

Stéréoscopie de gerbes γ avec H.E.S.S.: Premières images de vestiges de supernovae au TeV

Marianne Lemoine-Goumard
Laboratoire Leprince-Ringuet - Ecole Polytechnique



Plan de la présentation

1. Introduction à HESS et aux vestiges de supernovae
2. La méthode de reconstruction 3D des gerbes électromagnétiques
3. Une méthode de soustraction du fond adaptée aux sources étendues
4. Résultats obtenus sur les vestiges de supernovae



H.E.S.S. et l'étude des vestiges de supernovae

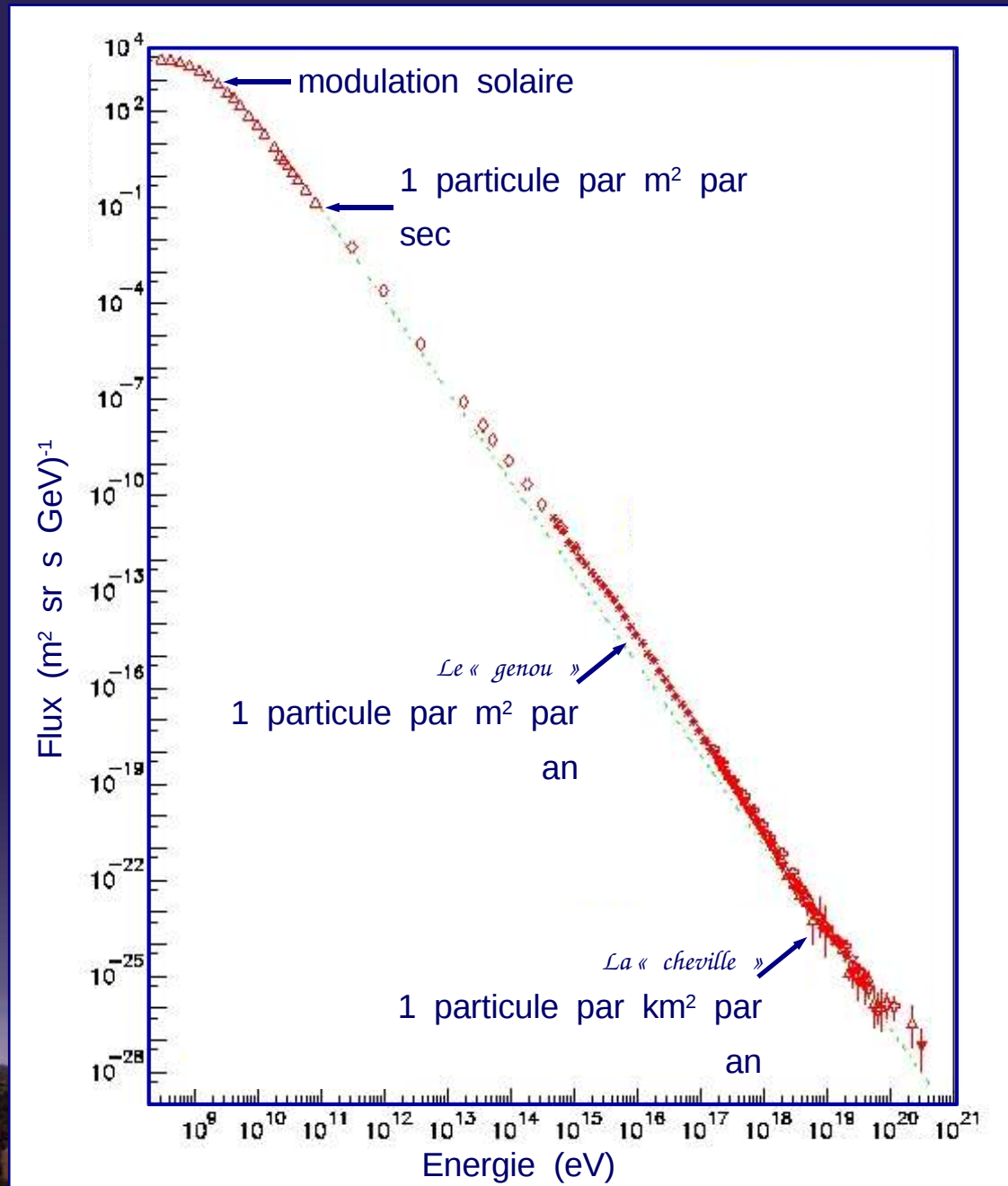


Découverte des rayons cosmiques

V. Hess, 1912



Le rayonnement cosmique



Les sources de rayons cosmiques (RC) ?

RAYONS COSMIQUES CHARGES :

- ORIGINE GALACTIQUE (RC d'énergie $< 10^{15}$ eV)
 - PROPAGATION DANS CHAMP MAGNETIQUE TURBULENT
- **PERTE DE L'INFORMATION SUR LA SOURCE**

GAMMAS :

- LES SOURCES DE RC EMETTENT DES GAMMAS
 - PROPAGATION EN LIGNE DROITE
- **INFORMATION SUR LA SOURCE**

Un Candidat possible :

- VESTIGES DE SUPERNOVAE

Problème non résolu depuis 1912 !

Histoire d'un vestige de supernova

Reste de supernova :

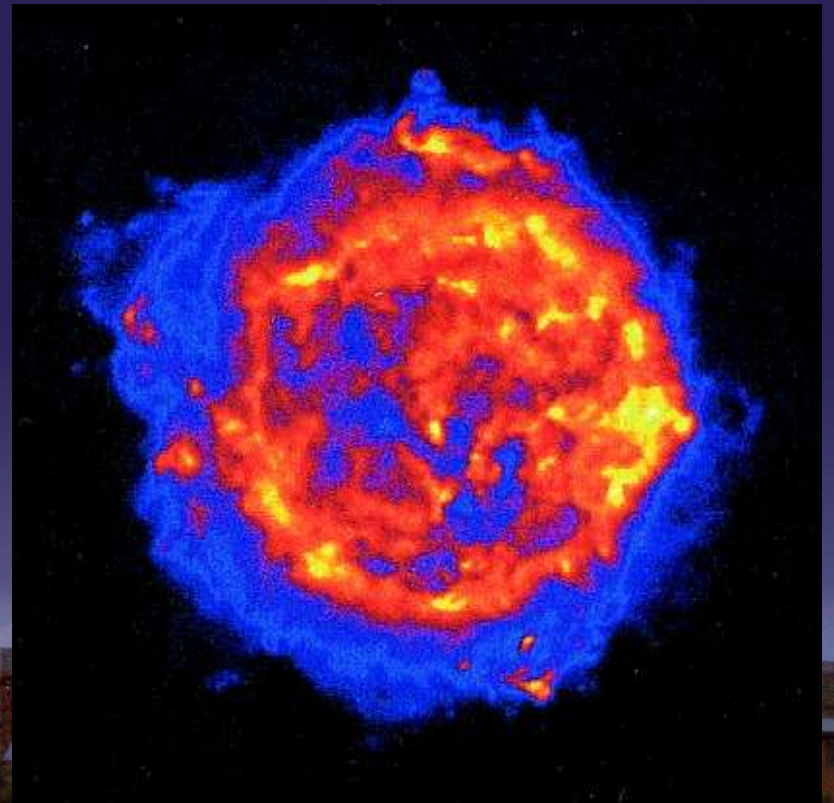
Explosion d'une étoile en fin de vie ou d'un système binaire

Onde de choc → particules accélérées par processus de Fermi

Source probable pour l'origine des rayons cosmiques $E < 10^{15}$ eV

Image radio de Cas A

- Emission forte associée aux ejecta
- Plateau plus faiblement émissif dû à l'onde de choc

