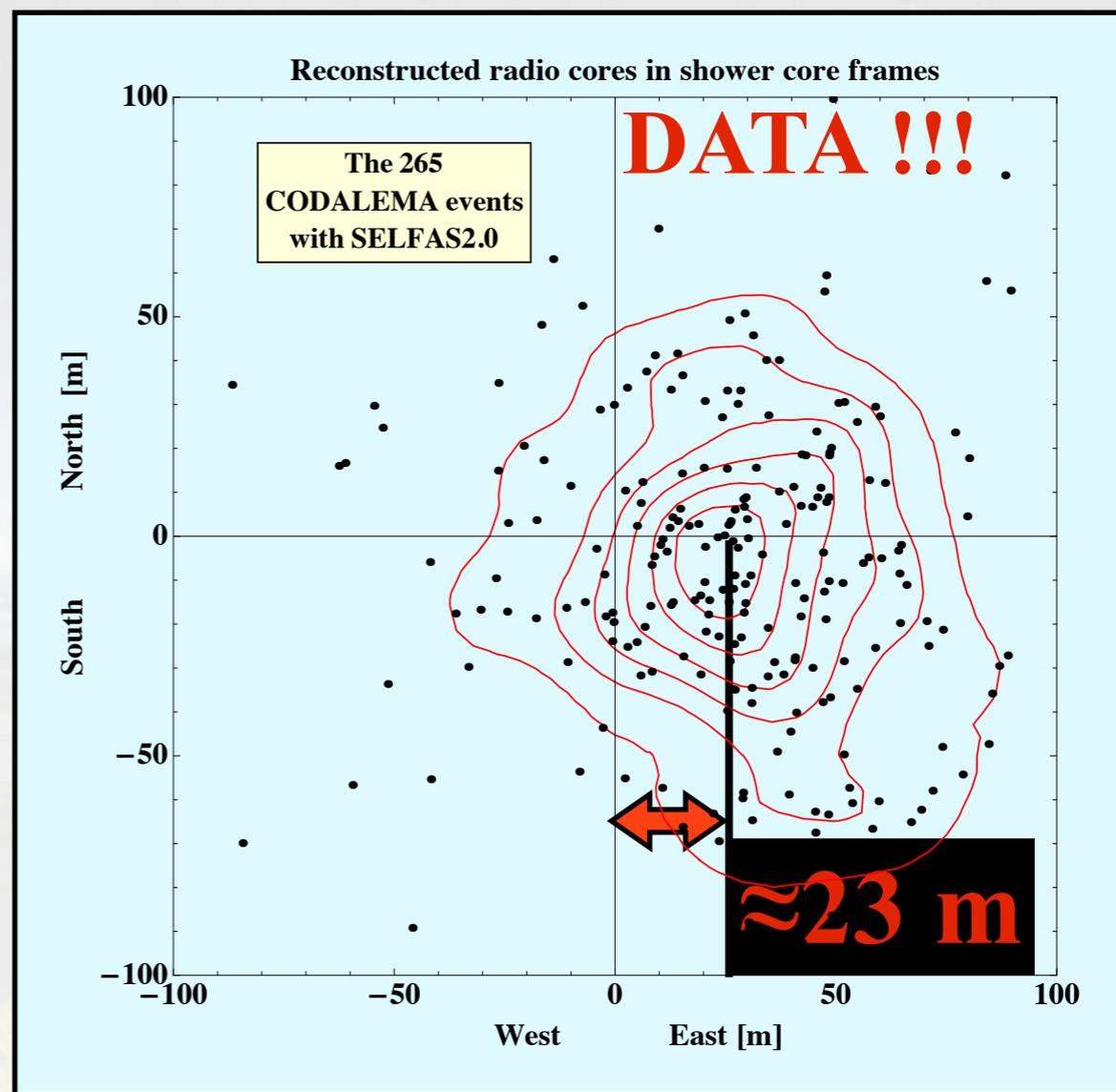
Décalage moyen des coeurs radio vers l'est

Confirmation expérimentale!!

SELFAS vs CODALEMA data

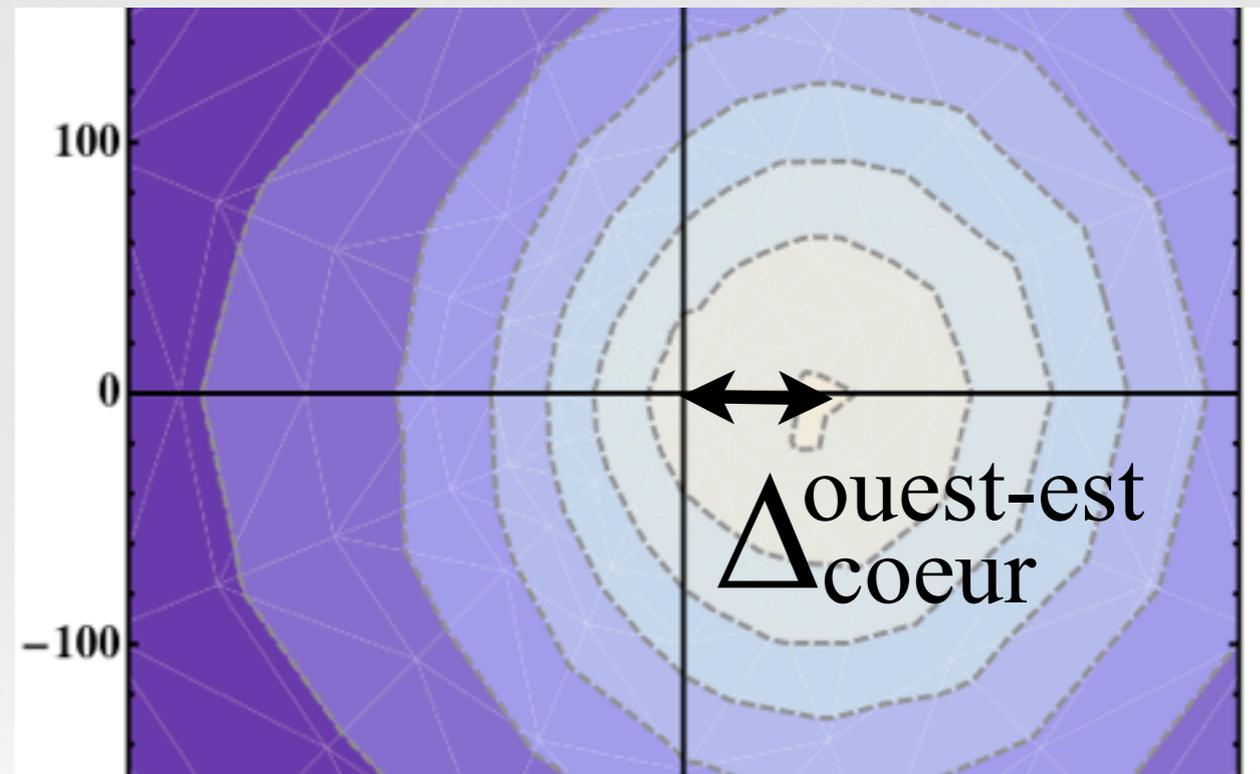
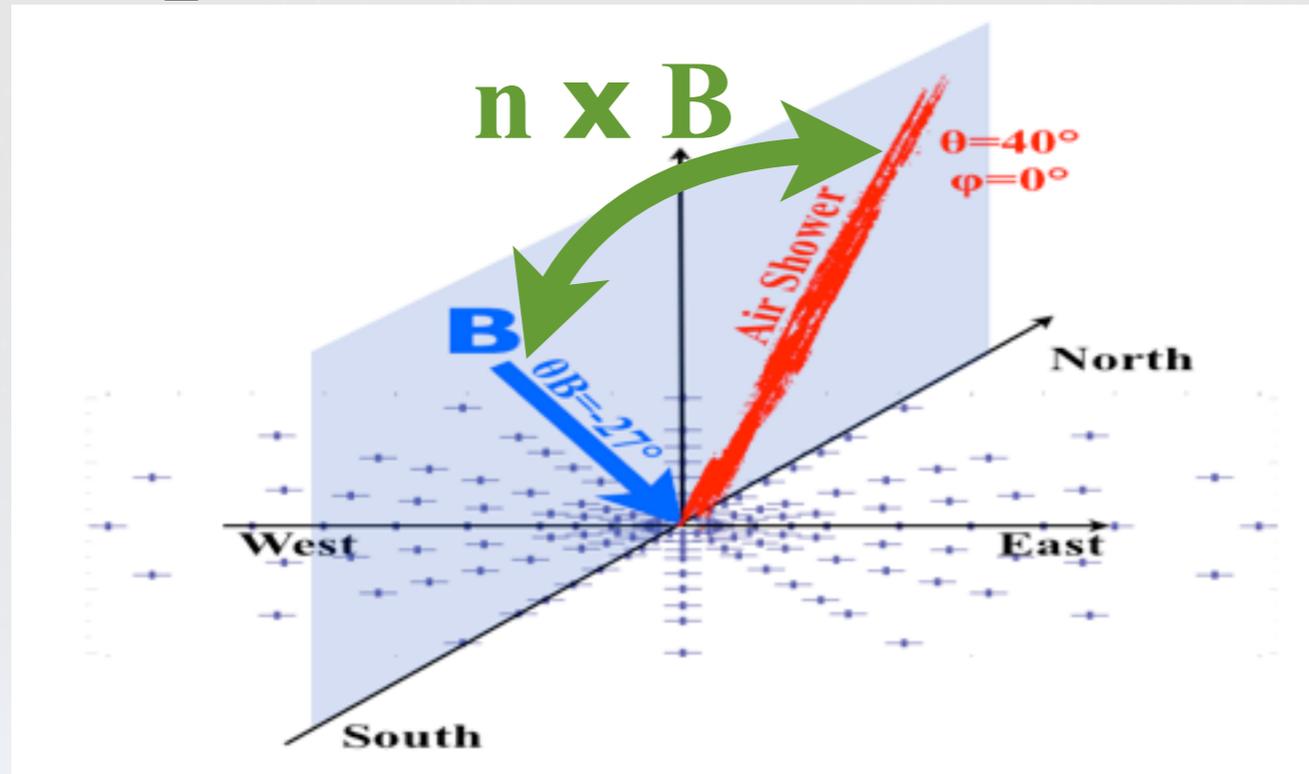


Pour chaque évènement reconstruit, le référentiel est centré sur le coeur particules simulé

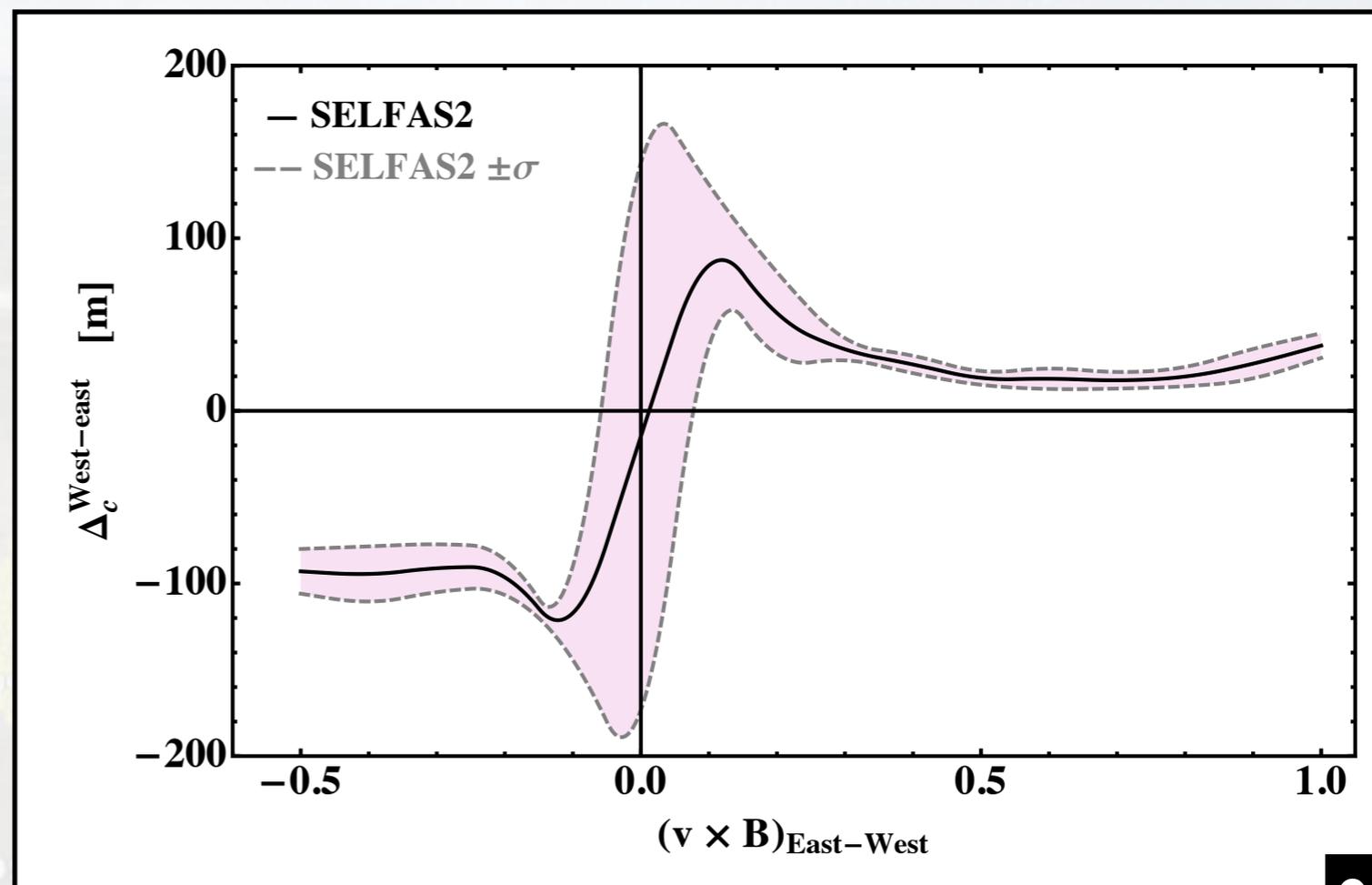


Confirmation expérimentale!!

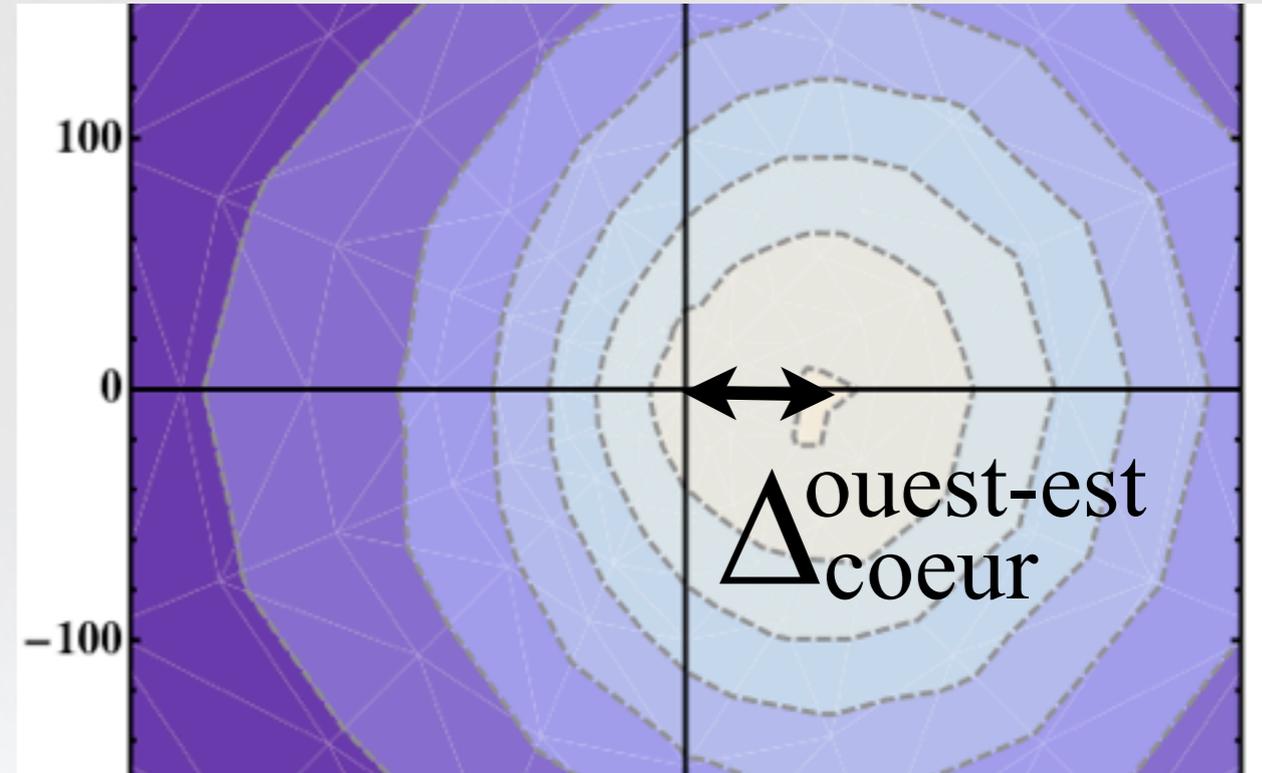
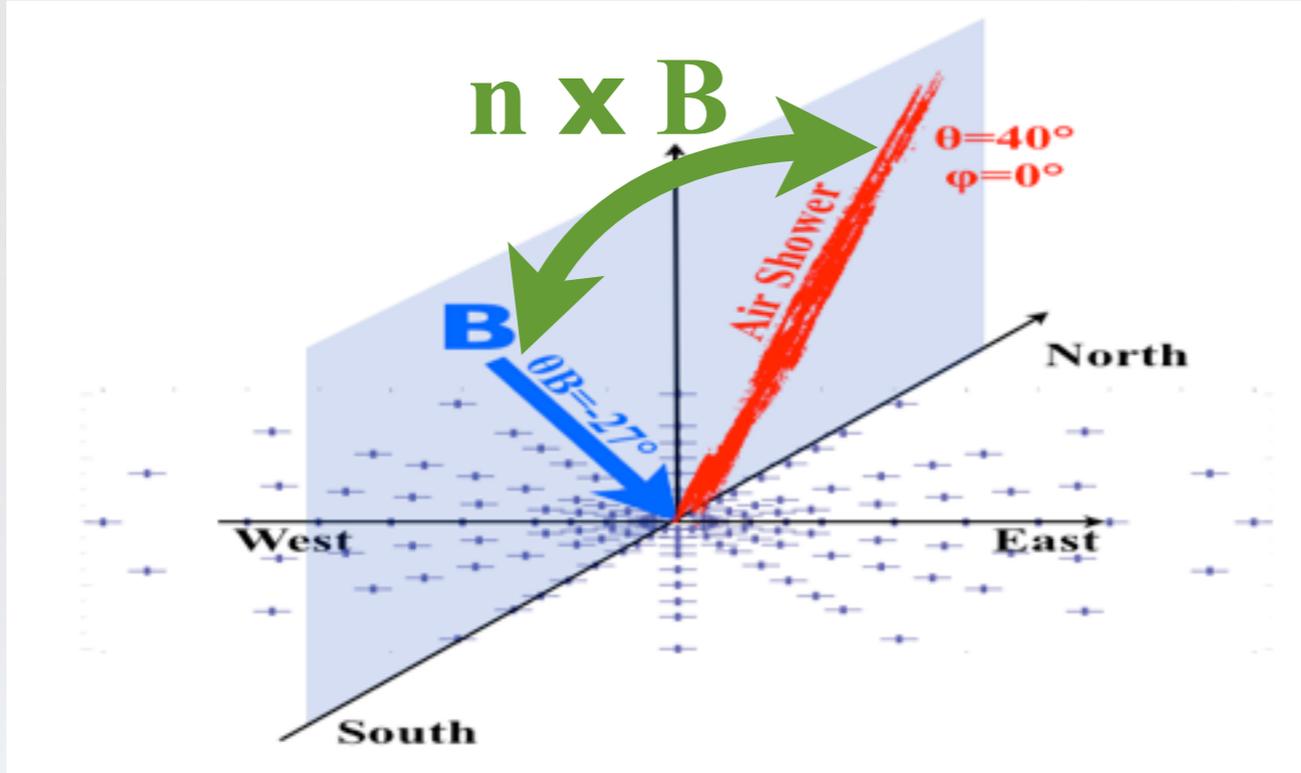
Dépendance à la direction d'arrivée