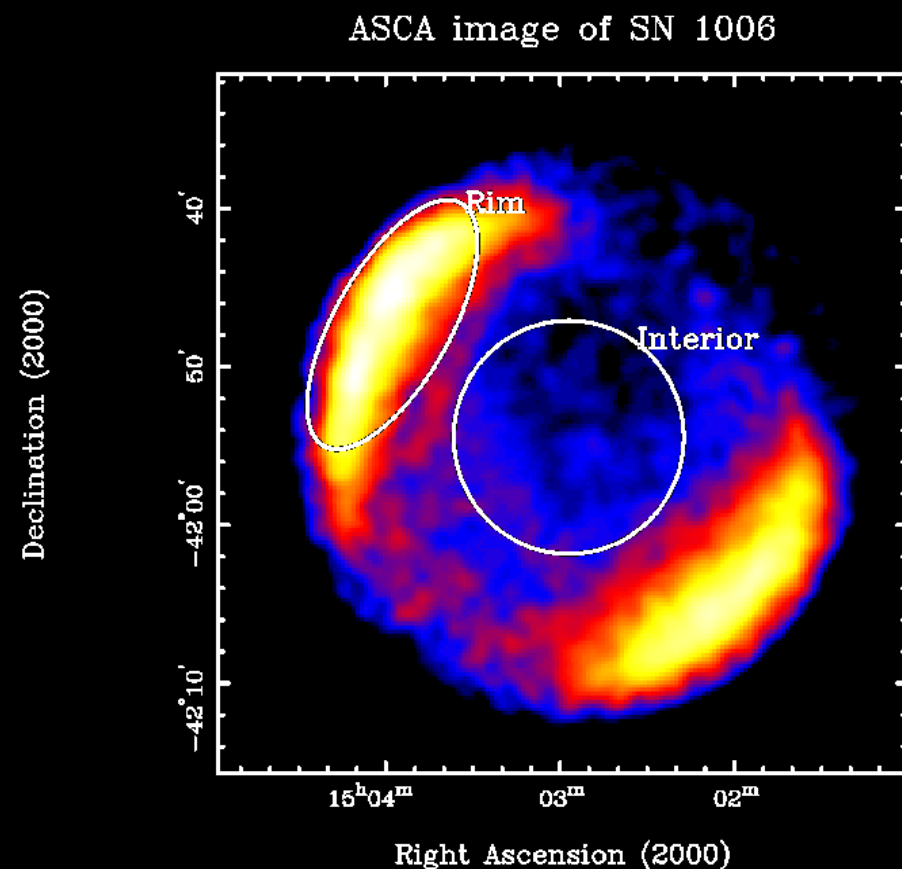
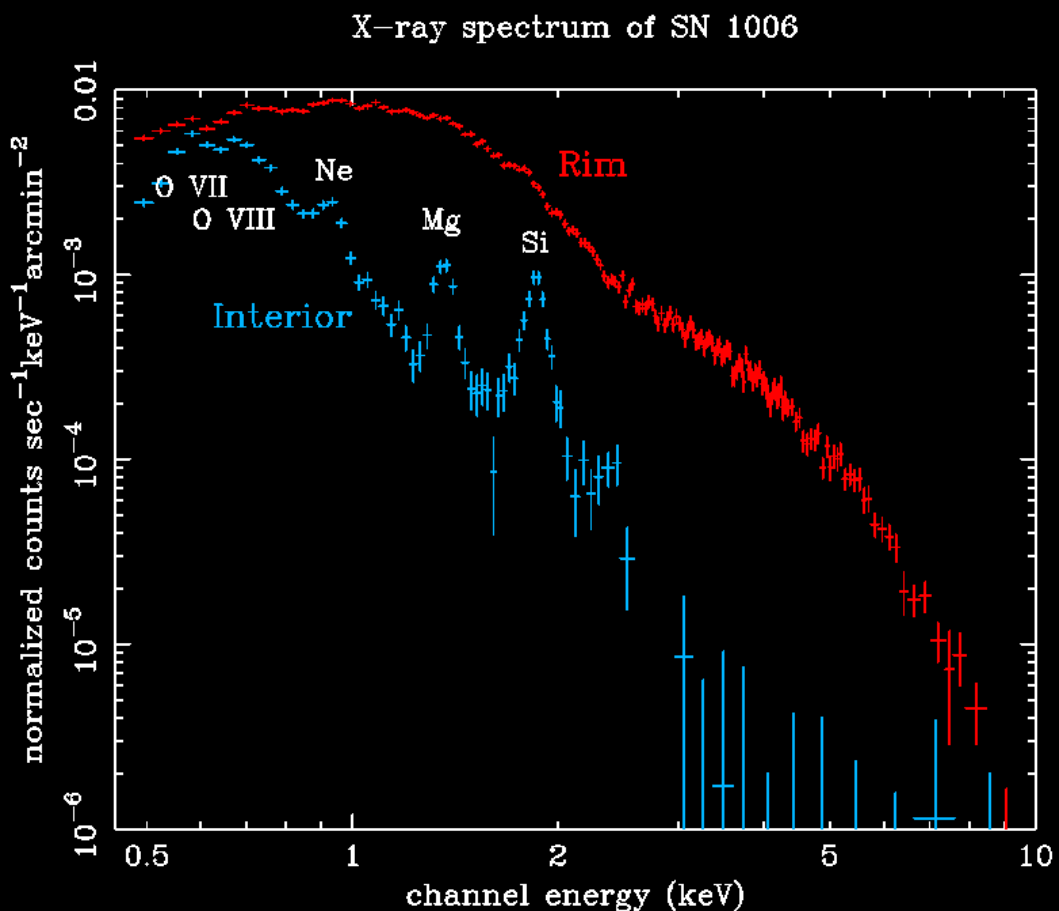


Thermique / Non thermique

SN 1006

(Koyama et al. 1995,
Nature 378, 255)

- Emission thermique à l'intérieur (particulièrement des ejecta)
- Emission non-thermique en périphérie (synchrotron)



Processus radiatifs non thermiques

Pour le domaine de la radio aux X:

Emission synchrotron d'électrons accélérés au choc

2 composantes possibles dans le spectre γ des SNRs :

- Effet Compton Inverse (processus leptonique)
- Désintégration du π^0 (processus hadronique)



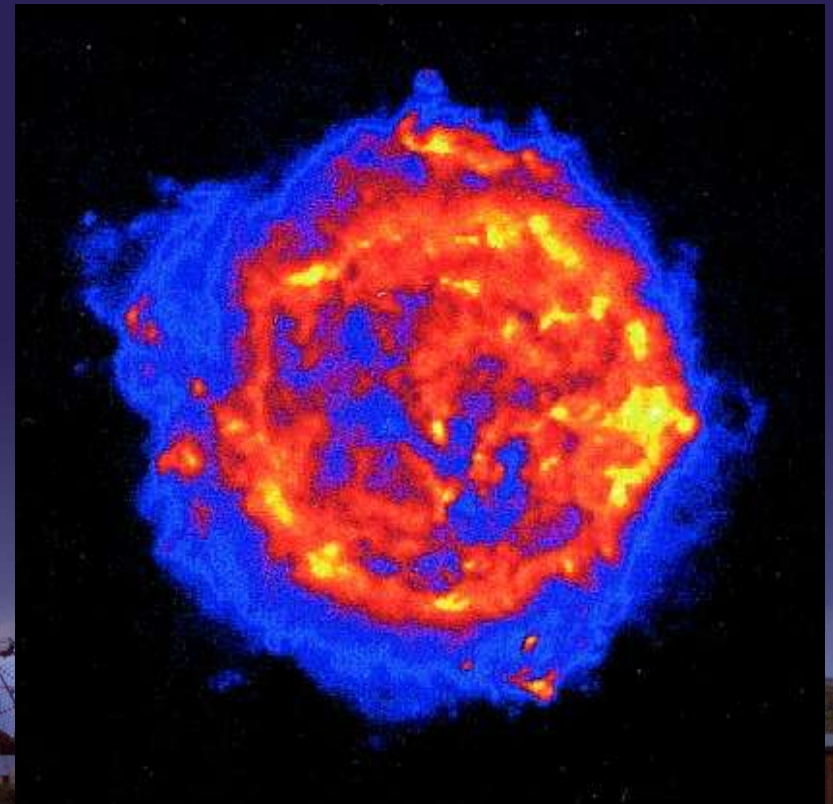
Premières preuves observationnelles (I)

1. En radio :

Dès 1950, la découverte d'émission radio dans certains restes (Cas A, Tycho) prouve l'existence d'une population d'électrons accélérés au GeV.

Image radio de Cas A

$$\nu_{\text{sync}} = 1.65 \times 10^7 B_{\mu\text{G}} E_{\text{GeV}}^2$$



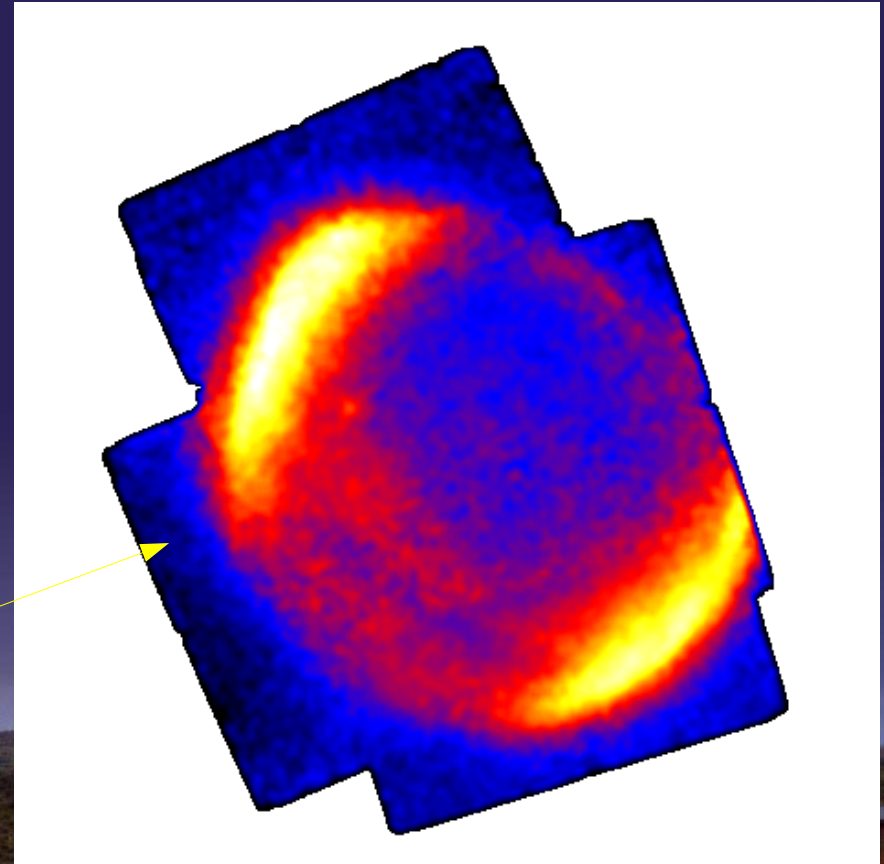
Premières preuves observationnelles (II)

2. En rayons X :

En 1995, ASCA met en évidence que l'émission de périphérie de SN1006 est dominée par le rayonnement des e- accélérés à des énergies de l'ordre de 100 TeV. (Koyama et al.)

ASCA GIS : 0.8-10 keV

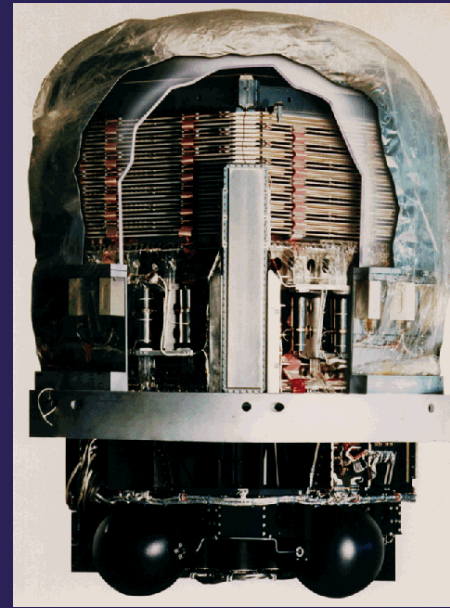
SN1006 vue par ASCA



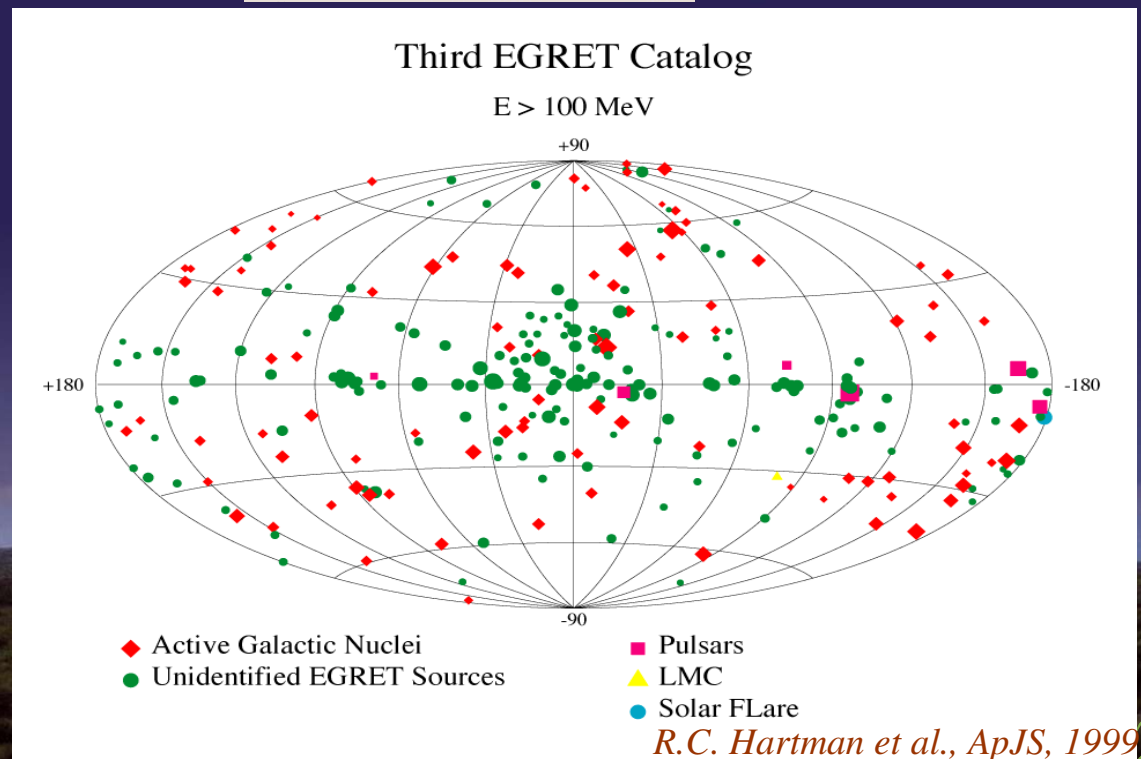
Essor du domaine γ

CGRO/EGRET :

- Avril 1991 – Juin 2000
- 30 MeV – 30 GeV



271 sources détectées



Les restes de supernovae : des sources difficilement détectables par EGRET

1. Les surfaces de collection en satellite gamma sont au plus égales à la surface du détecteur
2. La résolution angulaire des satellites tels que EGRET est souvent médiocre (6° à 100° MeV) => identification du signal gamma avec une contrepartie radio ou optique plus difficile

=> En attendant GLAST, les détecteurs Tcherenkov sont les seuls instruments a pouvoir relever le défi pour le moment



Les détecteurs Tcherenkov

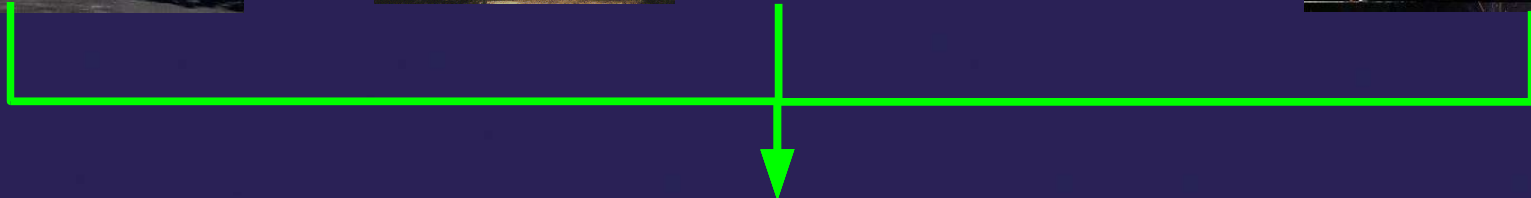
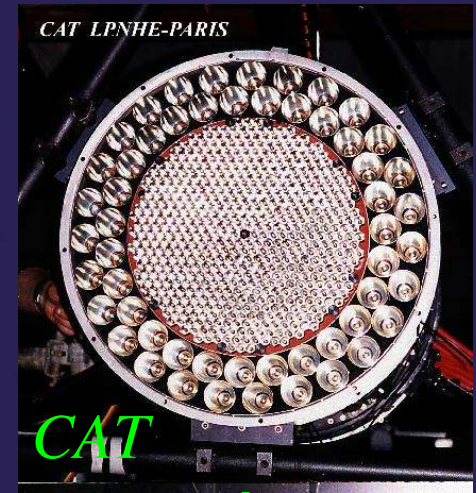
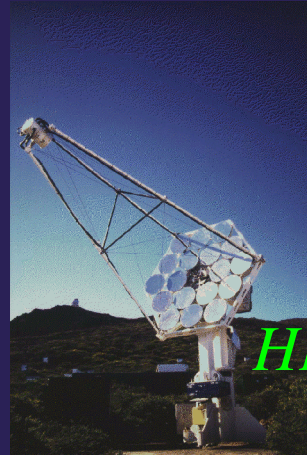
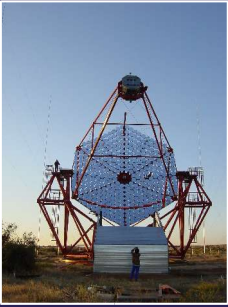
Surface efficace: quelques hectares (surface de la tâche de lumière Tcherenkov au sol)

Résolution angulaire: $< 0.1^\circ$

Unique problème : le bruit de fond produit par les gerbes hadroniques



H.E.S.S.