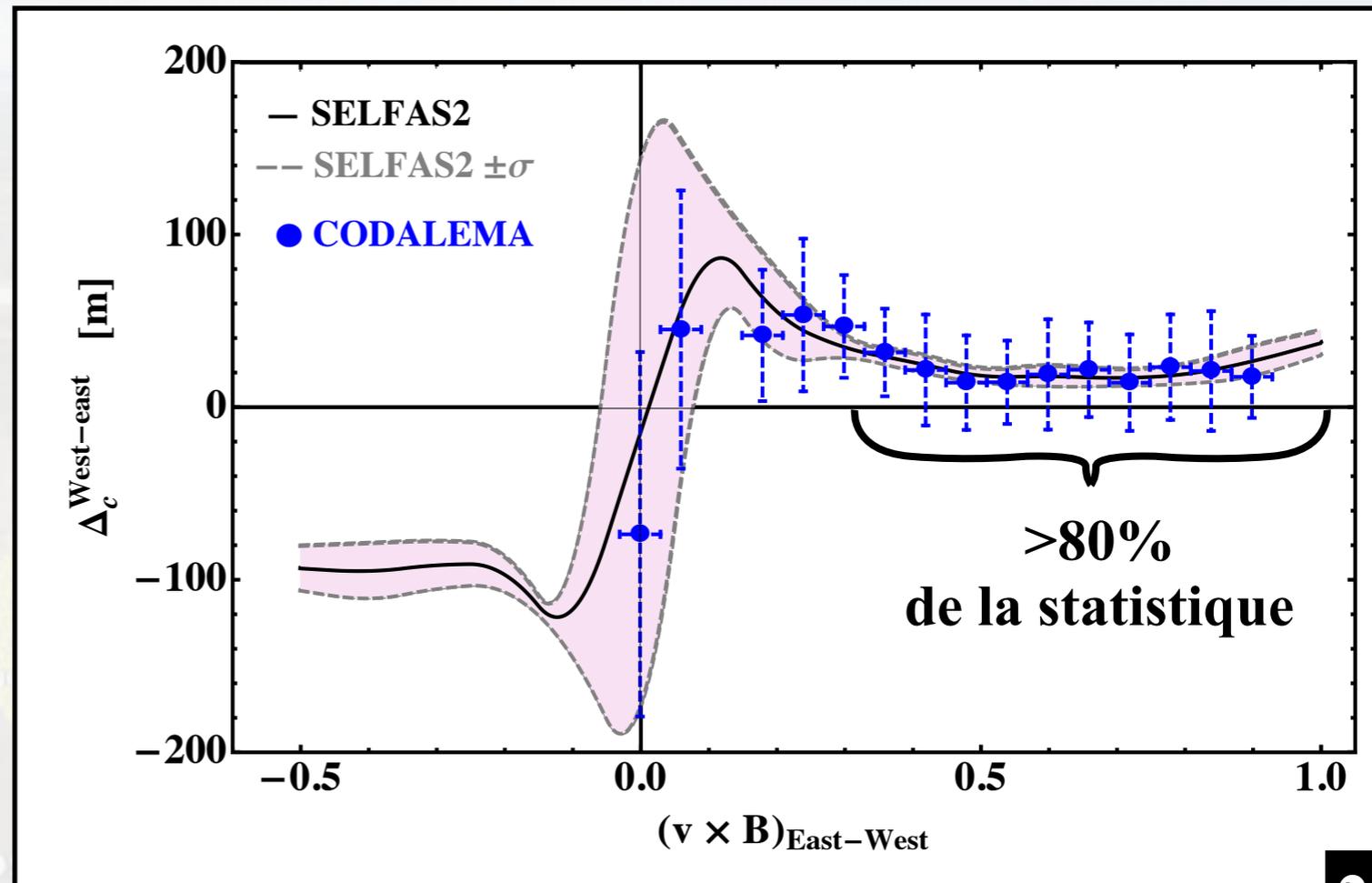
Simulation SELFAS



Dépendance à la direction d'arrivée



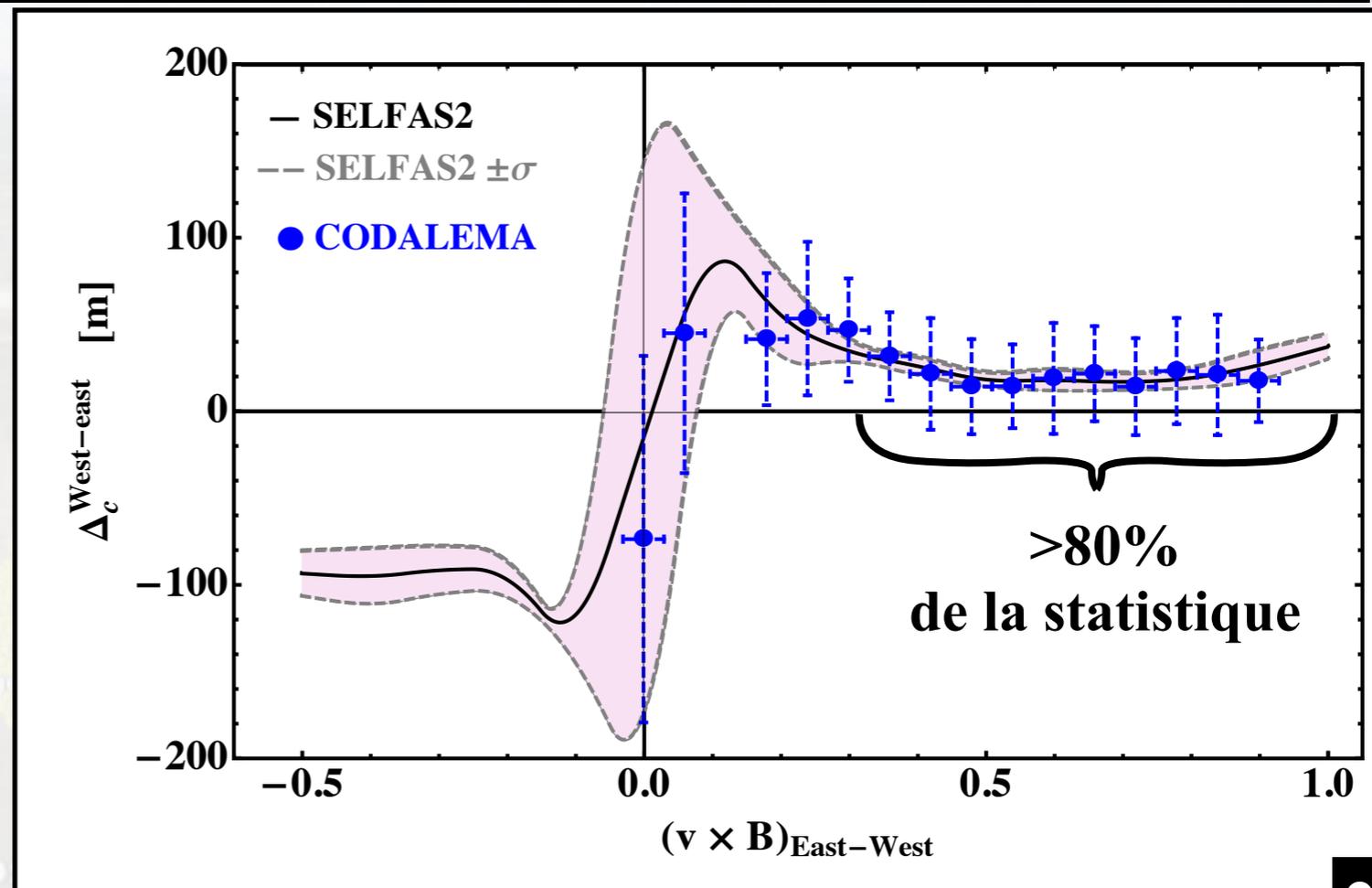
Simulation SELFAS
Données CODALEMA
Accord très satisfaisant!



Selon SELFAS,
le décalage de coeur radio
apparaît comme une
signature de l'existence de l'excès de charge.

- *International Cosmic Ray Conference, Pékin 2011*
- *Soumis à Astroparticle Physics (2012)*

Simulation SELFAS
Données CODALEMA
Accord très satisfaisant!



La radio-détection, technique pas si nouvelle que cela...

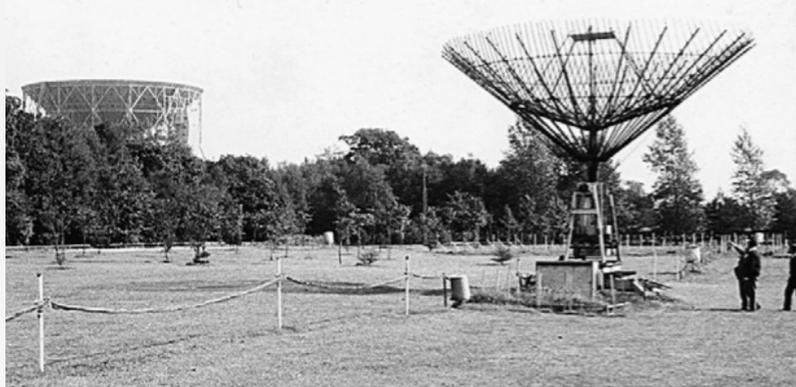
• Askaryan en 1962 :

électrons arrachés au milieu
+ annihilation positrons

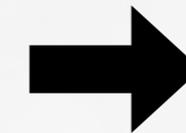


Création d'un signal radio
dans le domaine du MHz

• Expérience à Jodrell Bank (Angleterre) en 1965 :



Réseau de 72 dipôles
+ détecteurs de particules



Première mise en évidence
d'un signal
radio à 44 MHz

**Mécanisme
dominant**

• Kahn et Lerche en 1966 :

Champ magnétique terrestre
déviations systématiques des
particules chargées



Création d'un signal radio
dans le domaine du MHz
proportionnel à la force de
Lorentz

• Expérience à Haverah Park (Angleterre) en 1968 :

- Dépendance de l'amplitude du signal au champ géomagnétique.
- Profil latéral radio caractérisé;

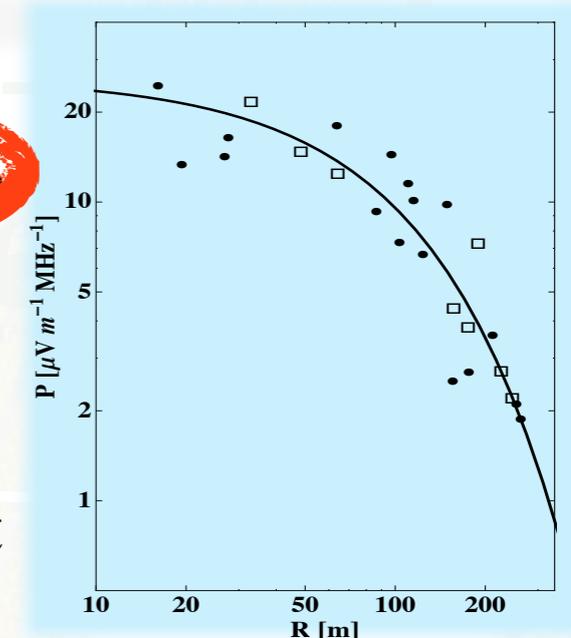
$$\xi_v = 20 \frac{E_p}{10^{17}} \sin(\alpha) \cos(\theta) \exp\left(-\frac{R}{R_0(v, \theta)}\right) \mu\text{V} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{MHz}^{-1}$$



Revue Allan 1971.



Puis abandon au profit
des autres techniques



La radio-détection, technique pas si nouvelle que cela...

• Askaryan en 1962 :

électrons arrachés au milieu
+ annihilation positrons



Création d'un signal radio dans le domaine du MHz

• Expérience à Jodrell Bank (Angleterre) en 1965 :



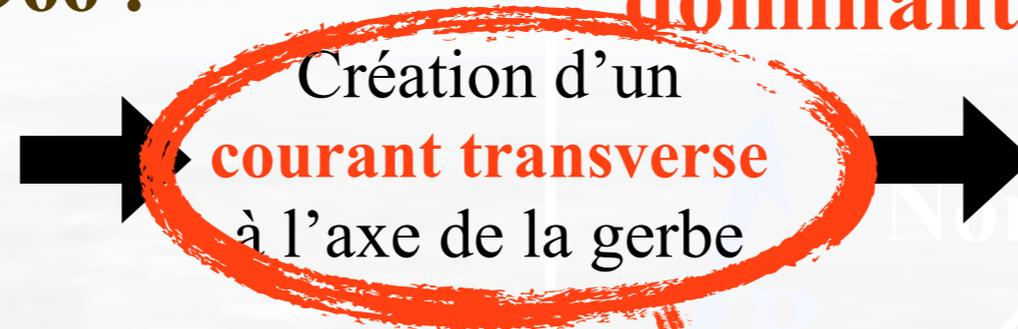
Réseau de 72 dipôles
+ détecteurs de particules

Première mise en évidence d'un signal radio à 44 MHz

Mécanisme dominant

• Kahn et Lerche en 1966 :

Champ magnétique terrestre
déviation systématique des
particules chargées



Création d'un signal radio dans le domaine du MHz proportionnel à la force de Lorentz

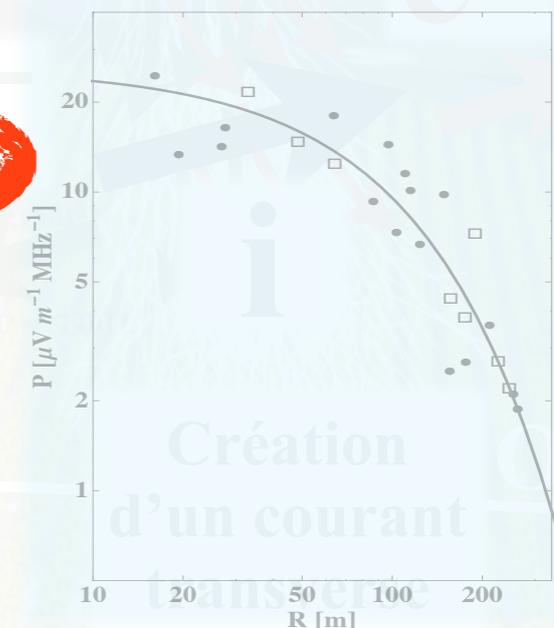
• Expérience à Haverah Park (Angleterre) en 1968 :

- Dépendance de l'amplitude du signal au champ géomagnétique;
- Profil latéral radio caractérisé;

$$\xi_v = 20 \frac{E_p}{10^{17}} \sin(\alpha) \cos(\theta) \exp\left(-\frac{R}{R_0(v, \theta)}\right) \mu\text{V.m}^{-1}.\text{MHz}^{-1}$$

➔ Revue Allan 1971.

➔ Puis abandon au profit des autres techniques



La radio-détection, technique pas si nouvelle que cela...

• Askaryan en 1962 :

électrons arrachés au milieu
+ annihilation positrons



Création d'un signal radio
dans le domaine du MHz

• Expérience à Jodrell Bank (Angleterre) en 1963 :



Réseau de 72 dipôles
+ détecteurs de particules

**Mécanisme
secondaire**

Première mise en évidence
d'un signal
radio à 44 MHz

• Kahn et Lerche en 1966 :

Champ magnétique terrestre
déviations systématiques des
particules chargées



Création d'un signal radio
dans le domaine du MHz
proportionnel à la force de
Lorentz

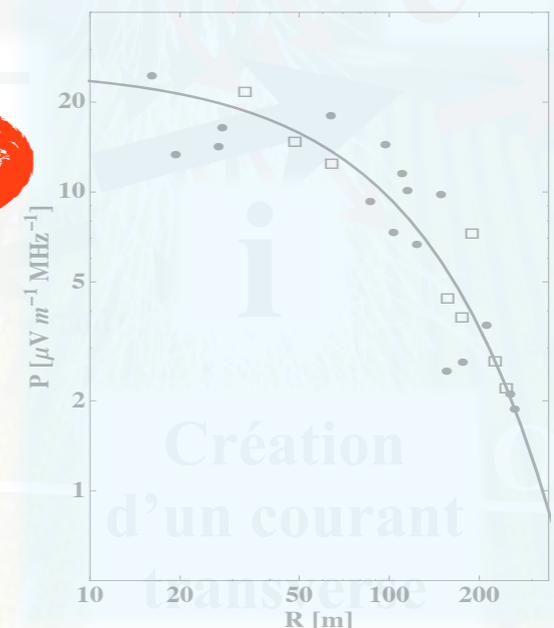
• Expérience à Haverah Park (Angleterre) en 1968 :

- Dépendance de l'amplitude du signal au champ géomagnétique;
- Profil latéral radio caractérisé;

$$\xi_v = 20 \frac{E_p}{10^{17}} \sin(\alpha) \cos(\theta) \exp\left(-\frac{R}{R_0(v, \theta)}\right) \mu\text{V.m}^{-1}.\text{MHz}^{-1}$$

→ Revue Allan 1971.