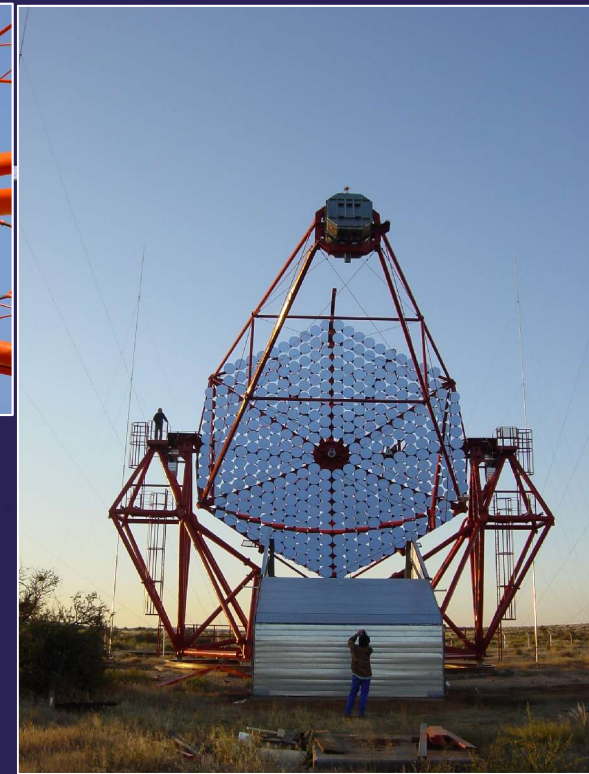


H.E.S.S.



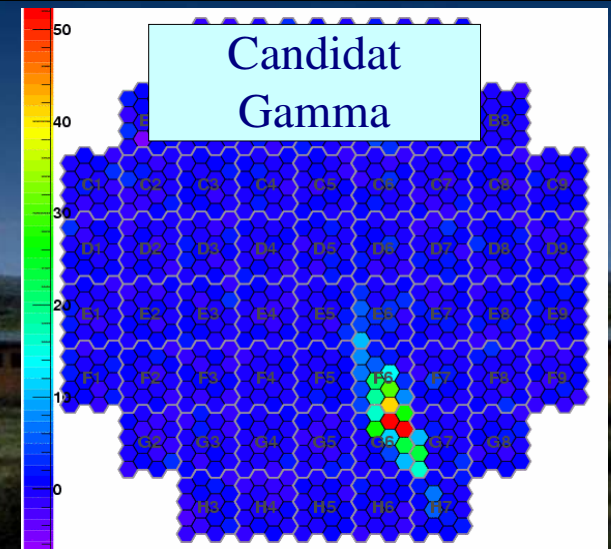
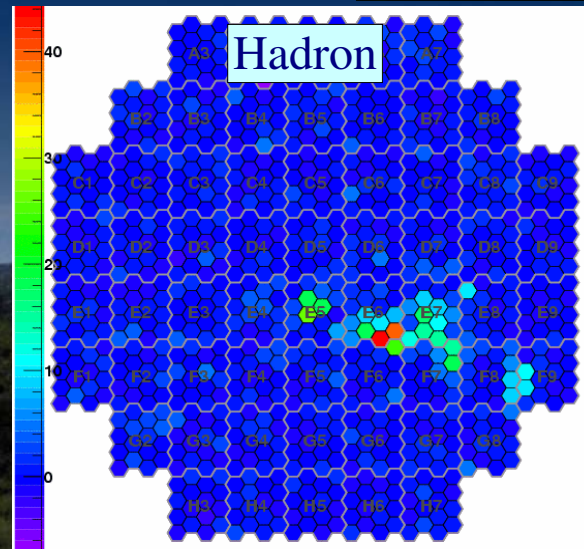
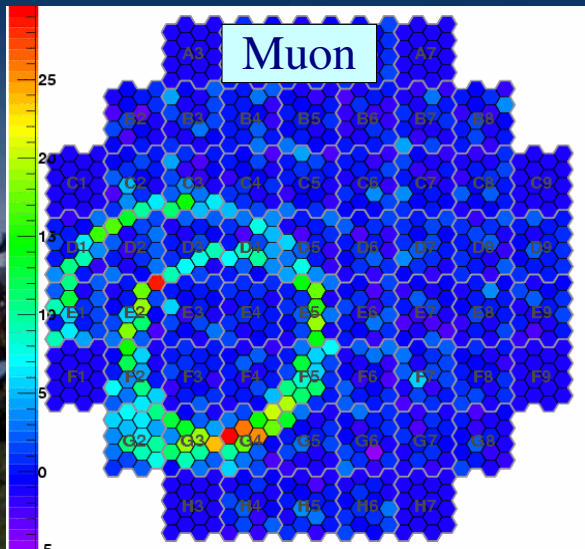
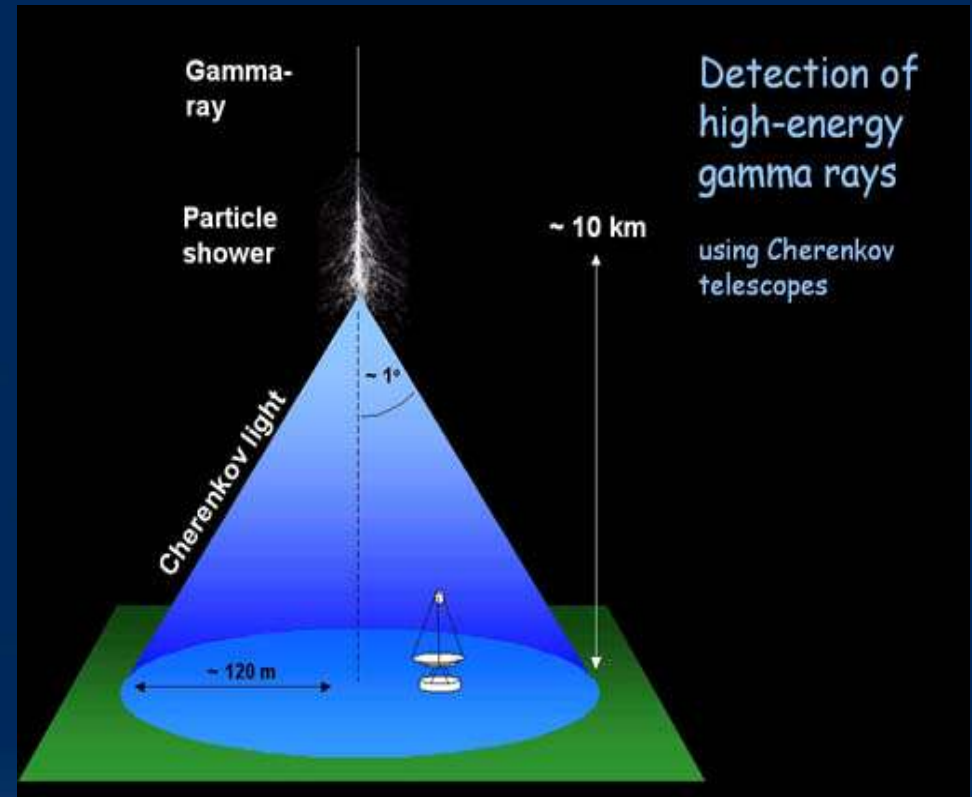
Les Télescopes

- Réflecteur de 12 m de diamètre
- Monture Alt-Azimutale
- 15 m de longueur focale
- Précision de pointé: 20"
- Caméra de 960 pixels (PMTs)
- 5° de champ de vue

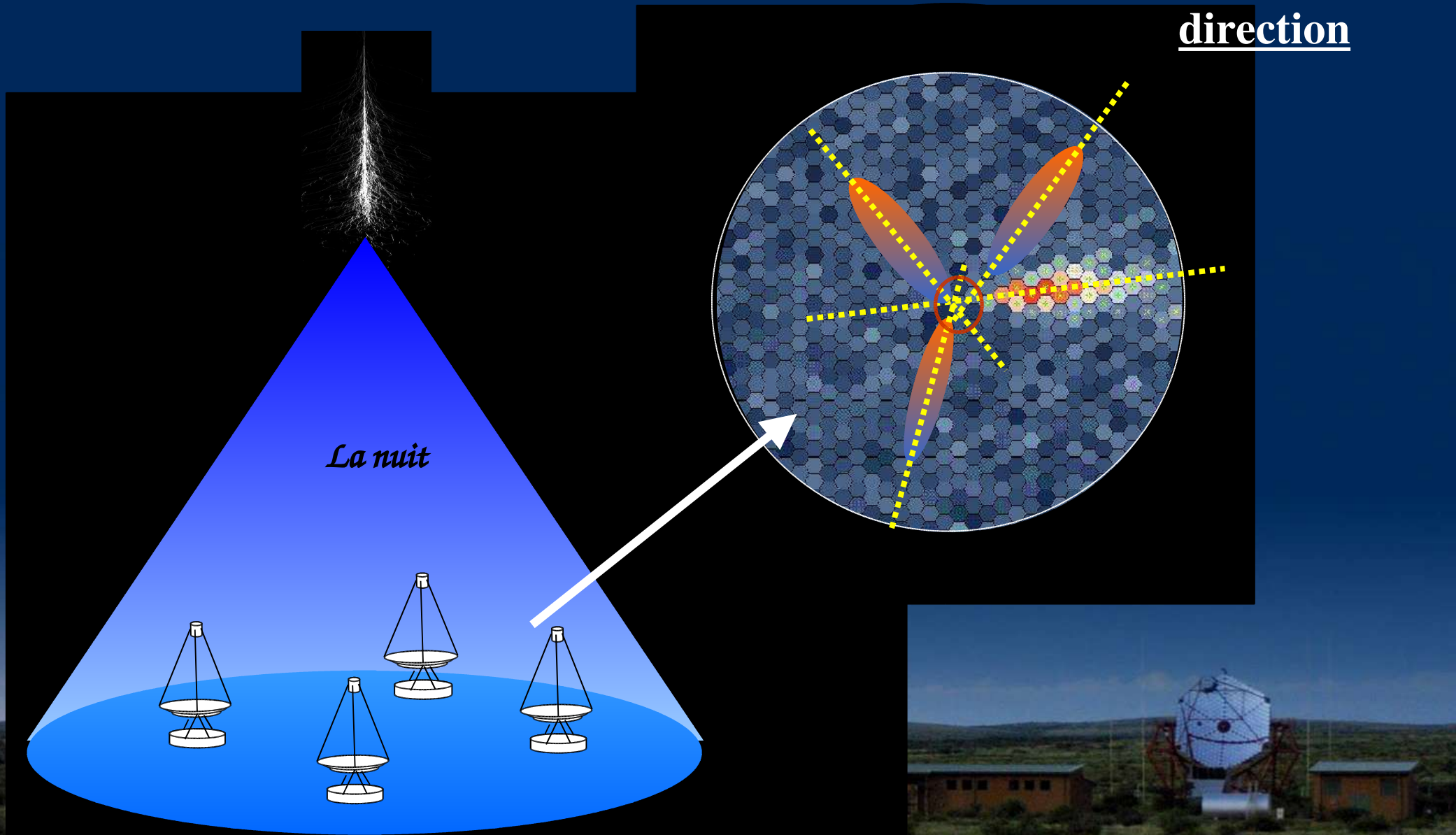


Principe de l'imagerie Tcherenkov

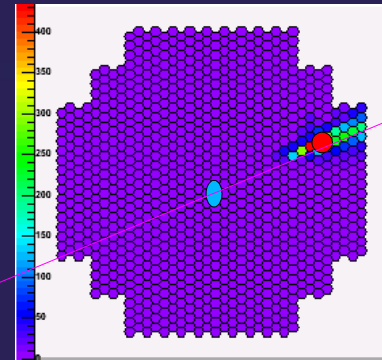
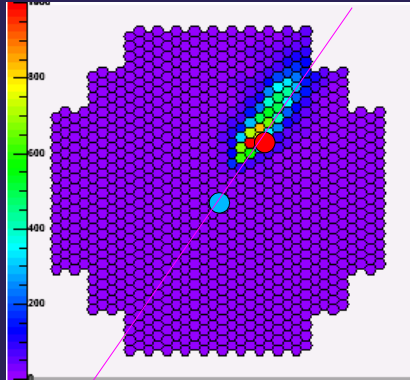
- La gerbe électromagnétique se développe dans l'atmosphère et émet un rayonnement Tcherenkov
- Image de gerbe obtenue dans des caméras à haute définition
- Analyse de la morphologie de l'image



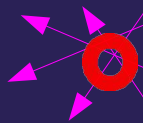
Principe de la stéréoscopie



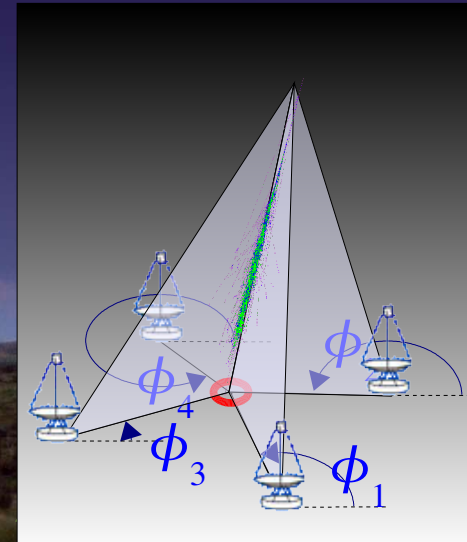
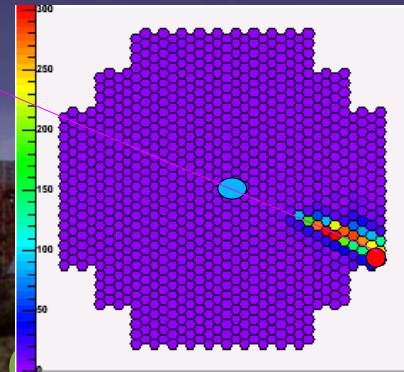
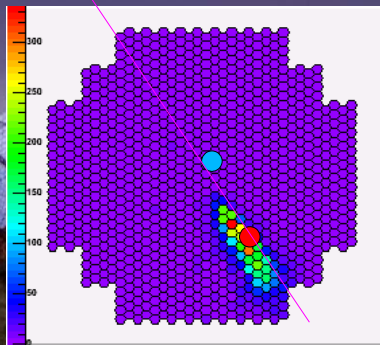
Stéréoscopie : reconstruction du pied de gerbe



- Position de la source
- Centre de gravité de l'image

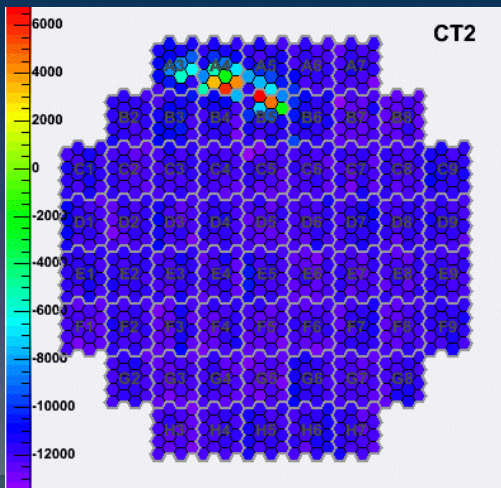


Traces sur le sol



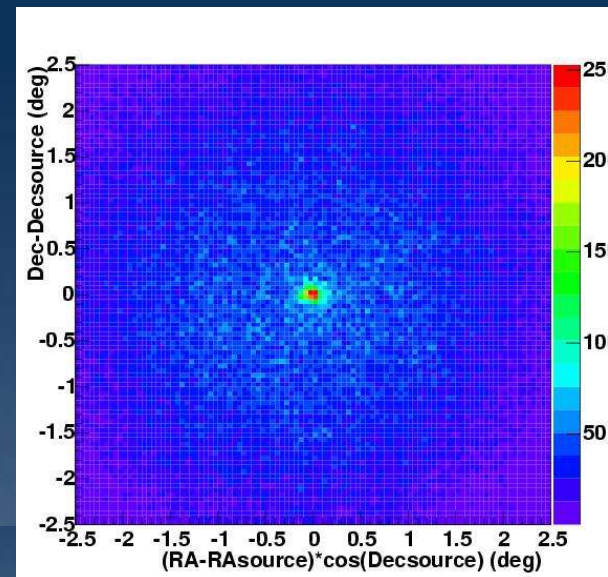
- Les objectifs de H.E.S.S. :
- Sources ponctuelles
 - **Morphologie des sources étendues**
 - **Scan du plan galactique**