→ Puis abandon au profit
des autres techniques



Plan de la présentation

- 1 Le rayonnement cosmique d'ultra haute énergie**
- 2 La radio détection des gerbes atmosphériques**
 - a Bref historique
 - b Radio détection selon CODALEMA & compagnie...
- 3 Nouvel outil de simulation radio des gerbes : SELFAS**
- 4 Nouvelles interprétations avec SELFAS**
 - a Mise en évidence de l'existence de l'excès de charge
 - b Effet de l'indice de l'air, «effet cerenkov»
 - c Signal de la mort subite de la gerbe
- 5 Conclusion et perspectives**

Plan de la présentation

- 1 Le rayonnement cosmique d'ultra haute énergie
- 2 La radio détection des gerbes atmosphériques
 - a Bref historique
 - b Radio détection selon CODALEMA & compagnie...
- 3 **Nouvel outil de simulation radio des gerbes : SELFAS**
- 4 **Nouvelles interprétations avec SELFAS**
 - a Mise en évidence de l'existence de l'excès de charge
 - b Effet de l'indice de l'air, «effet cerenkov»**
 - c Signal de la mort subite de la gerbe
- 5 **Conclusion et perspectives**

Pierre Auger Observatory - Malargue Campus

Auger - Balloon Launching Station

Auger - Central Laser Facility

Los Morados Lidar

Effet de l'indice de l'air «Effet Cerenkov»

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

$$t = t_{ret} + \eta_{eff} \frac{R_i(t_{ret})}{c}$$

$$\eta_{air} = f(z)$$

$$\eta_{air}(z=0) = 1.0003$$

**Indice variable
avec altitude**

Effet de l'indice de l'air «Effet Cerenkov»

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

$$t = t_{ret} + \eta_{eff} \frac{R_i(t_{ret})}{c}$$

$$\eta_{air} = f(z)$$

$$\eta_{air}(z=0) = 1.0003$$

**Indice variable
avec altitude**



Effet de l'indice de l'air «Effet Cerenkov»

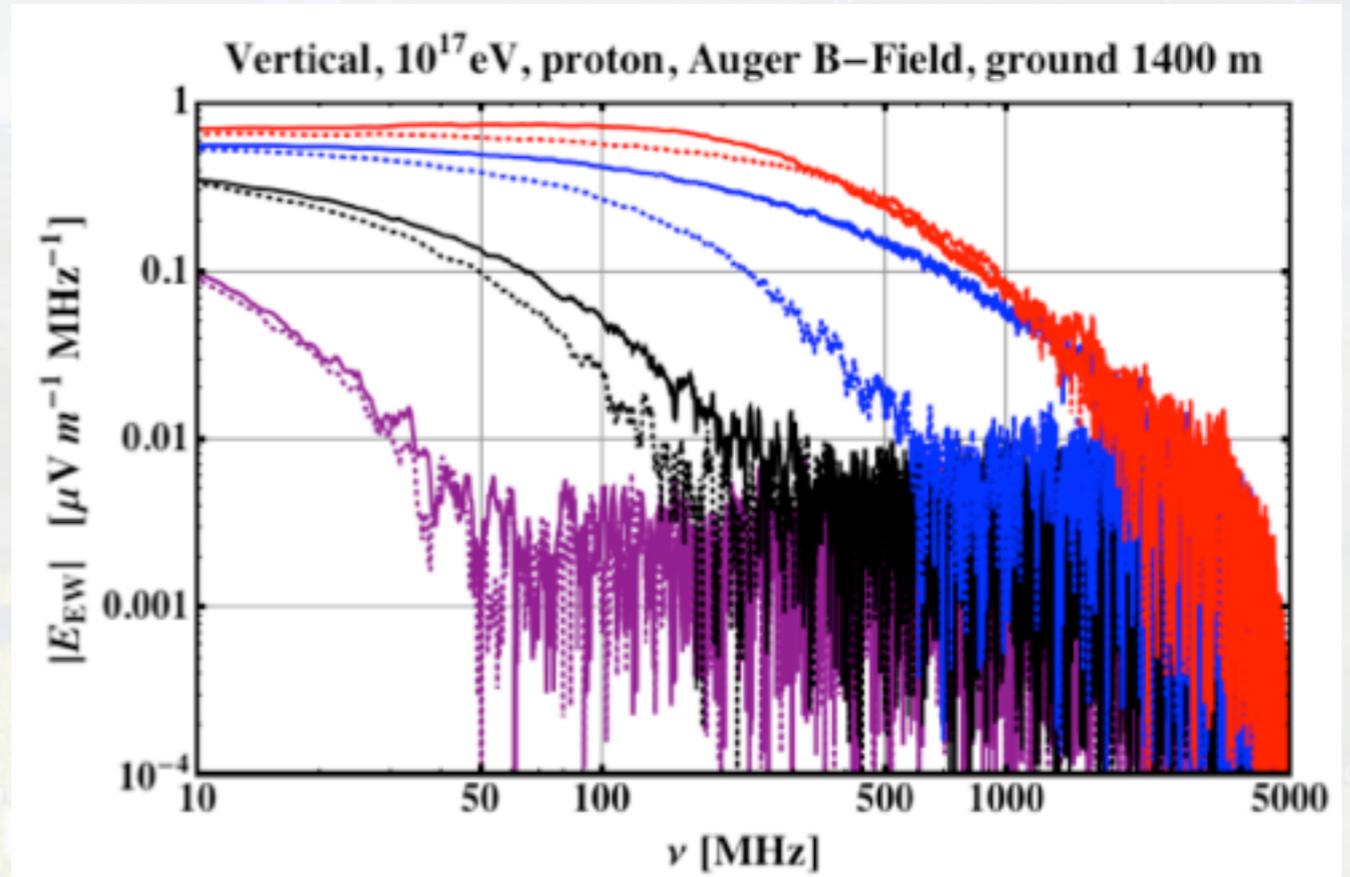
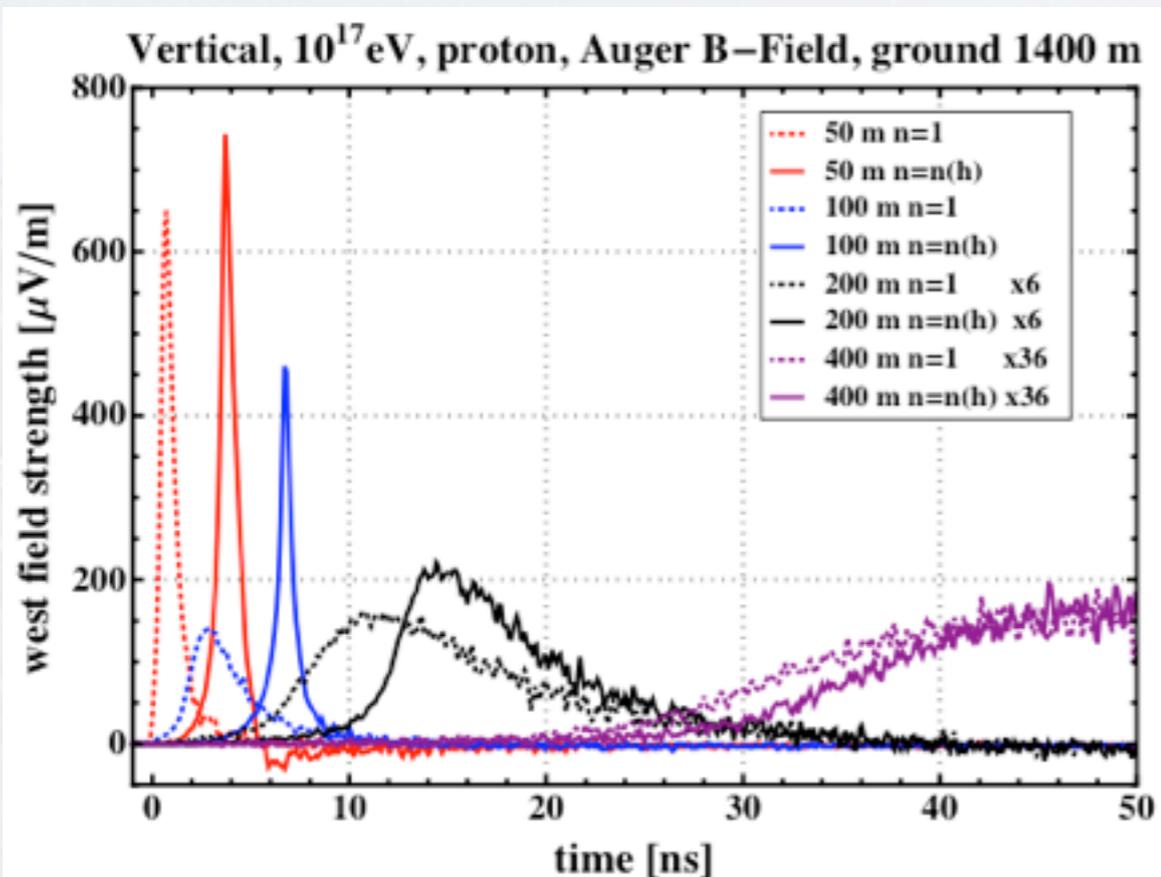
$$\vec{E}_{tot}(\vec{x}, t) = \frac{\eta_i^2}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r} \left\{ \sum_{i=1}^{\zeta} \left[\frac{\vec{n}_i q_i(t_{ret})}{R_i^2 (1 - \eta_i \vec{\beta}_i \cdot \vec{n}_i)} \right]_{ret} + \frac{1}{c} \frac{\partial}{\partial t} \sum_{i=1}^{\zeta} \left[\frac{(\vec{n}_i - \eta_i \vec{\beta}_i)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

$$t = t_{ret} + \eta_{eff} \frac{R_i(t_{ret})}{c}$$

$$\eta_{air} = f(z)$$

$$\eta_{air}(z=0) = 1.0003$$

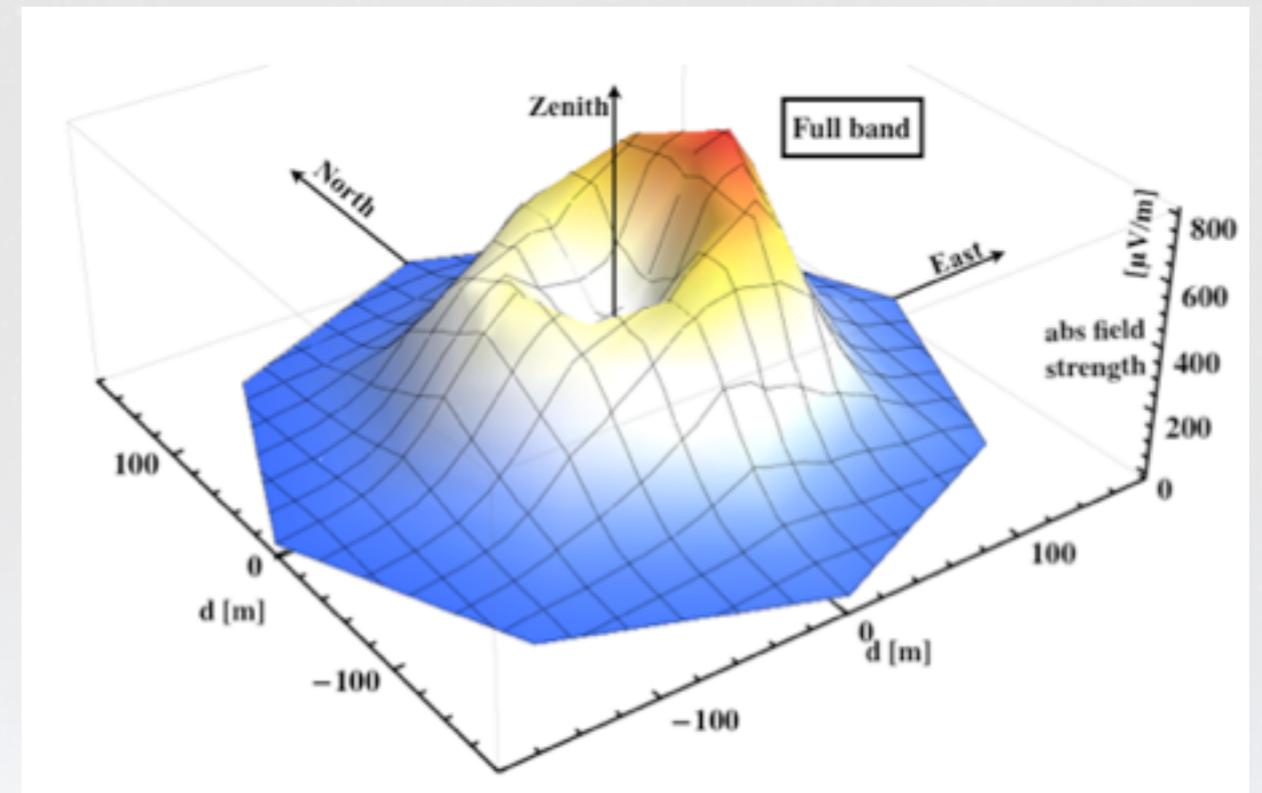
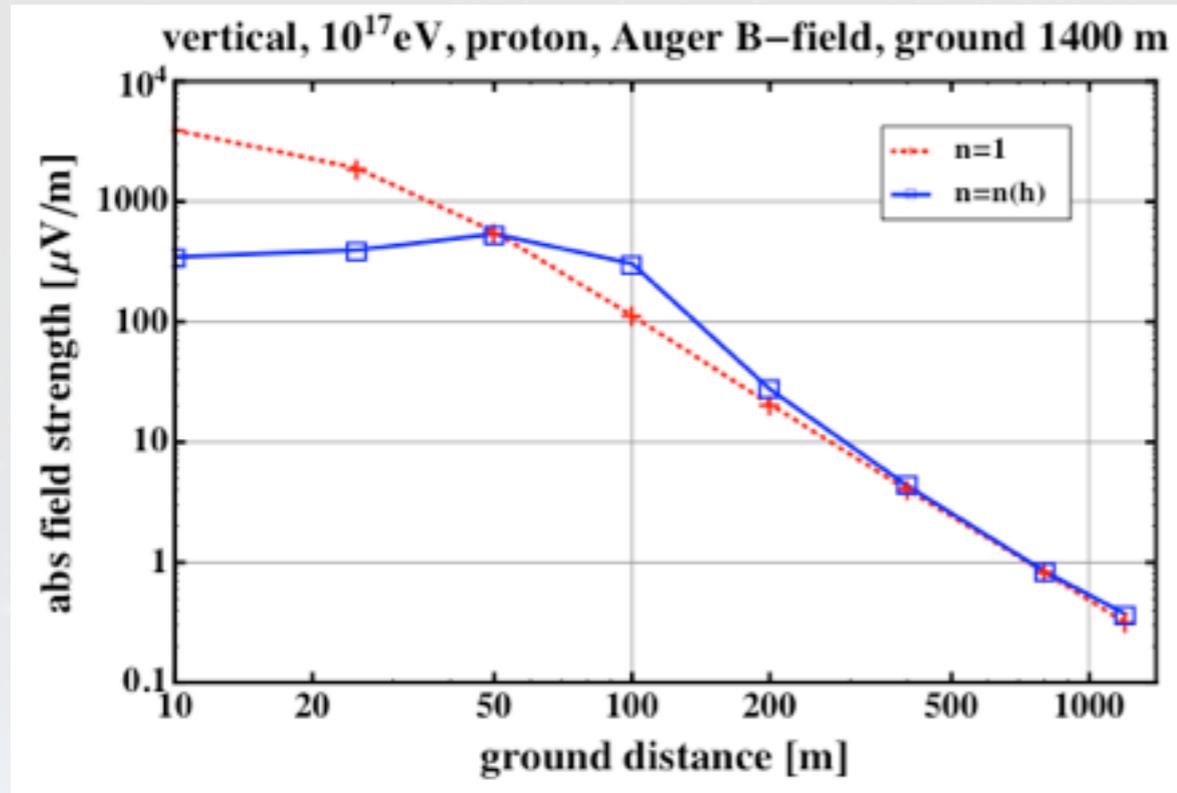
Indice variable avec altitude



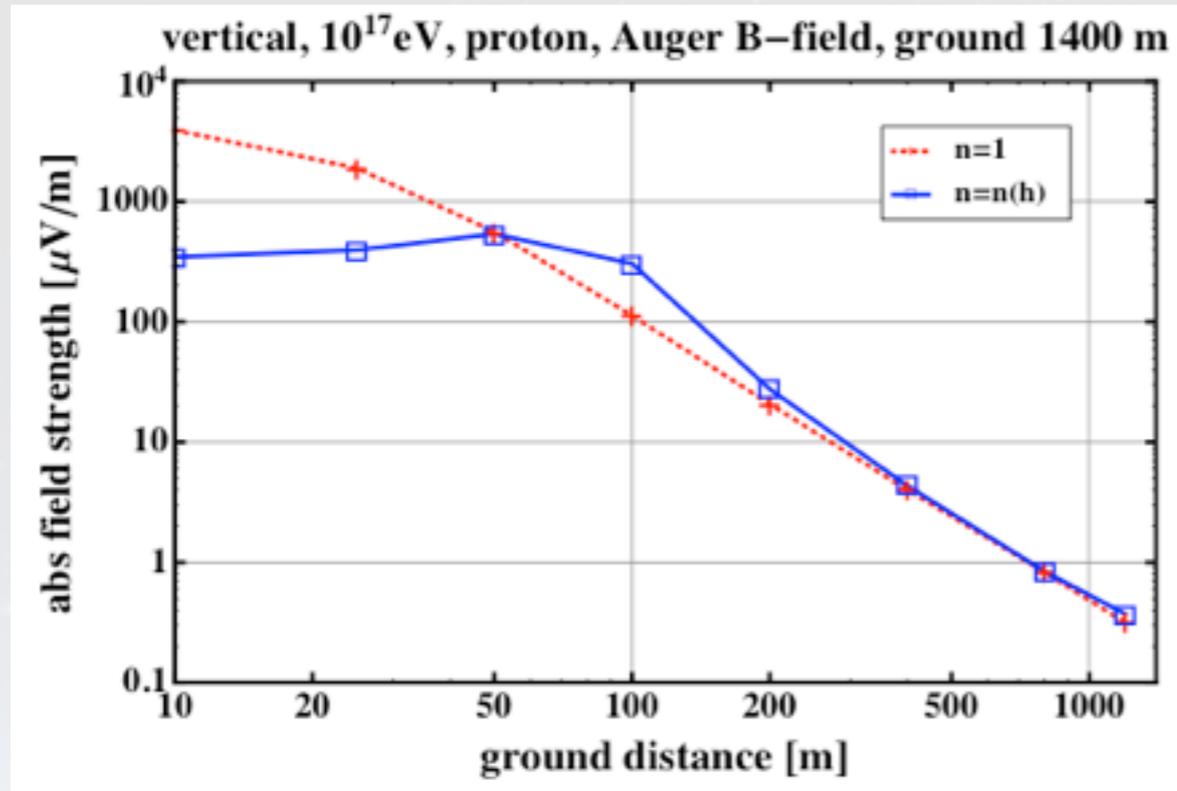
•AIP Proc. ARENA 2012 to be published

Effet de l'indice de l'air

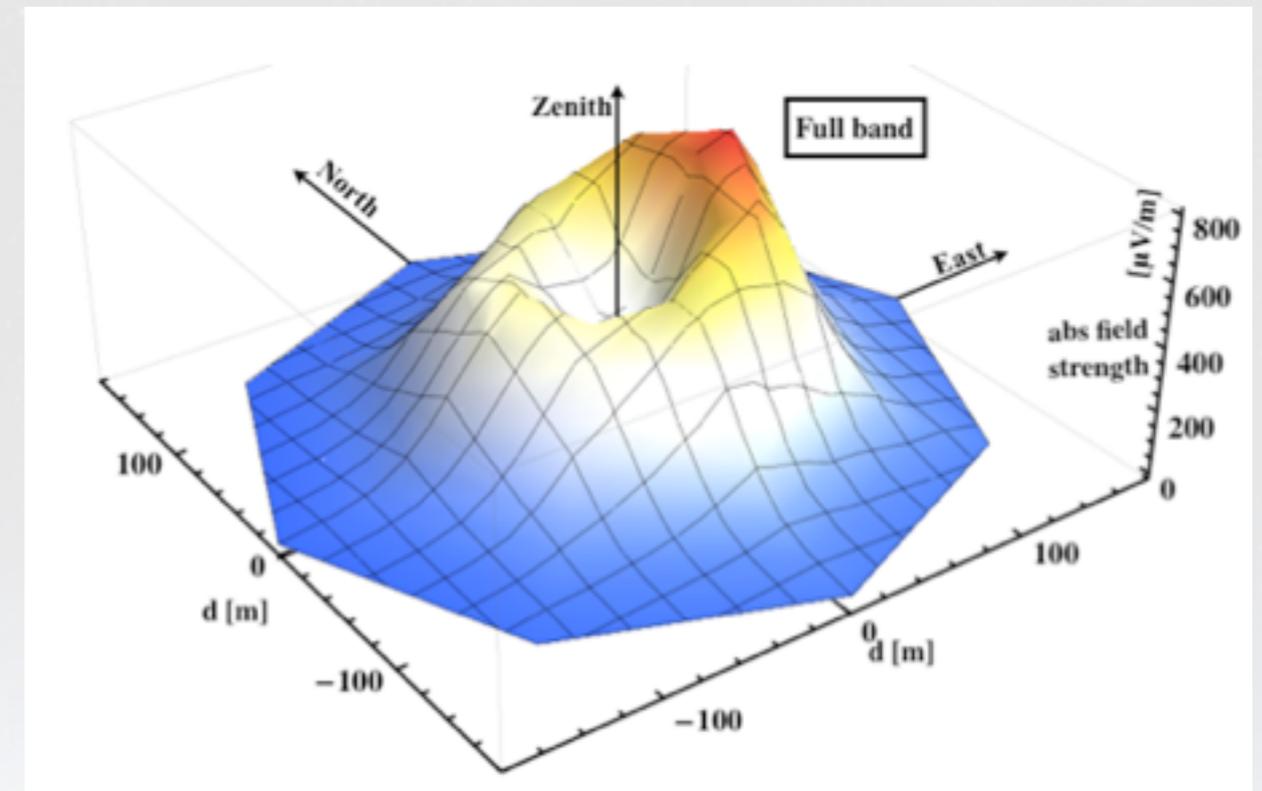
«Effet Cerenkov»



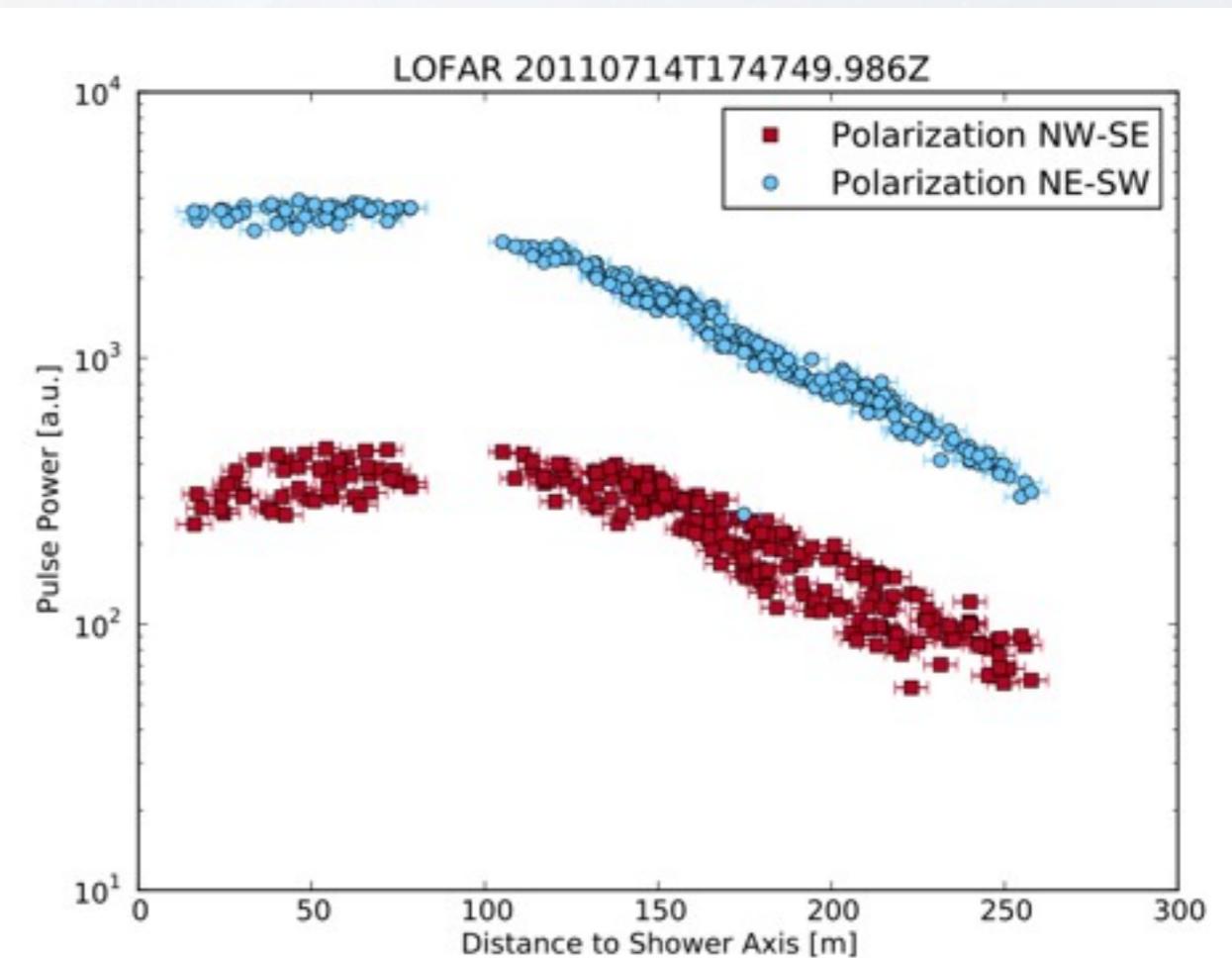
Effet de l'indice de l'air



«Effet Cerenkov»

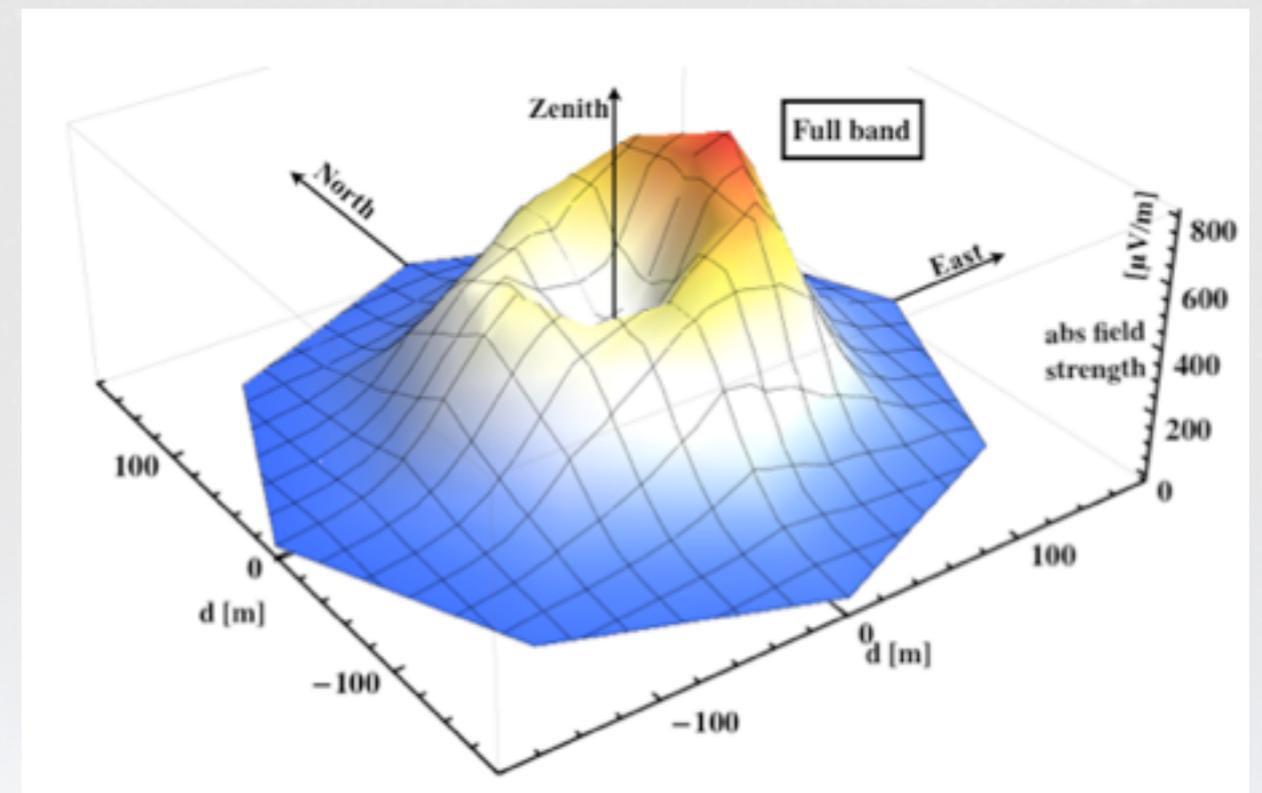
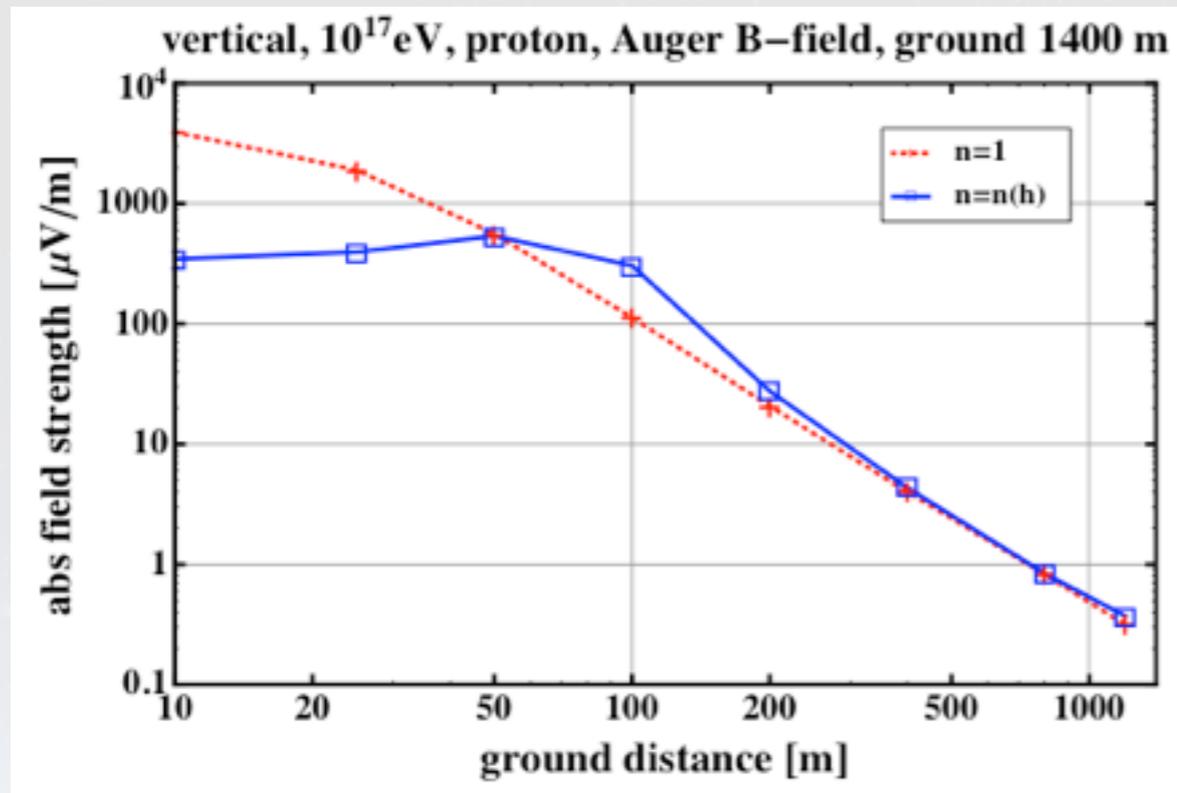


Pourrait expliquer les profils plats...



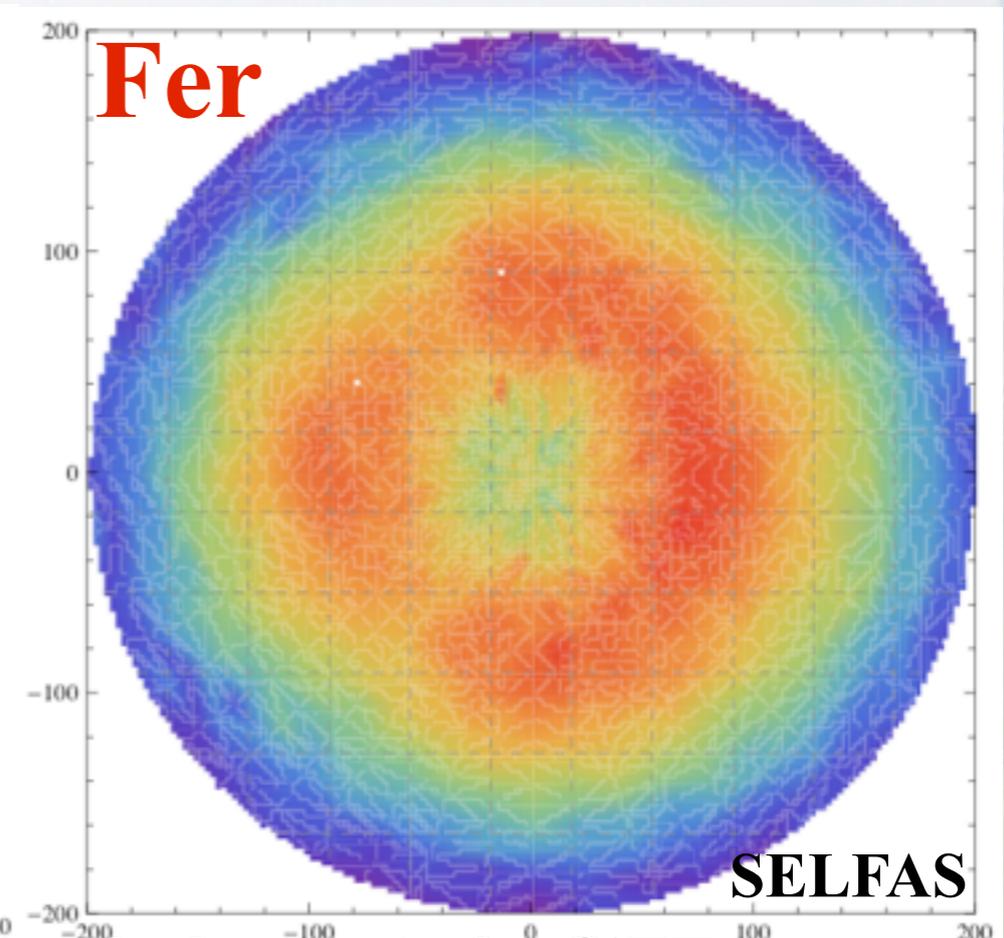
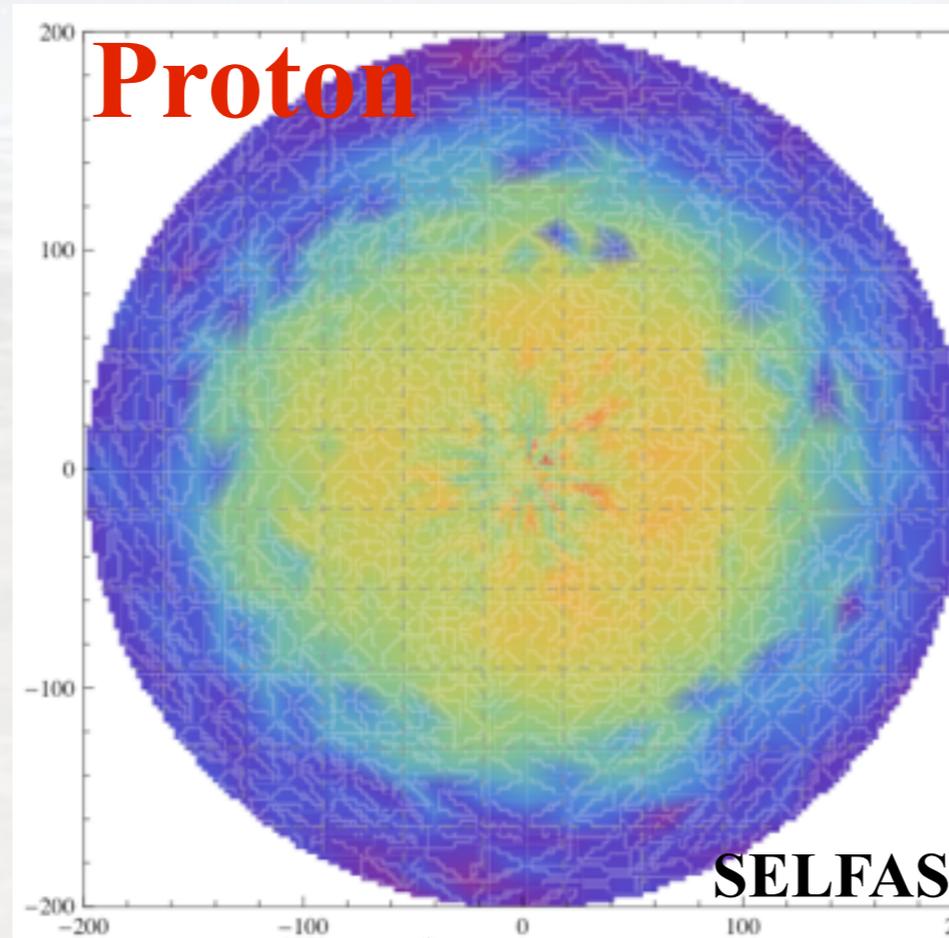
Effet de l'indice de l'air

«Effet Cerenkov»



Observable de la nature du primaire?

Etude en cours...



Puissance entre 0.3 et 1.2 GHz

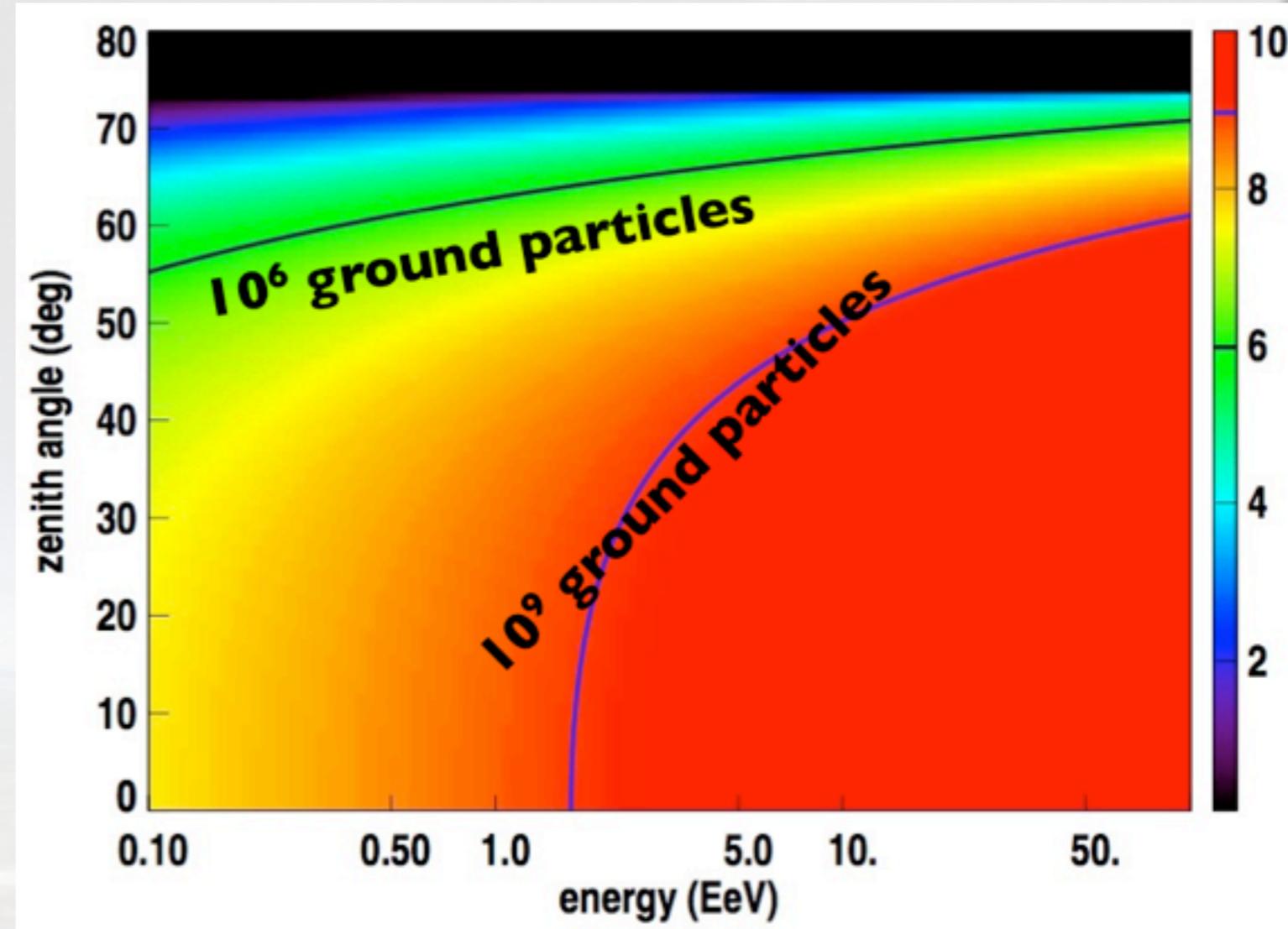
Plan de la présentation

- 1 Le rayonnement cosmique d'ultra haute énergie**
- 2 La radio détection des gerbes atmosphériques**
 - a Bref historique
 - b Radio détection selon CODALEMA & compagnie...
- 3 Nouvel outil de simulation radio des gerbes : SELFAS**
- 4 Nouvelles interprétations avec SELFAS...**
 - a Mise en évidence de l'existence de l'excès de charge
 - b Effet de l'indice de l'air, «effet cerenkov»
 - c Signal de la mort subite de la gerbe
- 5 Conclusion et perspectives**

Plan de la présentation

- 1 Le rayonnement cosmique d'ultra haute énergie
- 2 La radio détection des gerbes atmosphériques
 - a Bref historique
 - b Radio détection selon CODALEMA & compagnie...
- 3 **Nouvel outil de simulation radio des gerbes : SELFAS**
- 4 **Nouvelles interprétations avec SELFAS...**
 - a Mise en évidence de l'existence de l'excès de charge
 - b Effet de l'indice de l'air, «effet cerenkov»
 - c Signal de la mort subite de la gerbe**
- 5 **Conclusion et perspectives**

Mort subite de la gerbe : émission radio cohérente?