Images de gerbes



Reconstruction et
identification des
événements

Images astrophysiques



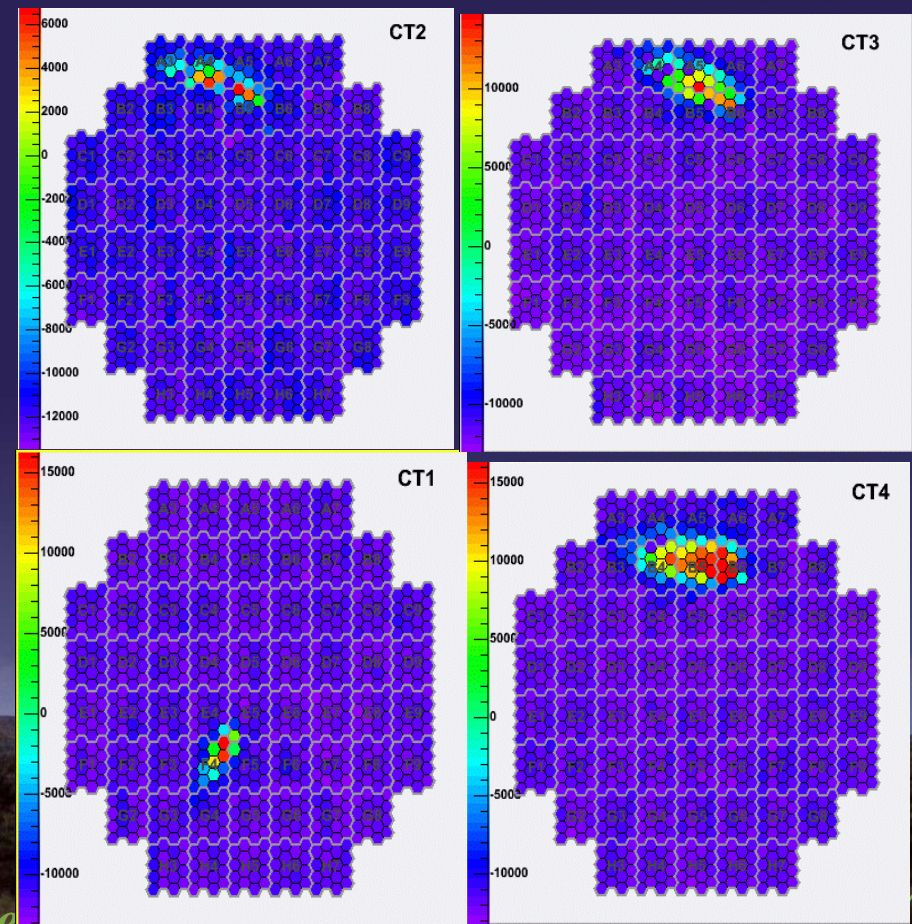
Le Modèle de reconstruction 3D



Philosophie de la reconstruction 3D

- **Objectifs** : utiliser le maximum d'informations =
Stéréoscopie + distributions de lumière corrélées sur
chaque vue

Information directe de chaque pixel
+
Modèle 3D de gerbe électromagnétique

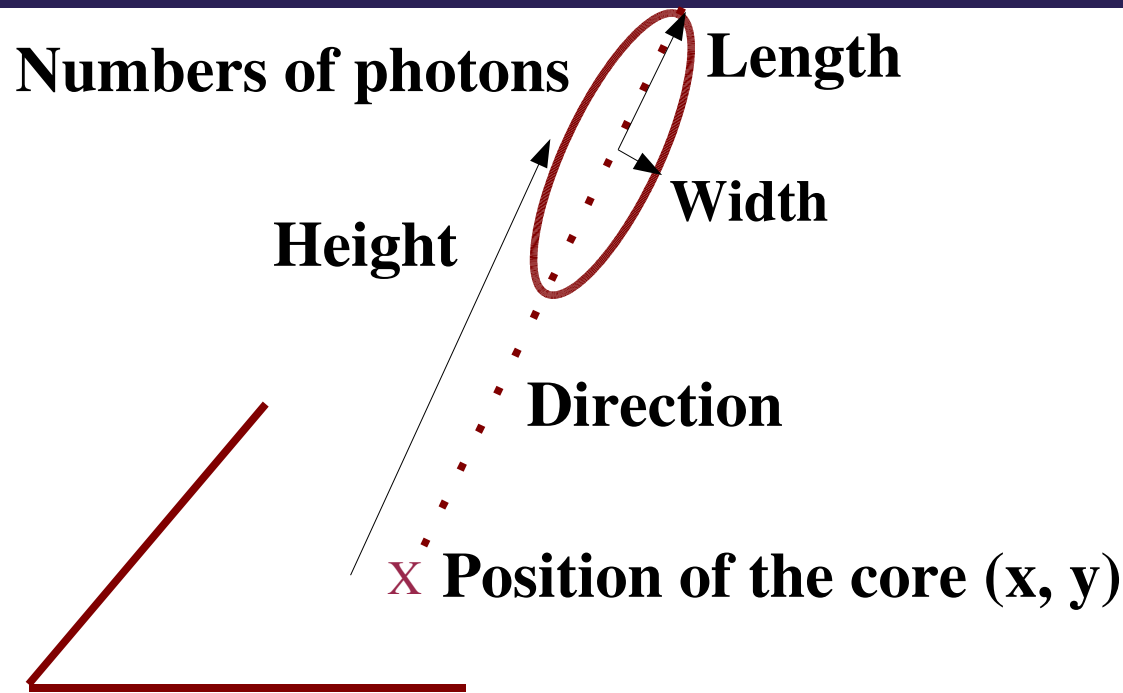


Hypothèses simplificatrices

- **Origines des photons Tcherenkov** : l'origine des photons Tcherenkov est distribuée selon une gaussienne tri-dimensionnelle de révolution par rapport à l'axe de la gerbe.
- **Distribution angulaire des photons Tcherenkov** : la distribution angulaire des photons Tcherenkov par rapport à l'axe de la gerbe est supposée indépendante de la position du point d'émission et de l'énergie de gamma incident.



Le Modèle 3D : un modèle de reconstruction de gerbes électromagnétiques



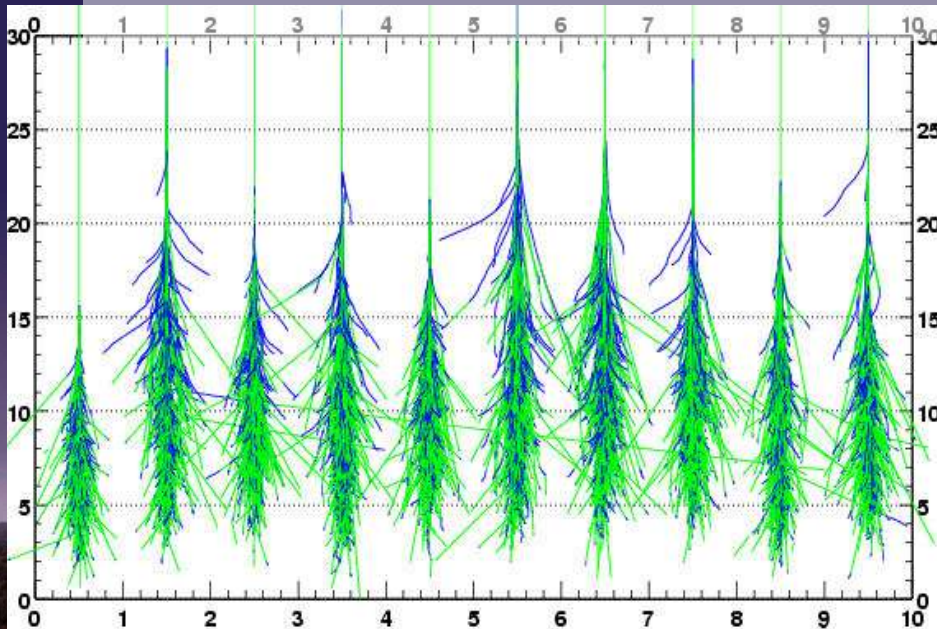
- **8 paramètres à ajuster** : Direction de la gerbe, position du pied de gerbe, Hauteur du maximum de gerbe, Nombre de photons, Longueur-3D et largeur-3D