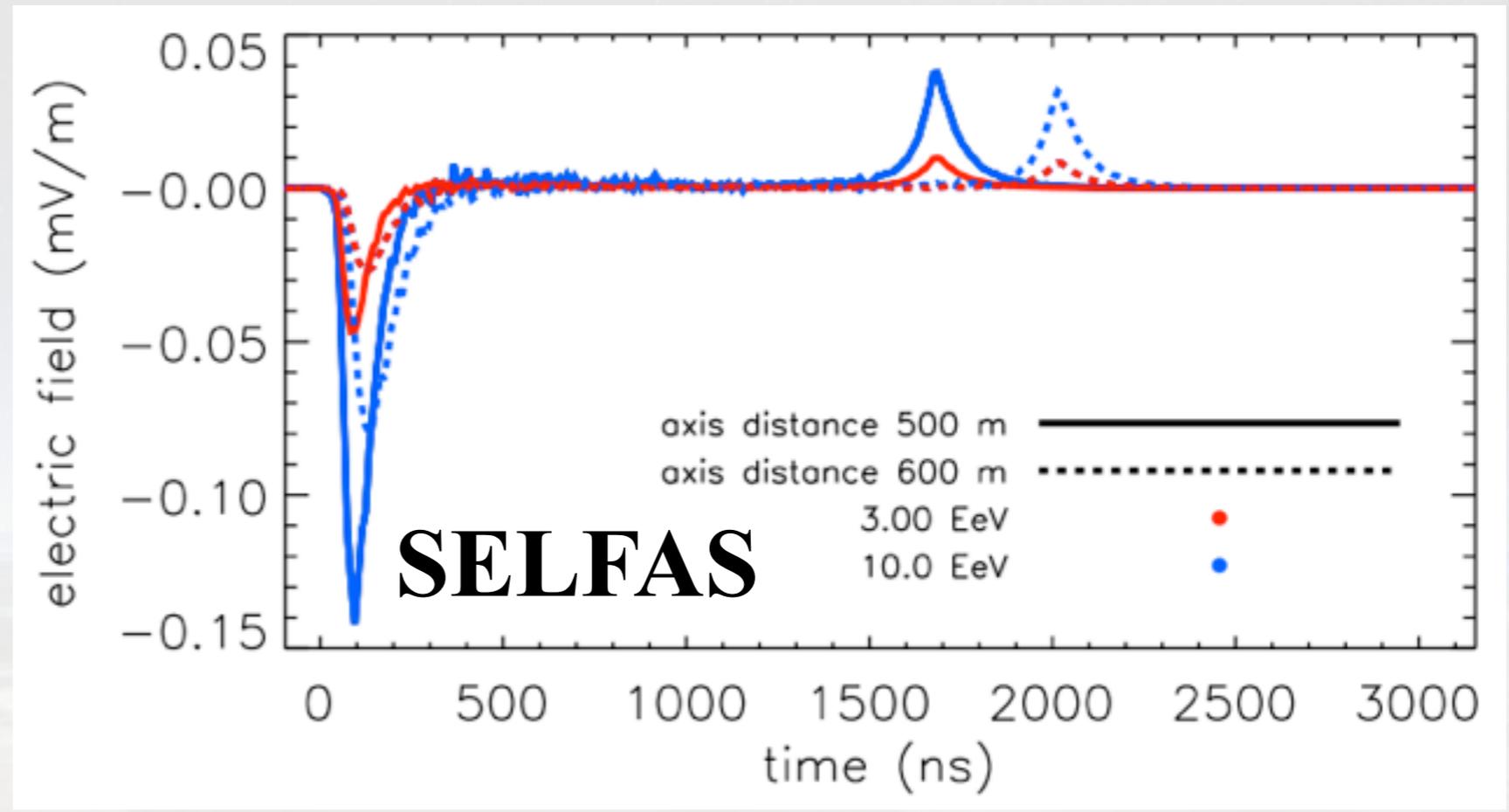


Décélération
=
Radiation...

ground

Si le nombre de
particules est
suffisant :
signal observable?

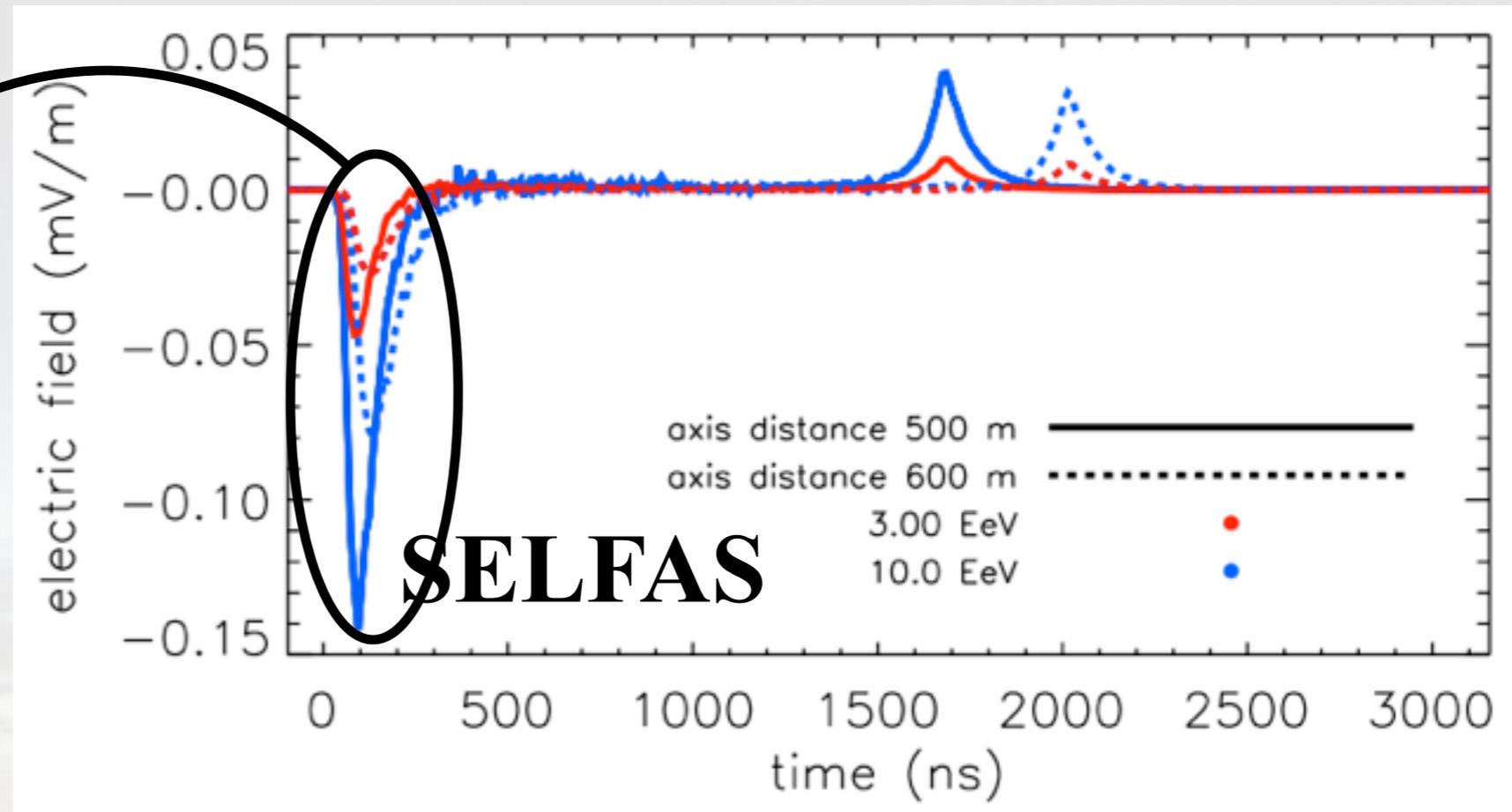
Mort subite de la gerbe : émission radio cohérente?



ground

**Champ E orienté
selon l'axe de la gerbe
bremsstrahlung cohérent**

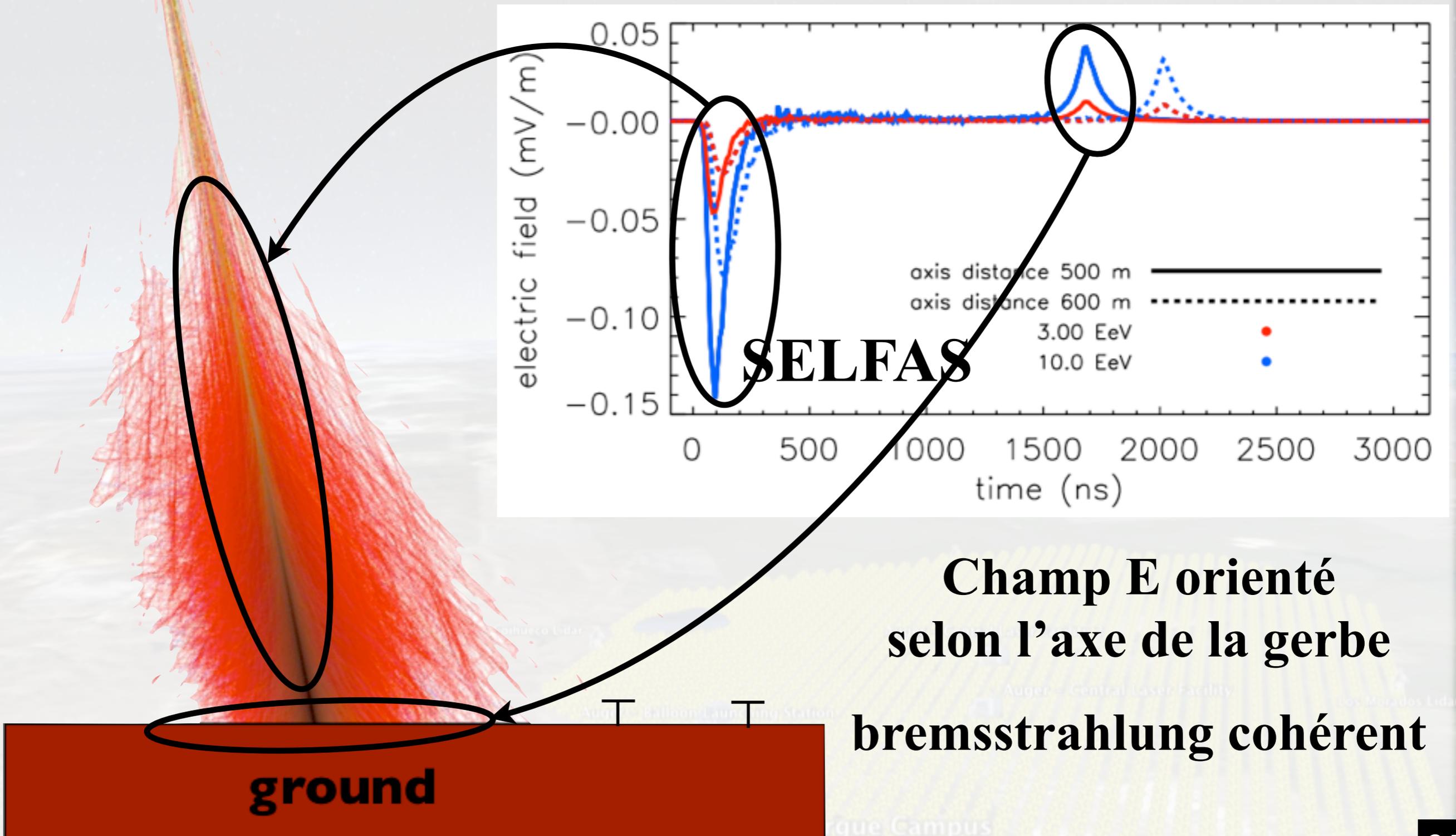
Mort subite de la gerbe : émission radio cohérente?



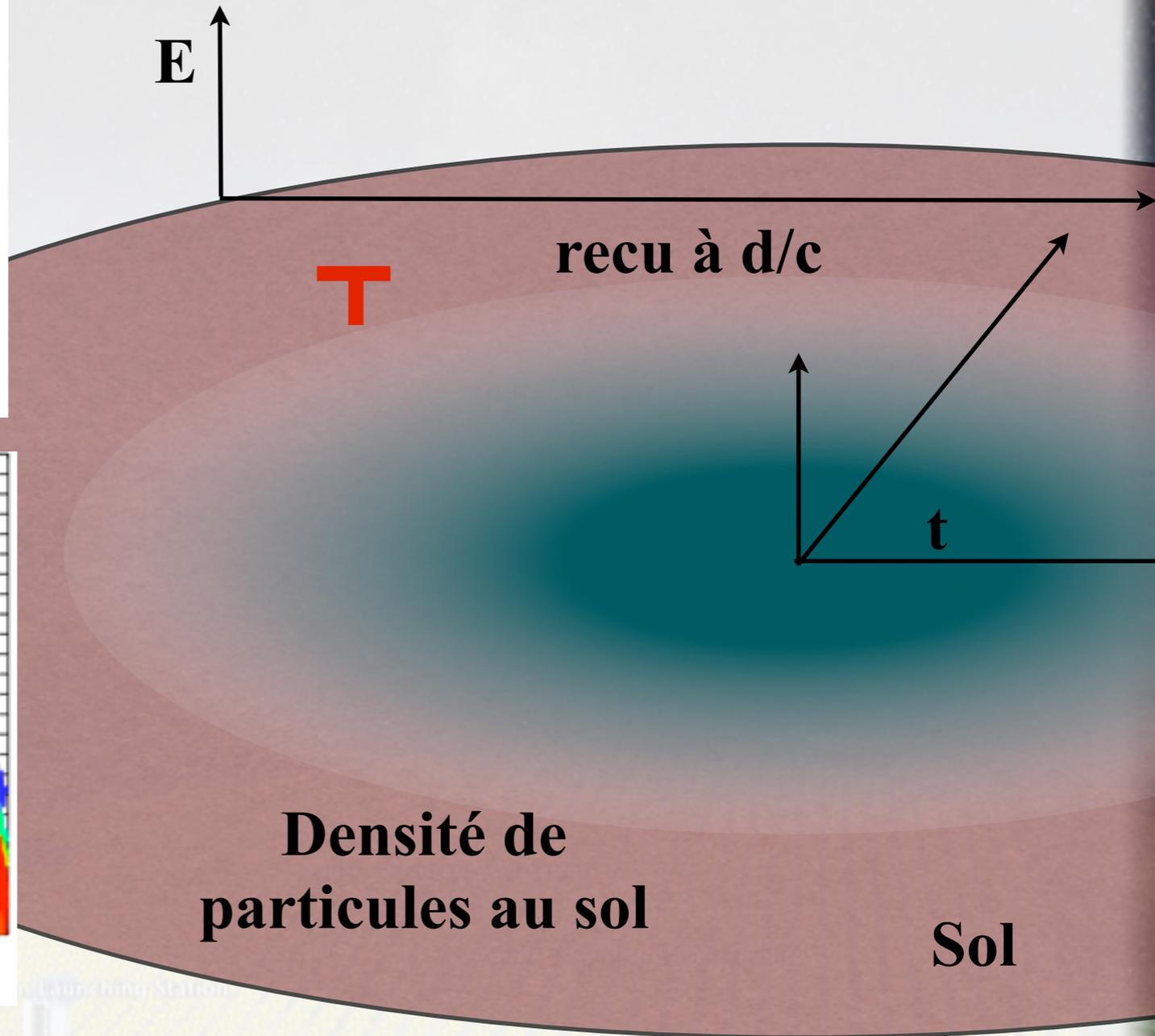
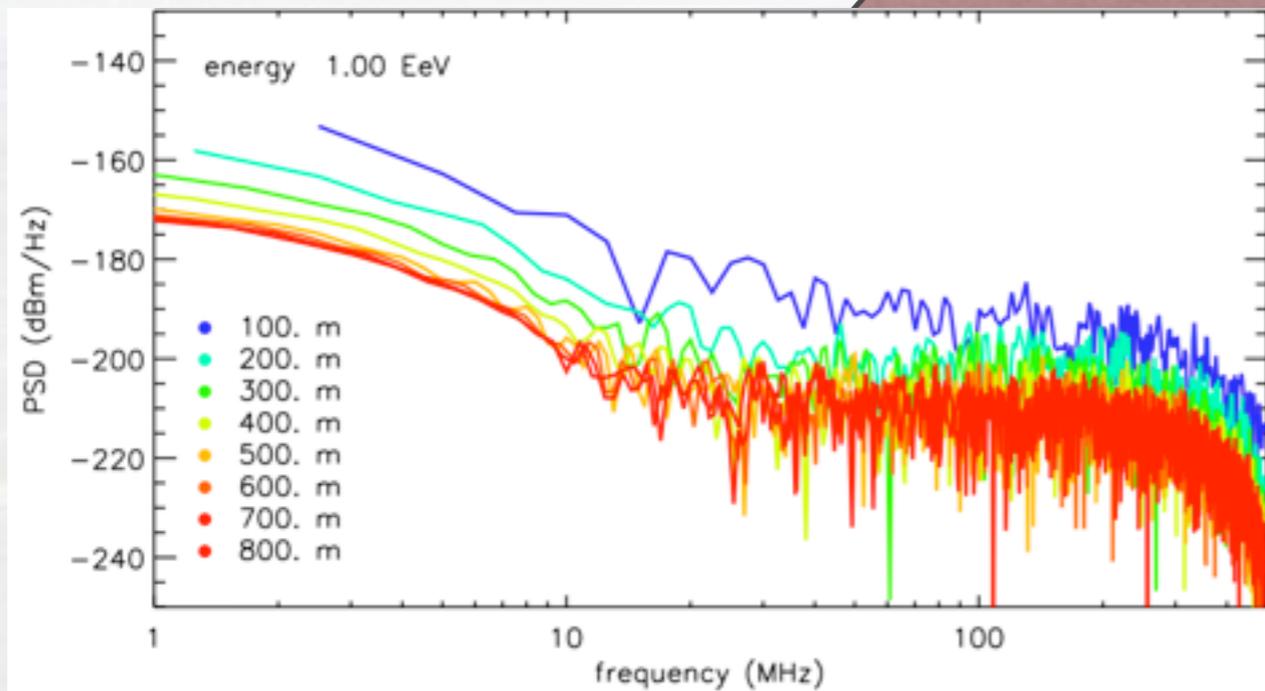
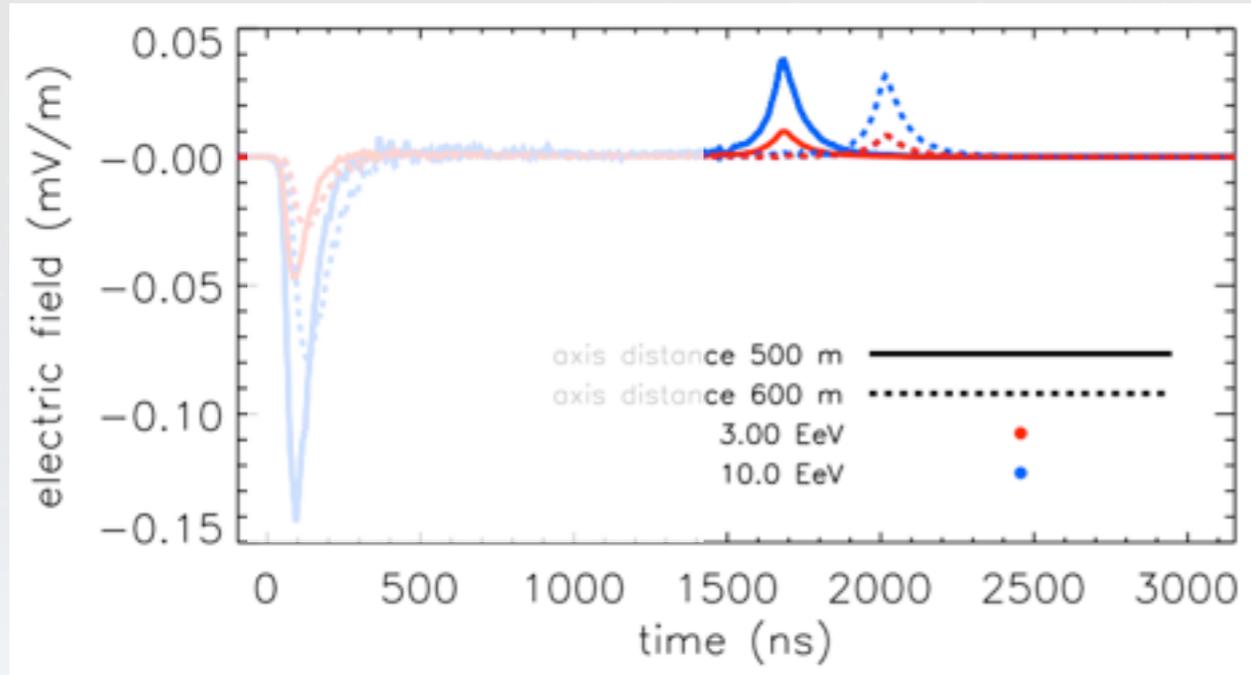
**Champ E orienté
selon l'axe de la gerbe
bremsstrahlung cohérent**