Le bruit de fond hadronique

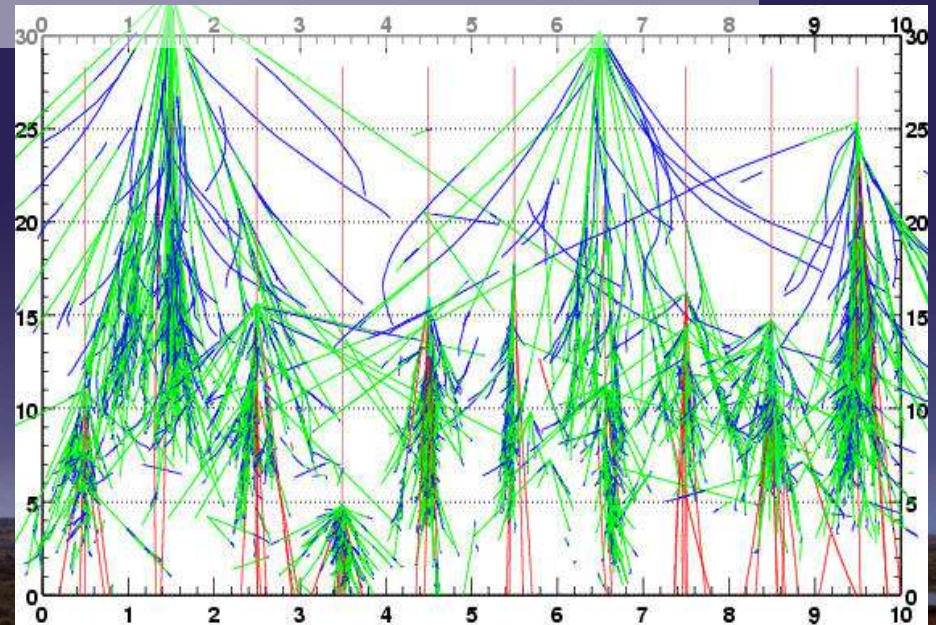
Les gerbes hadroniques se développent différemment des gerbes électromagnétiques :

- Moments transverses plus importants
- Peu ou pas de symétrie de rotation

Gammas



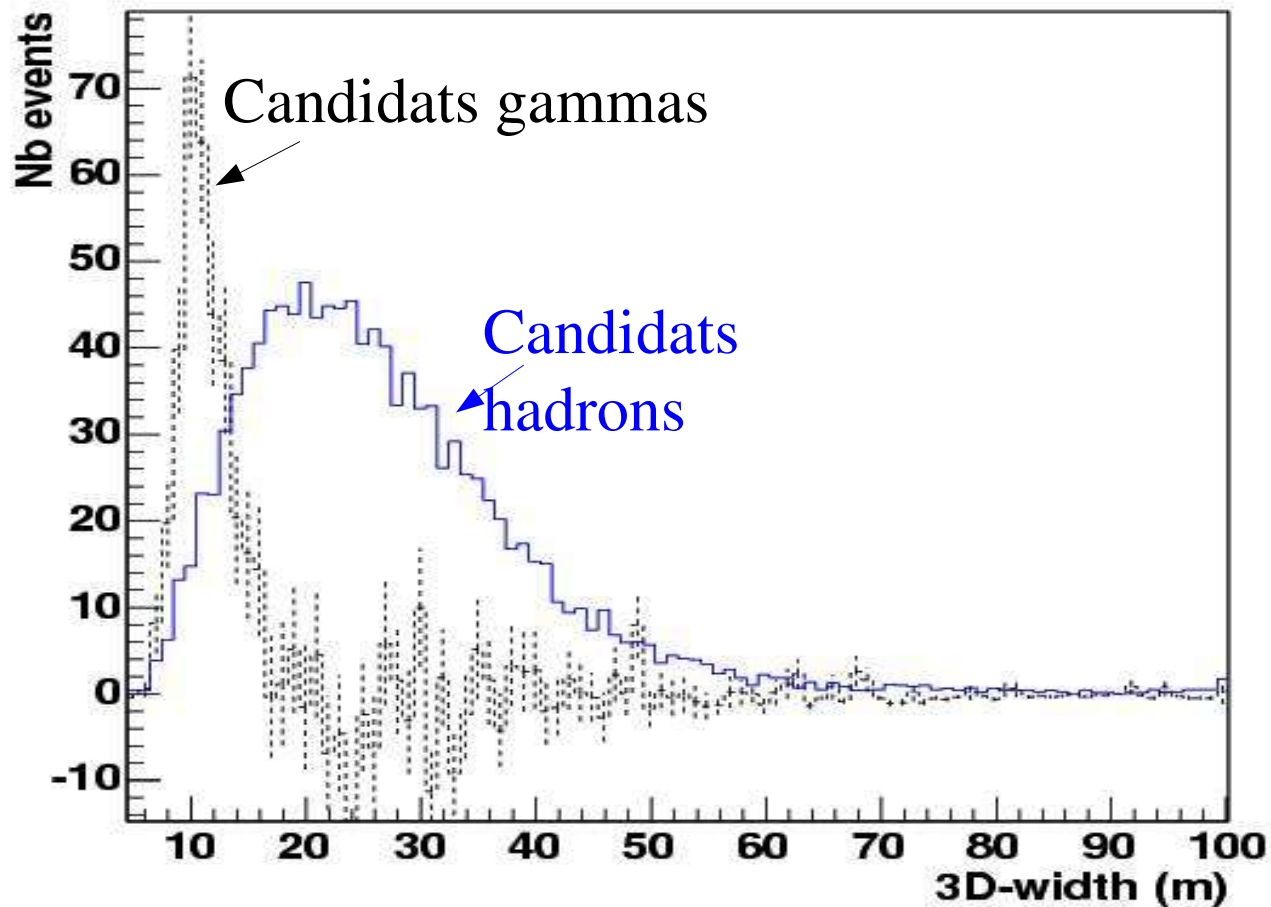
Hadrons



La largeur-3D : un paramètre discriminant

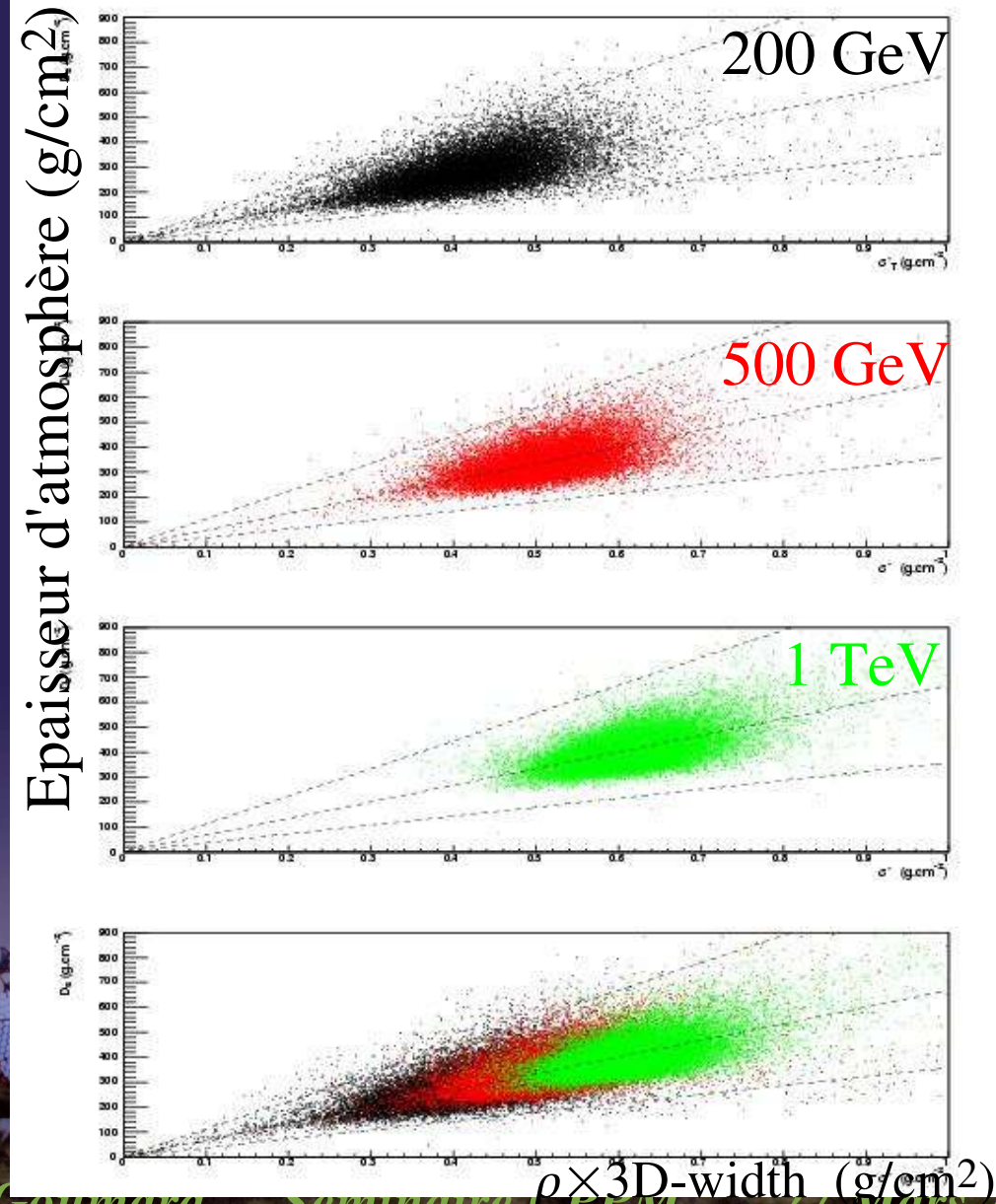
Largeur-3D plus petite pour des gammas que pour des hadrons