ground

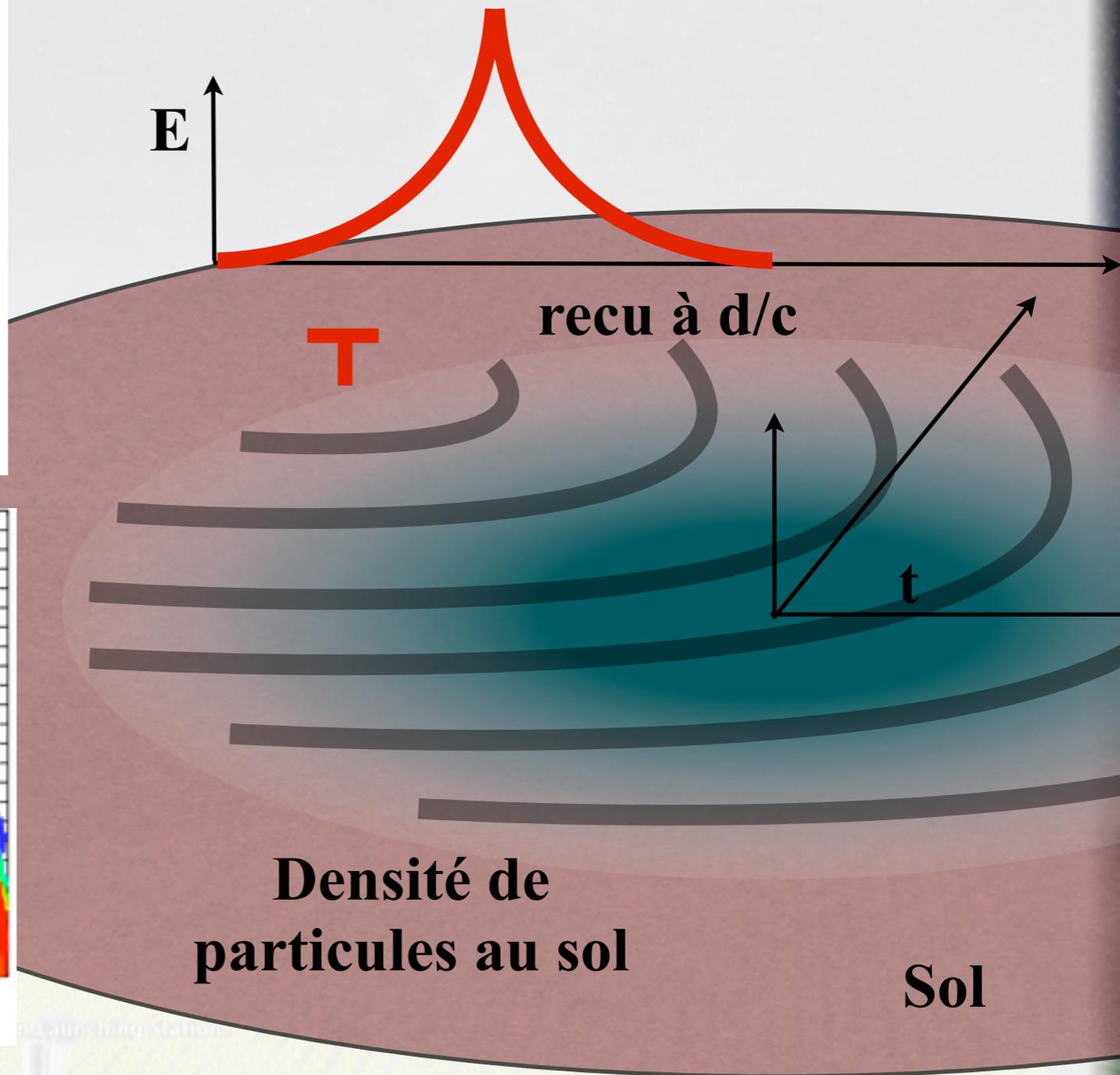
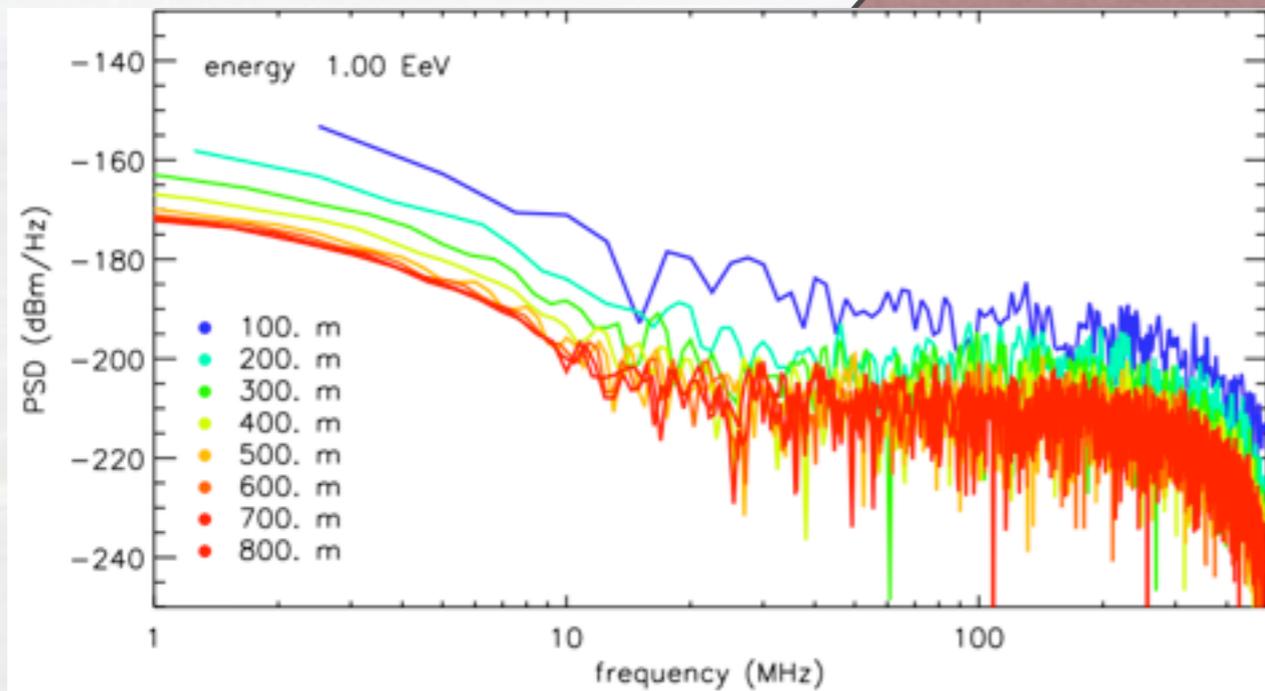
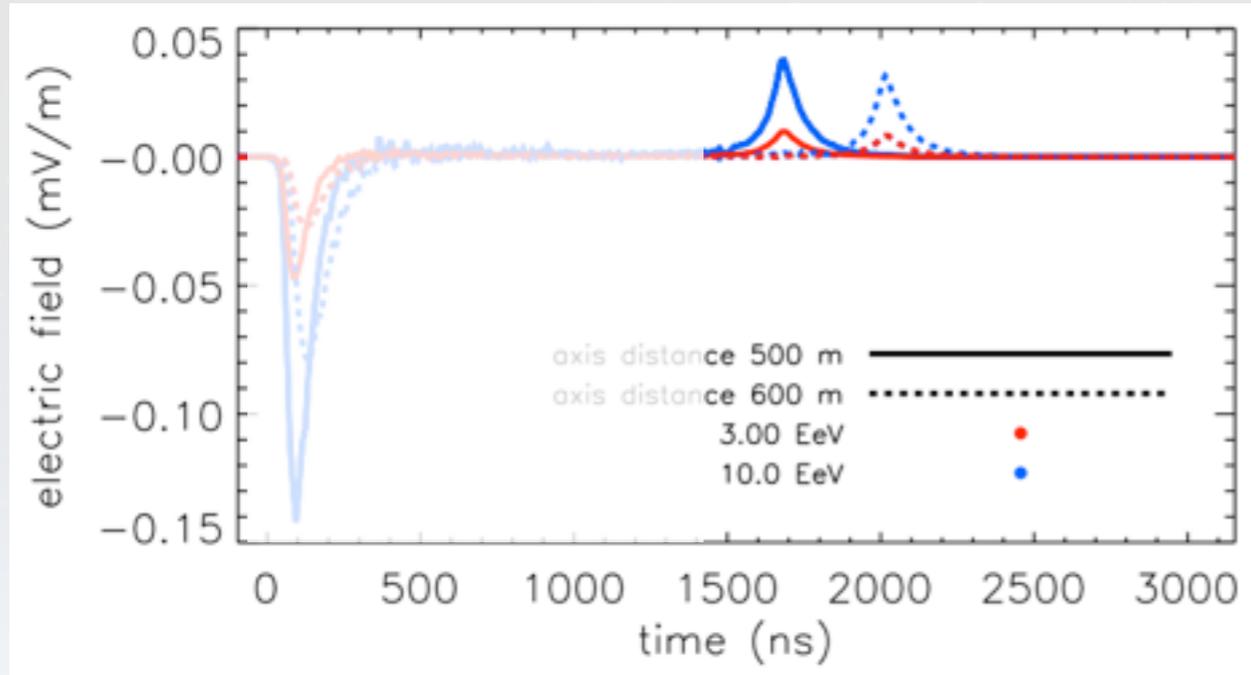
Mort subite de la gerbe : émission radio cohérente?



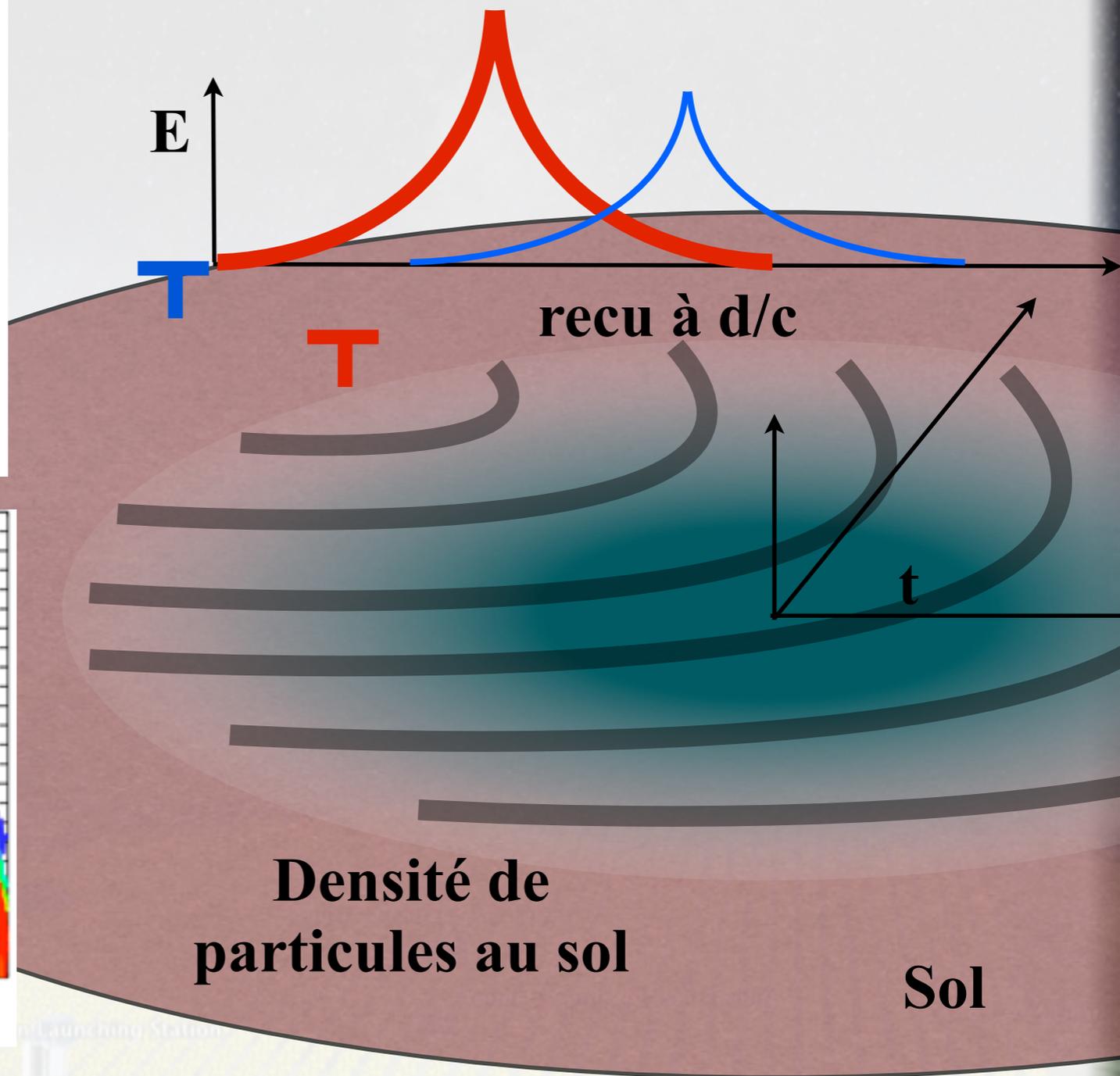
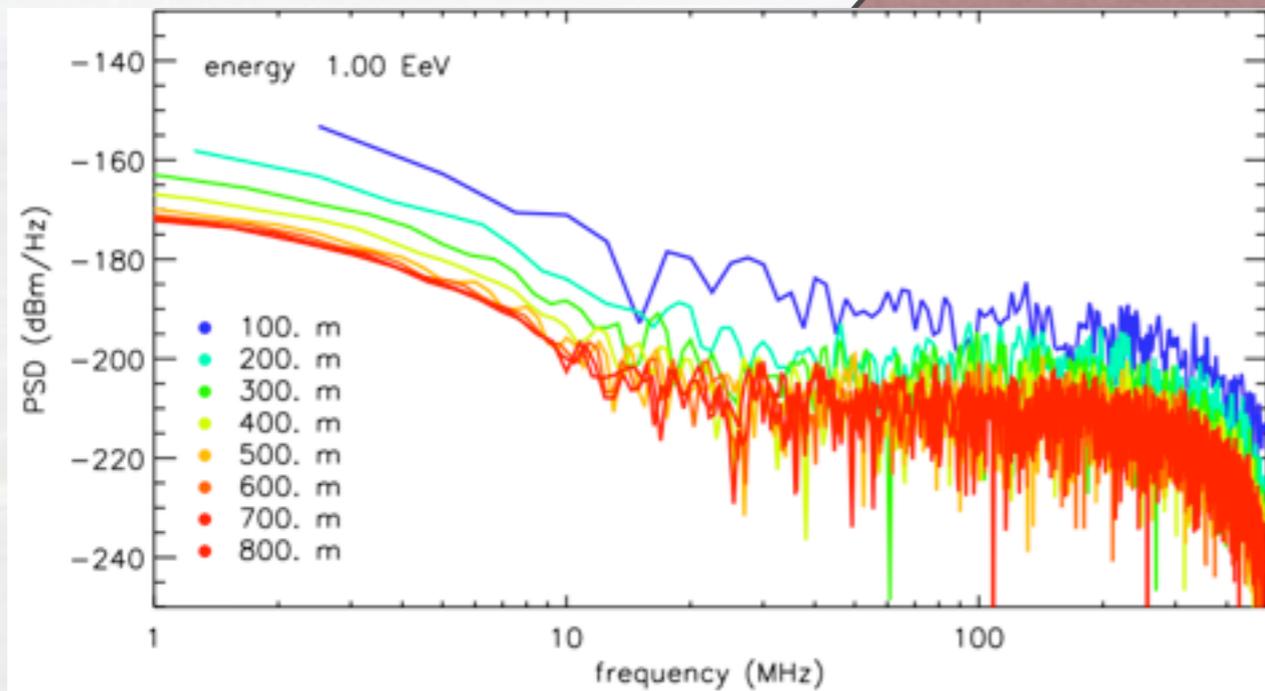
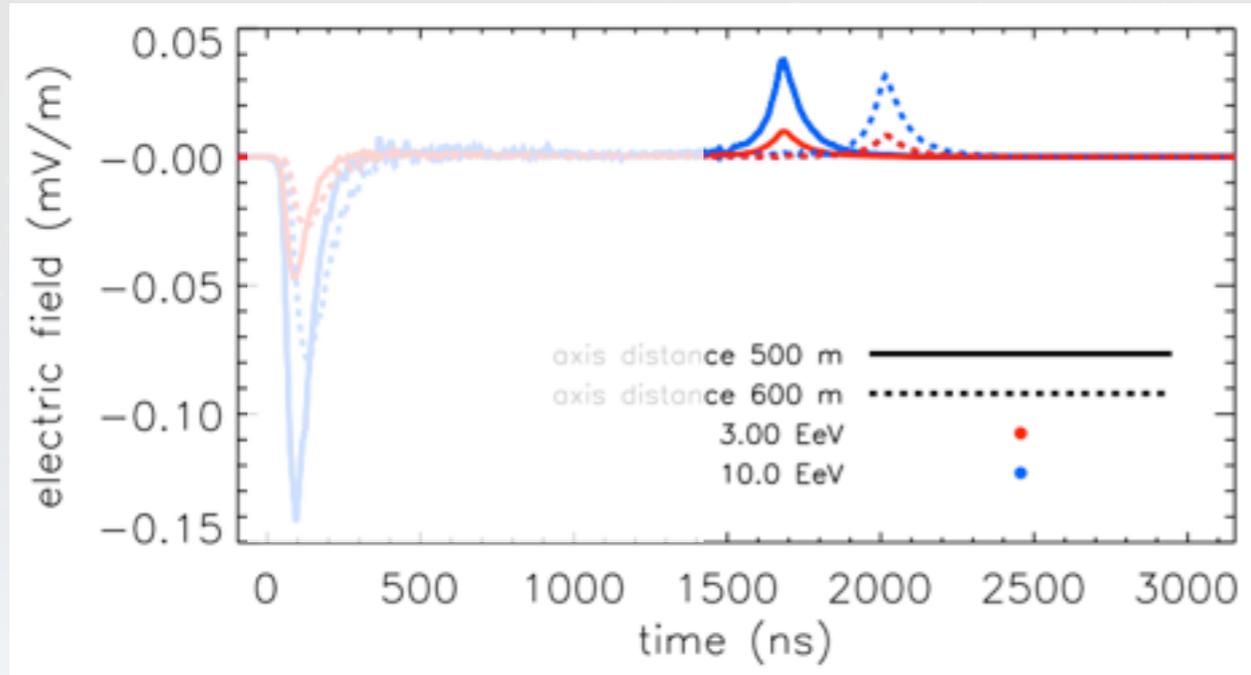
Mort subite de la gerbe : émission radio cohérente?



Mort subite de la gerbe : émission radio cohérente?



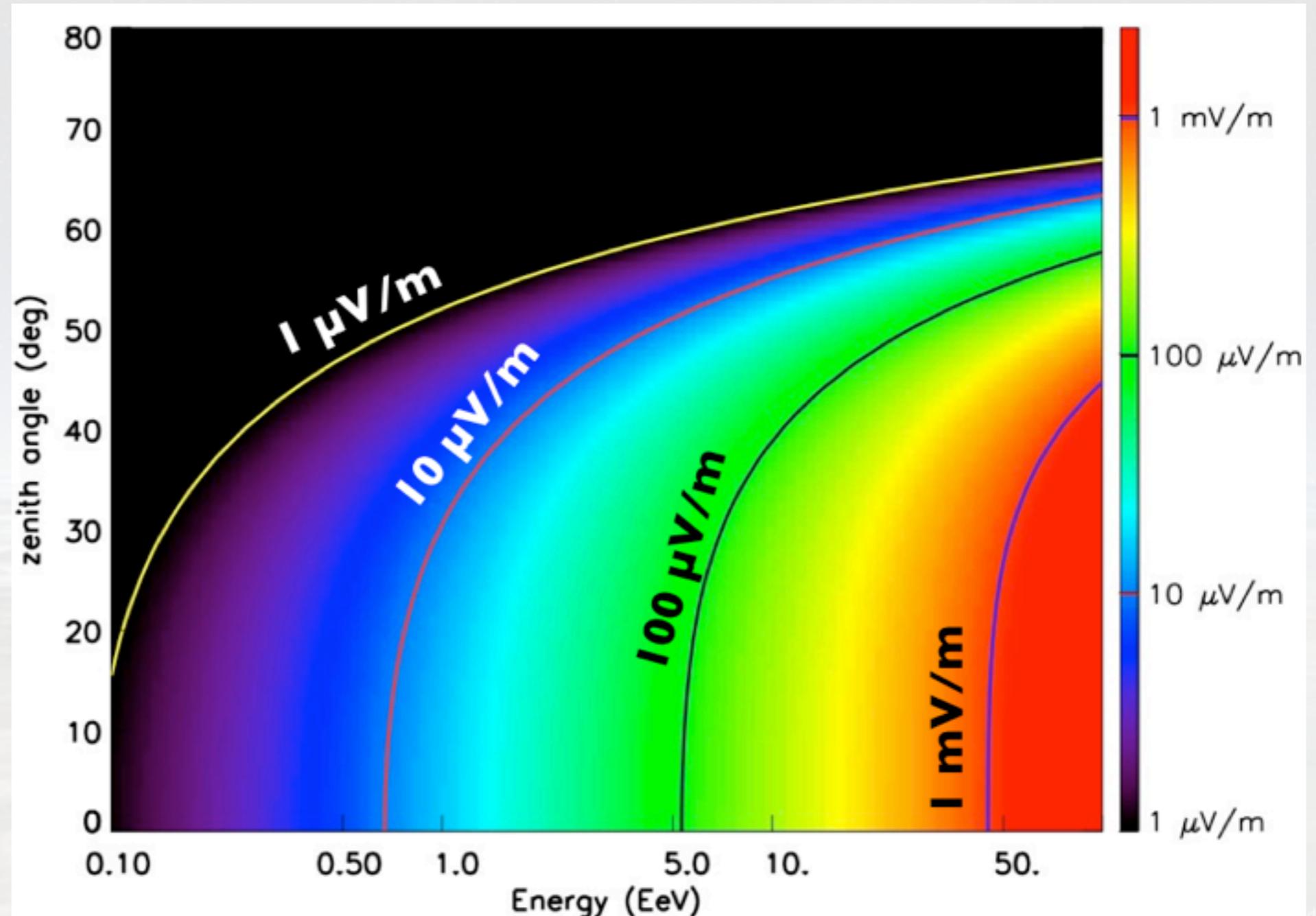
Mort subite de la gerbe : émission radio cohérente?



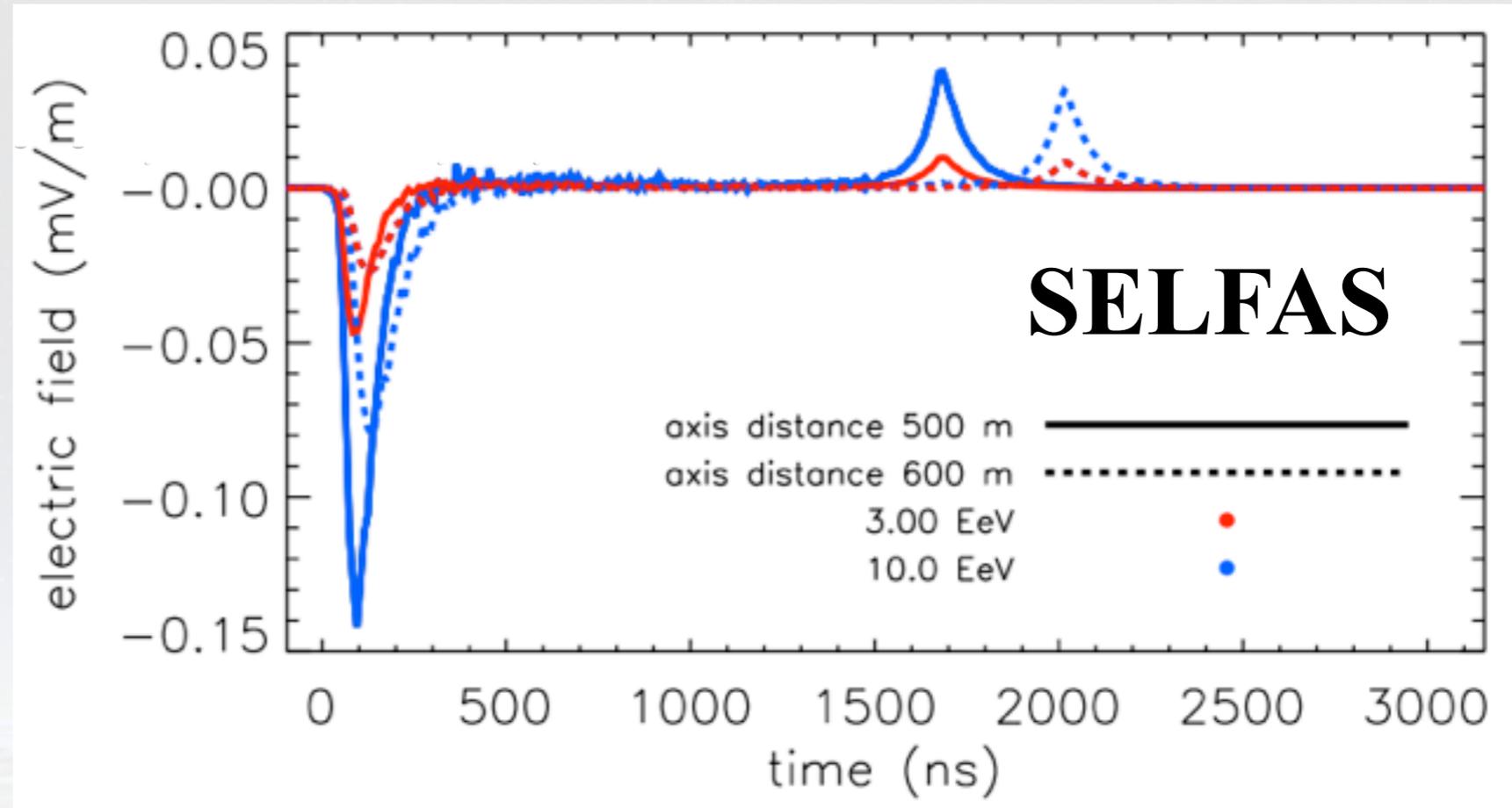
Mort subite de la gerbe : émission radio cohérente?

Amplitude attendue à 100 m

Pour le site de l'observatoire Auger



Mort subite de la gerbe : émission radio cohérente?



Intérêts potentiels:

- Procure un timing absolu du pulse principal
- Donne un critère fort sur la discrimination des évènements

ground

Plan de la présentation

- 1 **Le rayonnement cosmique d'ultra haute énergie**
- 2 **La radio détection des gerbes atmosphériques**
 - a Bref historique
 - b Radio détection selon CODALEMA & compagnie...
- 3 **Nouvel outil de simulation radio des gerbes : SELFAS**
- 4 **Nouvelles interprétations avec SELFAS...**
 - a Mise en évidence de l'existence de l'excès de charge
 - b Effet de l'indice de l'air, «effet cerenkov»
 - c Signal de la mort subite de la gerbe
- 5 **Conclusion et perspectives**

Plan de la présentation

- 1 Le rayonnement cosmique d'ultra haute énergie
- 2 La radio détection des gerbes atmosphériques
 - a Bref historique
 - b Radio détection selon CODALEMA & compagnie...
- 3 **Nouvel outil de simulation radio des gerbes : SELFAS**
- 4 **Nouvelles interprétations avec SELFAS...**
 - a Mise en évidence de l'existence de l'excès de charge
 - b Effet de l'indice de l'air, «effet cerenkov»
 - c Signal de la mort subite de la gerbe
- 5 **Conclusion et perspectives**

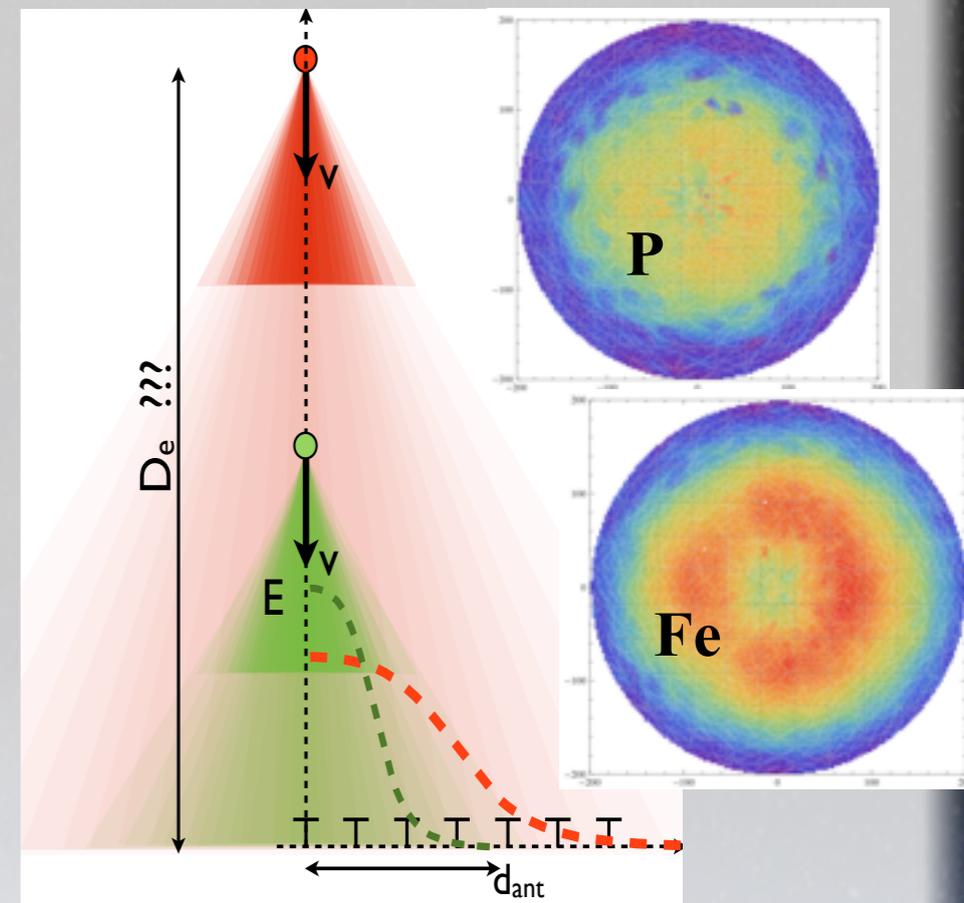
Conclusion

➔ Caractéristiques du primaire avec la radio

- ♦ OK pour la direction d'arrivée (grande précision résolution angulaire de 0.5° , calibration par détection des avions, trajectoires)
- ♦ OK pour l'estimation en énergie (affiner la corrélation, nouveau profil...)
- ♦ **Nature du primaire** en cours mais très encourageant :

Principe de la «lampe de poche»

Etude du profil latéral : pente comme observable de la nature



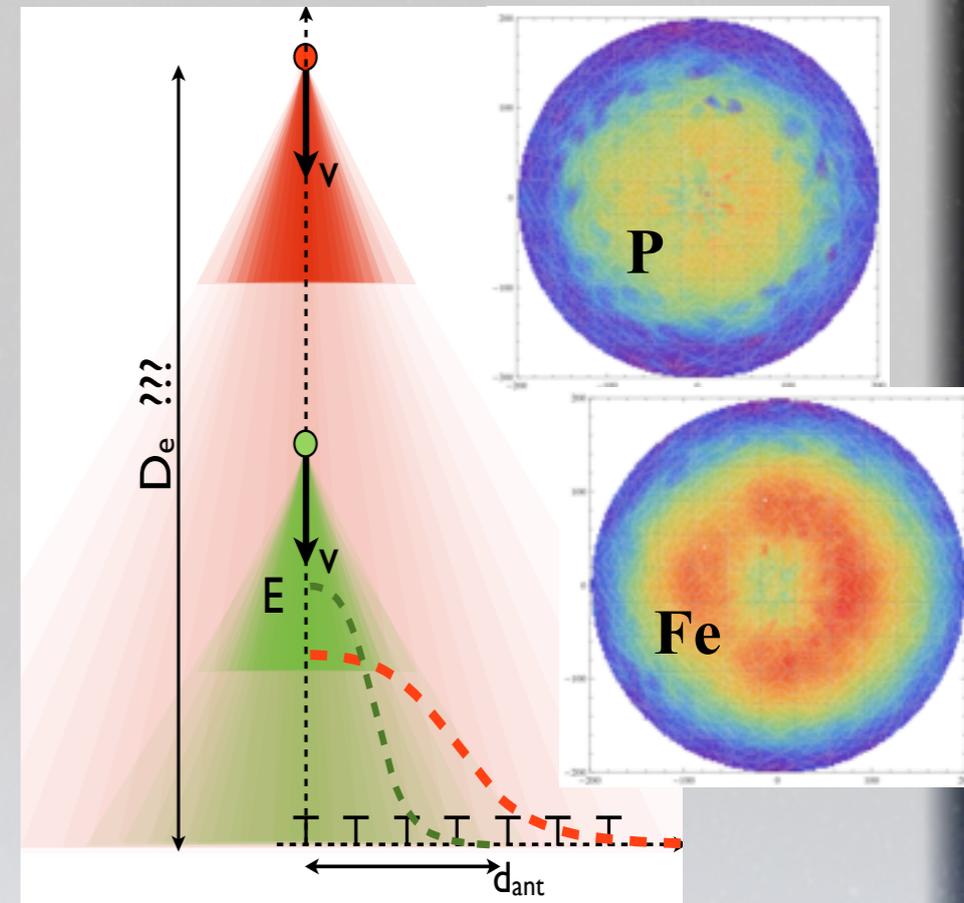
Conclusion

➔ Caractéristiques du primaire avec la radio

- ♦ OK pour la direction d'arrivée (grande précision résolution angulaire de 0.5° , calibration par détection des avions, trajectoires)
- ♦ OK pour l'estimation en énergie (affiner la corrélation, nouveau profil...)
- ♦ **Nature du primaire** en cours mais très encourageant :

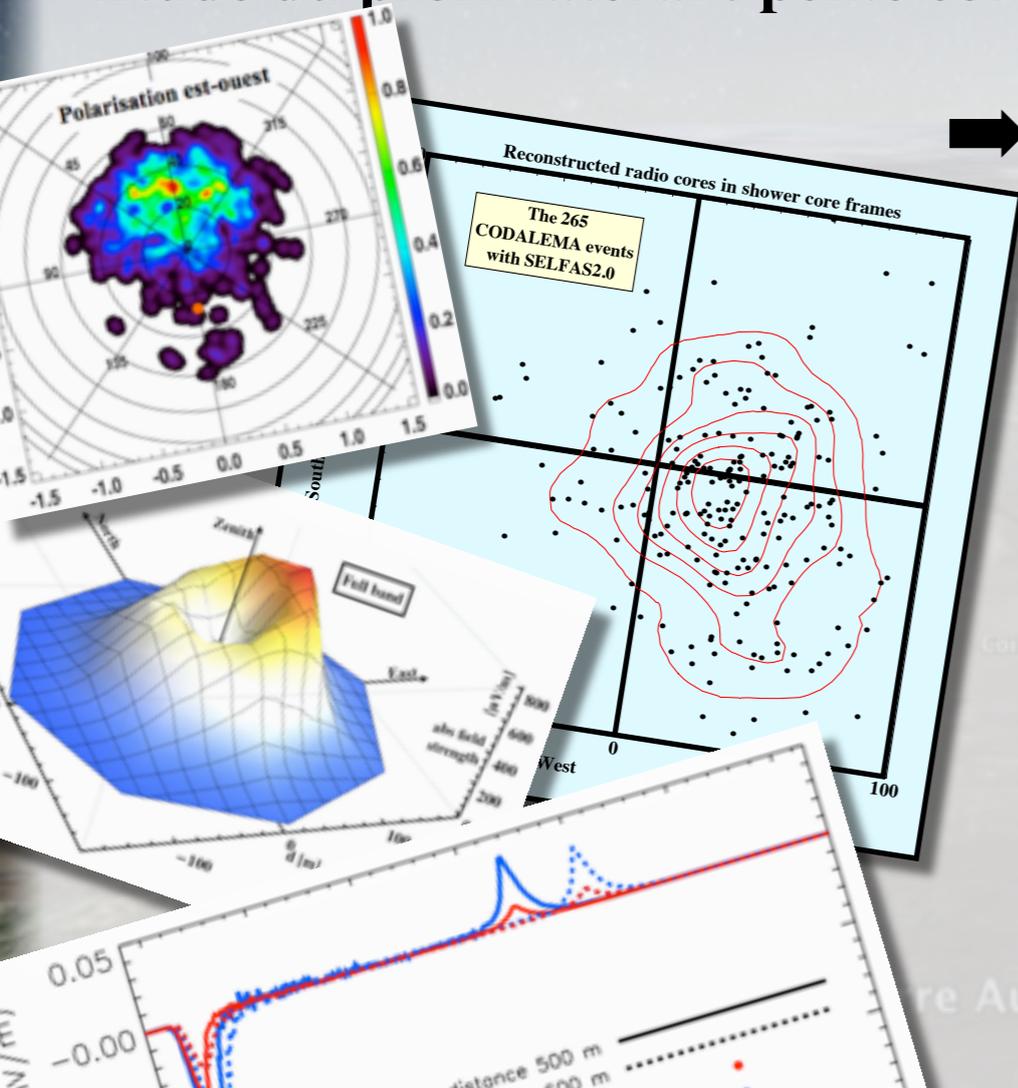
Principe de la «lampe de poche»

Etude du profil latéral : pente comme observable de la nature



➔ Compréhension du phénomène radio

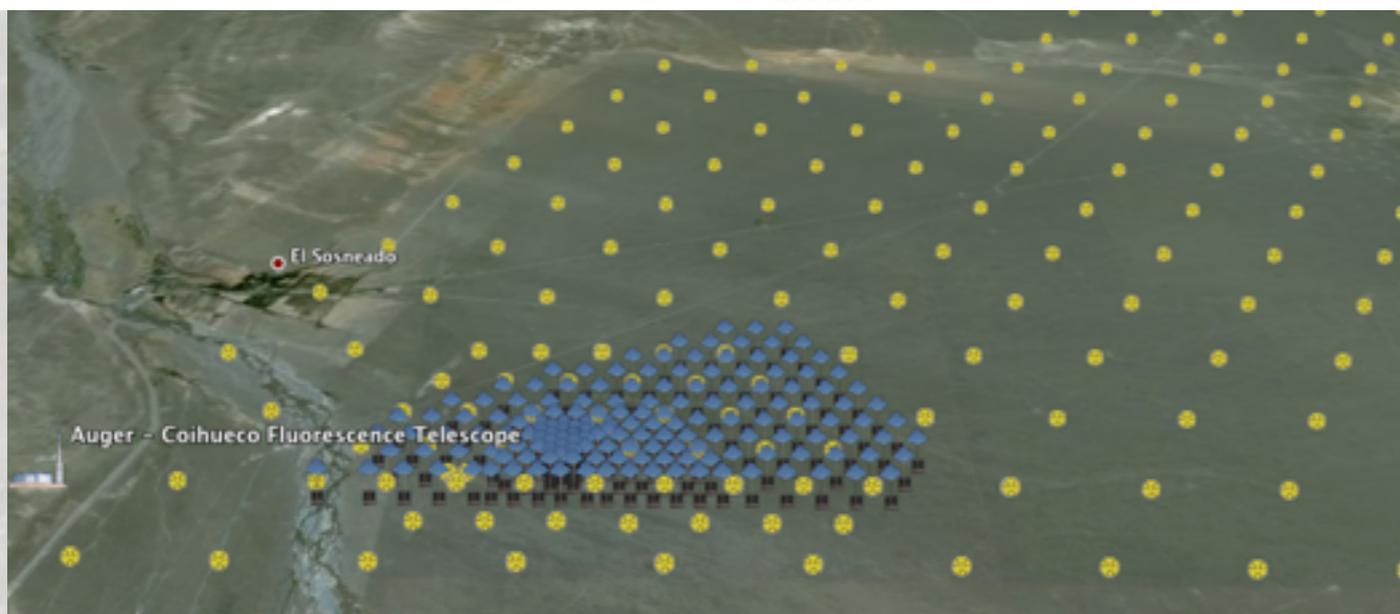
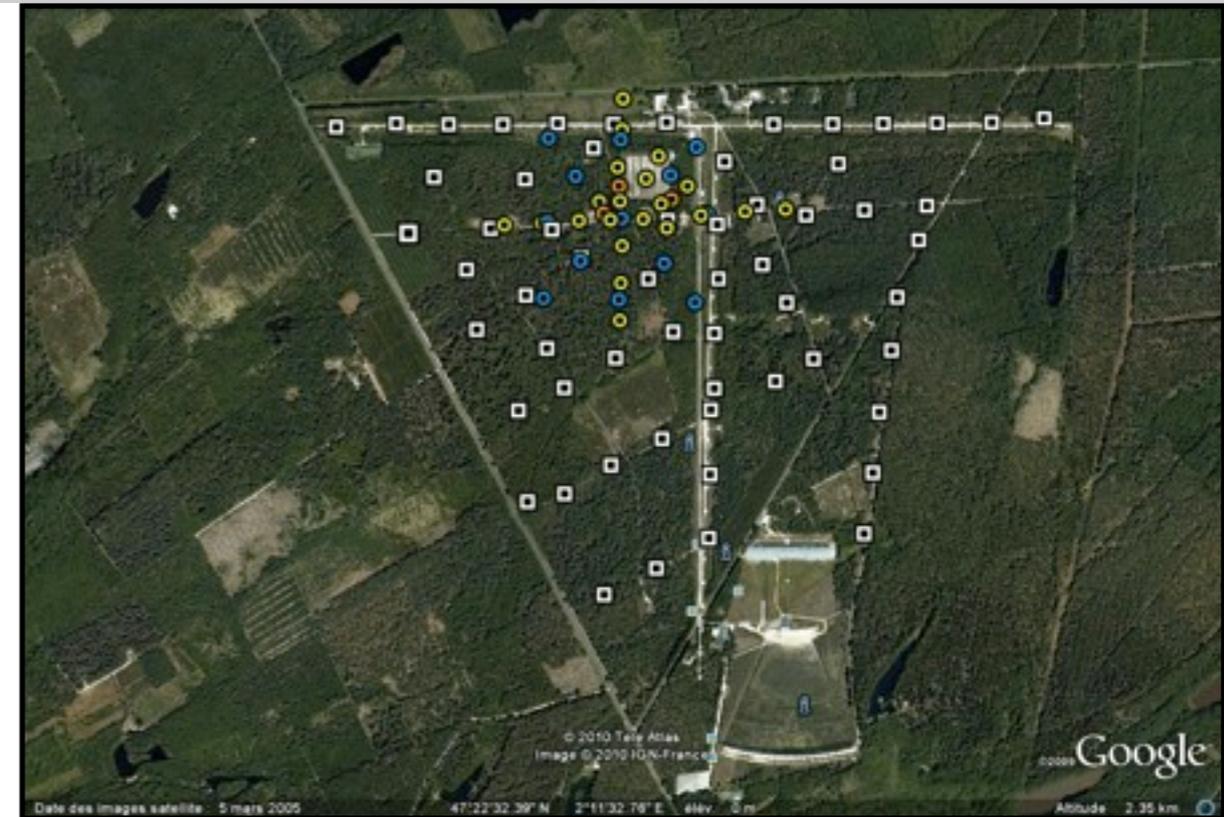
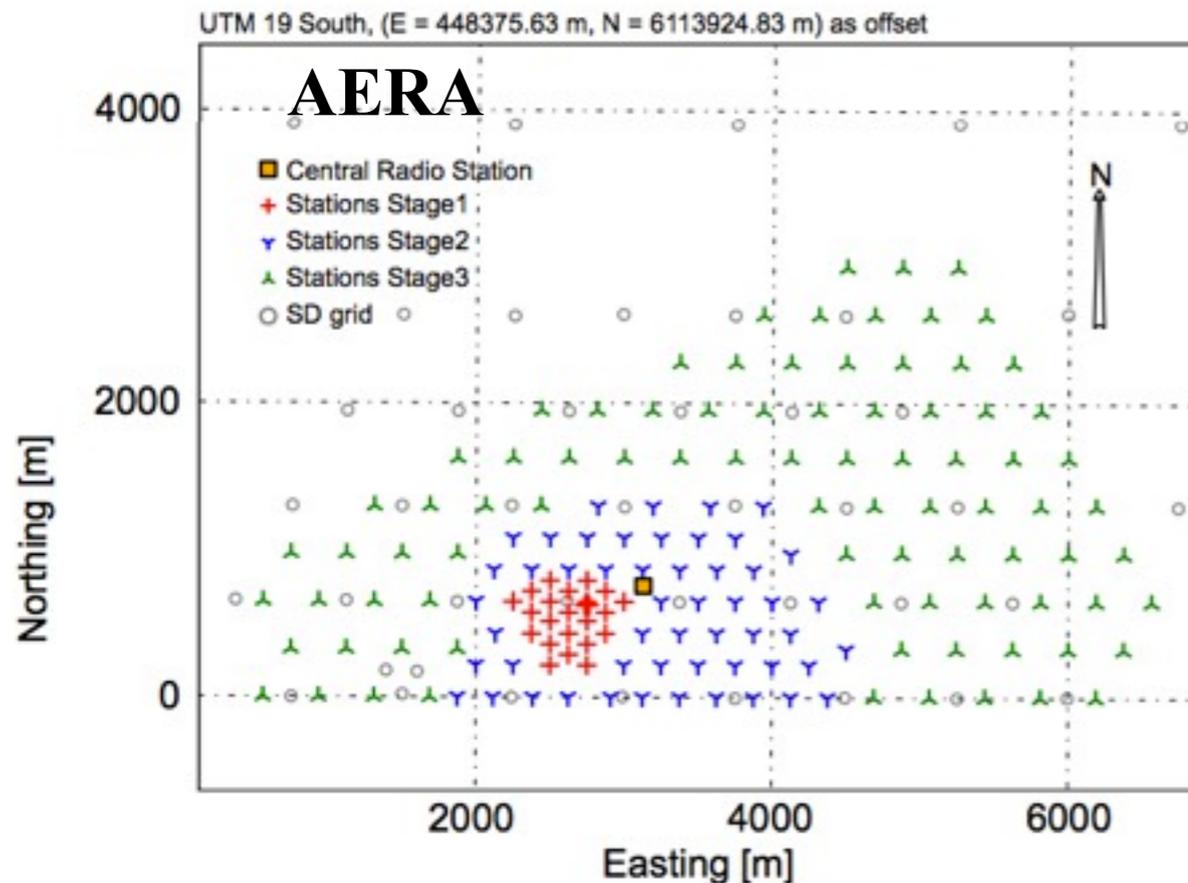
- ♦ Au premier ordre, $E \propto n \wedge B$ en amplitude et en polarisation, dans les deux hémisphères ; reproduit avec simulation
- ♦ Mécanisme de second ordre dû à **l'excès de charge**
Première preuve expérimentale : CODALEMA + SELFAS
Confirmation avec la mesure polarisation : AERA
- ♦ Indice de l'air avec l'effet Cerenkov considéré dans la simu
Explication des profils «plats»?
- ♦ Prédiction signal de mort subite par SELFAS...
Mise en évidence expérimentale?



Perspectives

➔ Expérimentalement

★ Les nouveaux réseaux à grande échelle AERA et CODALEMA-III permettront de mieux caractériser l'émission radio des gerbes. Efficacité **RD** vs **FD** et **SD**, **Sensibilité à la composition???**



➔ Théorie

★ Effort commun d'engagé entre «modélisateurs»

CoREAS (All), SELFAS (Fra), ZHAires (Esp), EVA (NL)

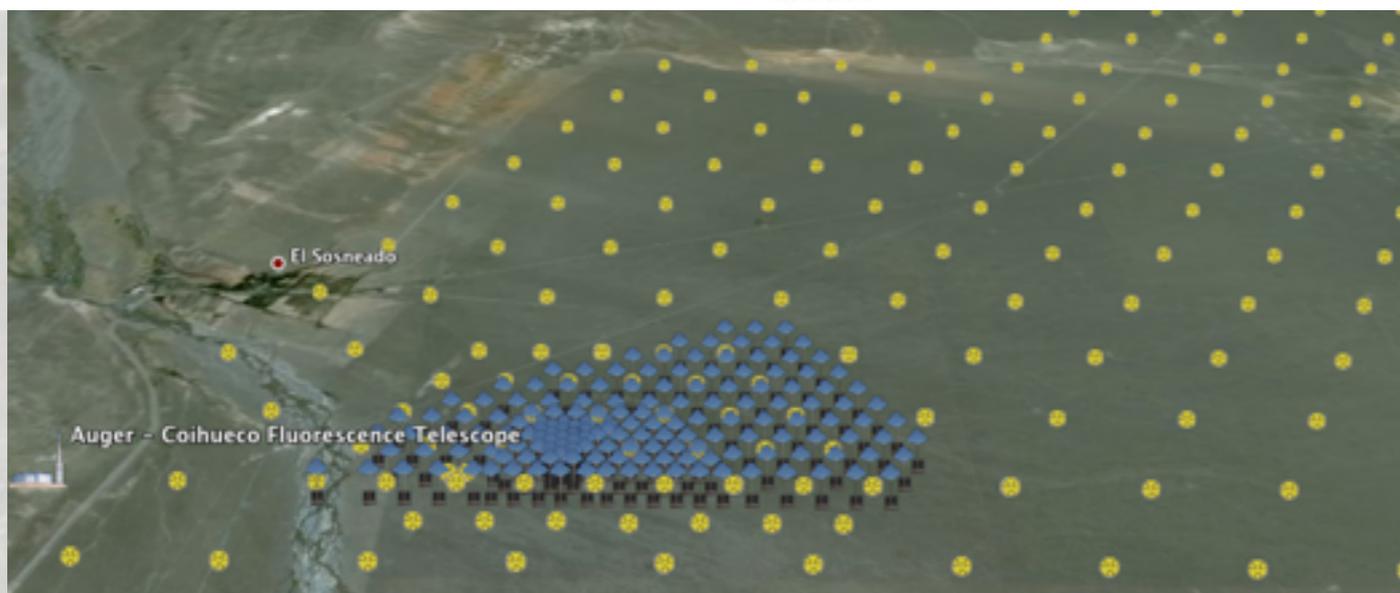
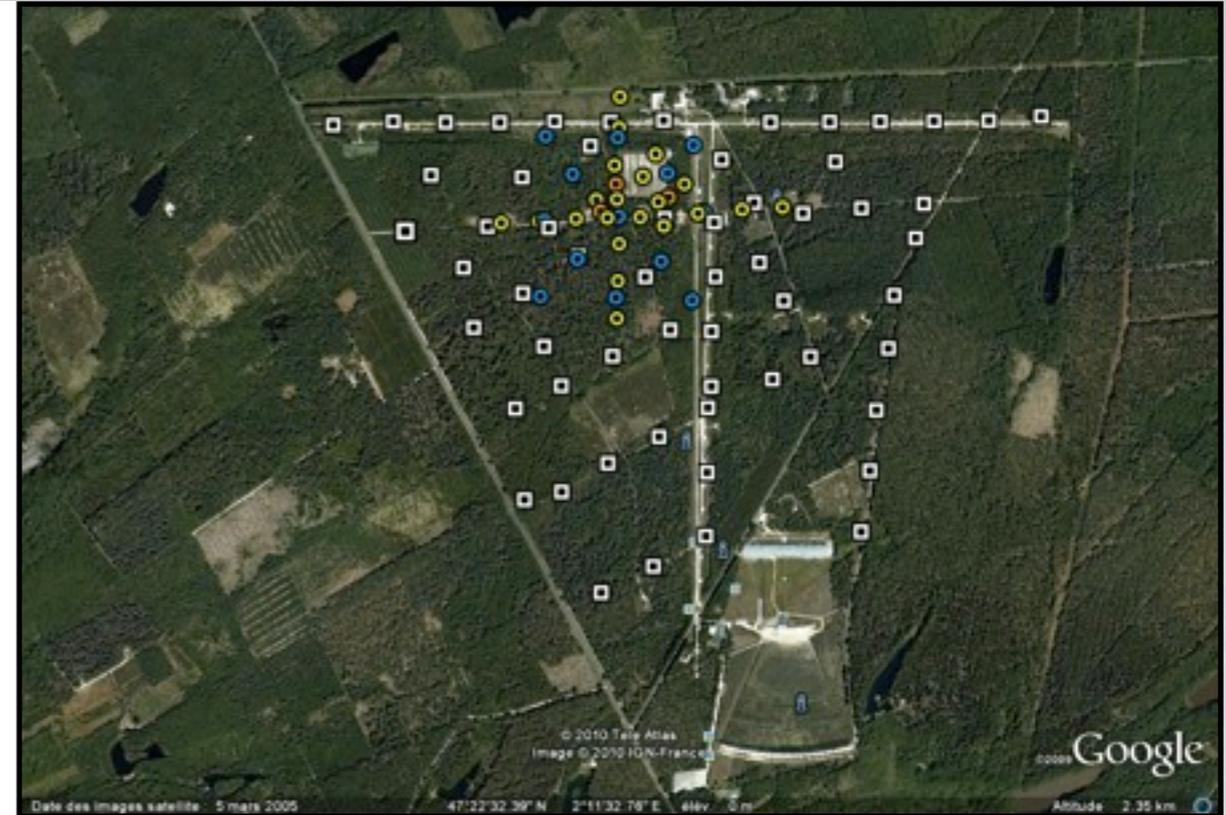
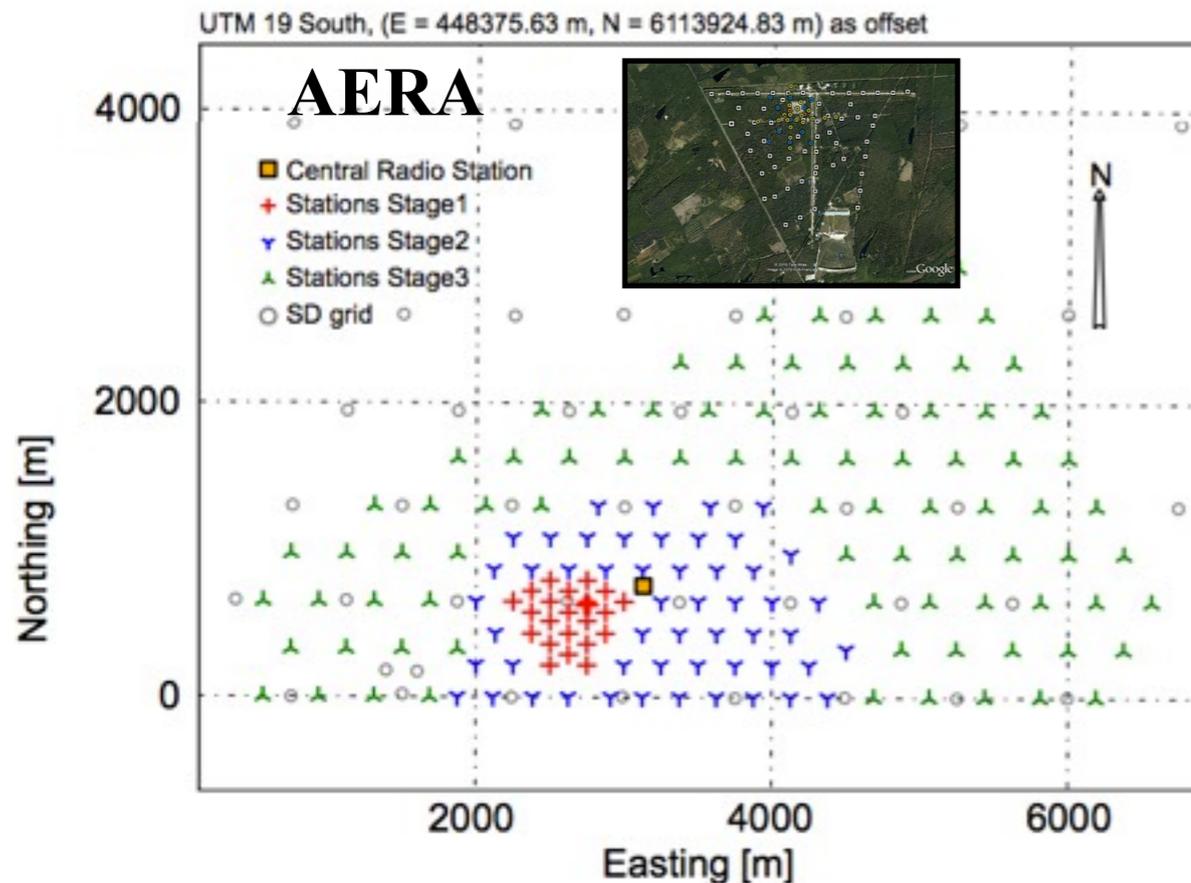
★ Wokshop dédié (Ohio EU, 2012)

★ Papiers communs en cours...

Perspectives

➔ Expérimentalement

★ Les nouveaux réseaux à grande échelle AERA et CODALEMA-III permettront de mieux caractériser l'émission radio des gerbes. Efficacité **RD** vs **FD** et **SD**, **Sensibilité à la composition???**



➔ Théorie

★ Effort commun d'engagé entre «modélisateurs»

CoREAS (All), SELFAS (Fra),
ZHAires (Esp), EVA (NL)

★ Wokshop dédié (Ohio EU, 2012)

★ Papiers communs en cours...