Données réelles de HESS sur une source ponctuelle



Corrélation entre l'épaisseur d'atmosphère traversée et la largeur de gerbe

Simulations de γ



La largeur-3D réduite (I)

La longueur de radiation est l'échelle de longueur gouvernant le développement des gerbes électromagnétiques latéralement et longitudinalement

$$\Rightarrow \rho^* w / \tau$$

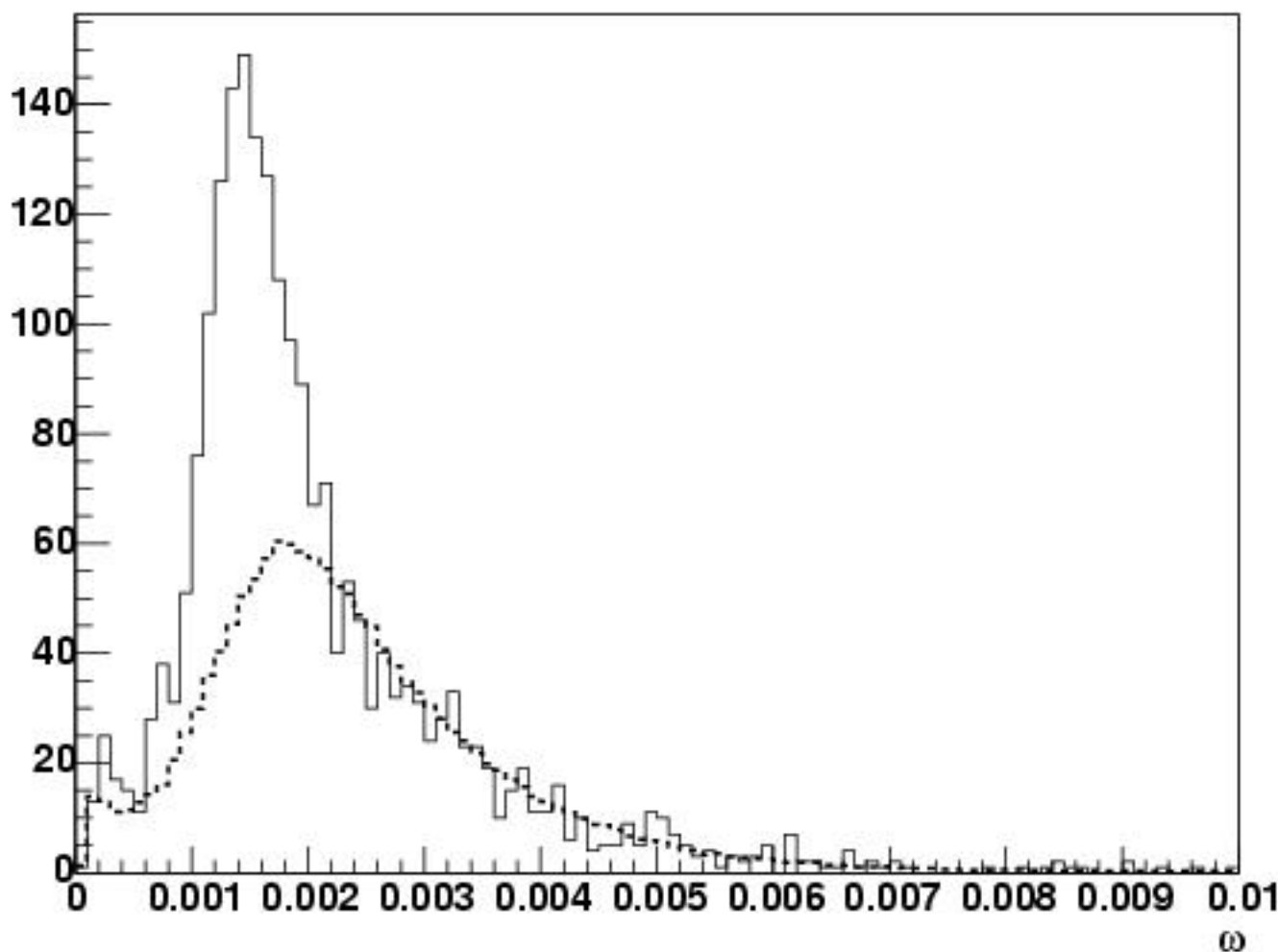
avec ρ la densité au maximum de gerbe et τ la profondeur d'atmosphère au maximum de gerbe

Est une quantité qui nous permet de nous affranchir de l'inhomogénéité atmosphérique $\Rightarrow$ calorimètre parfait si on avait aucune erreur de reconstruction



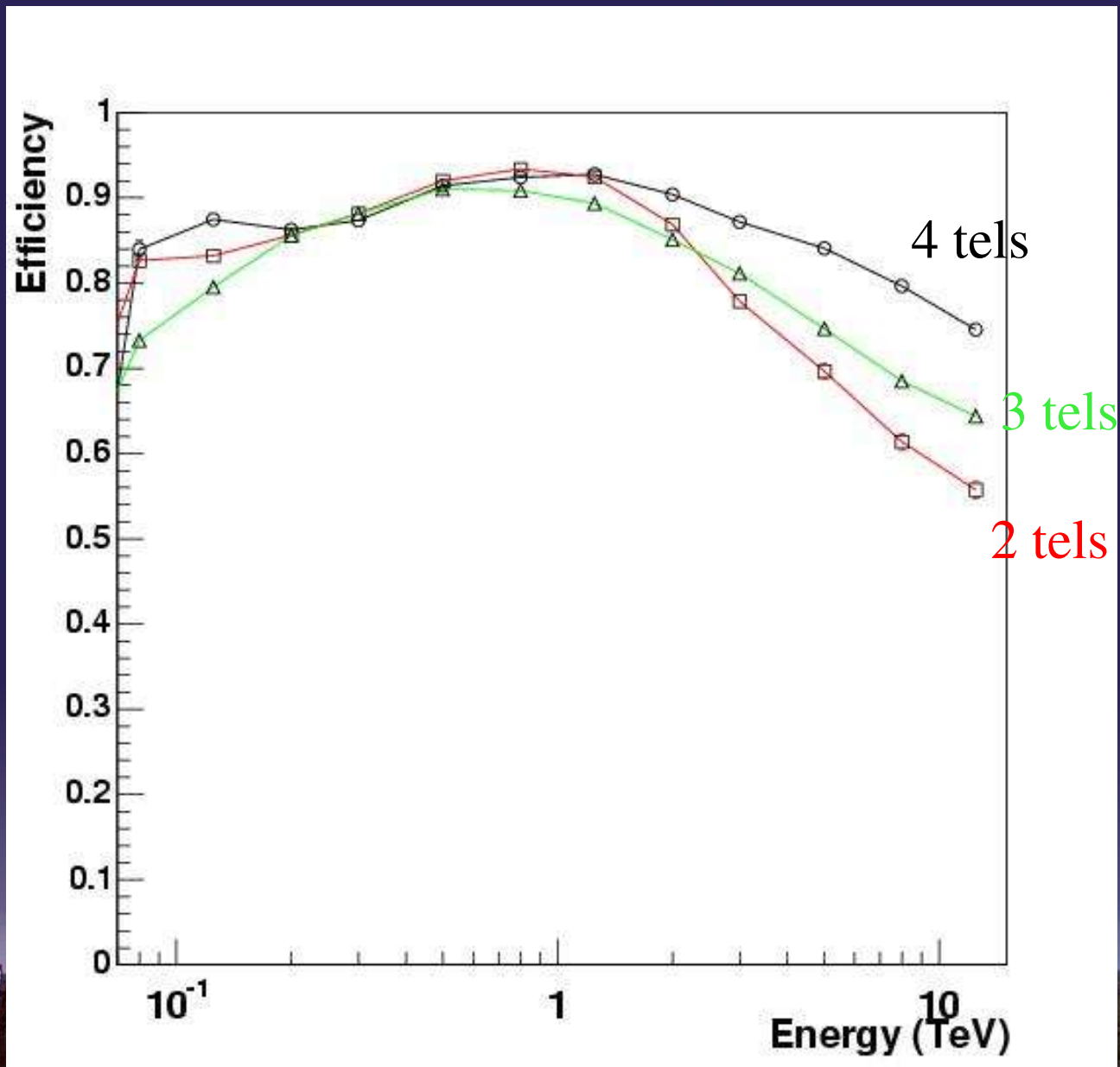
La largeur-3D réduite (II)

Données Crabe



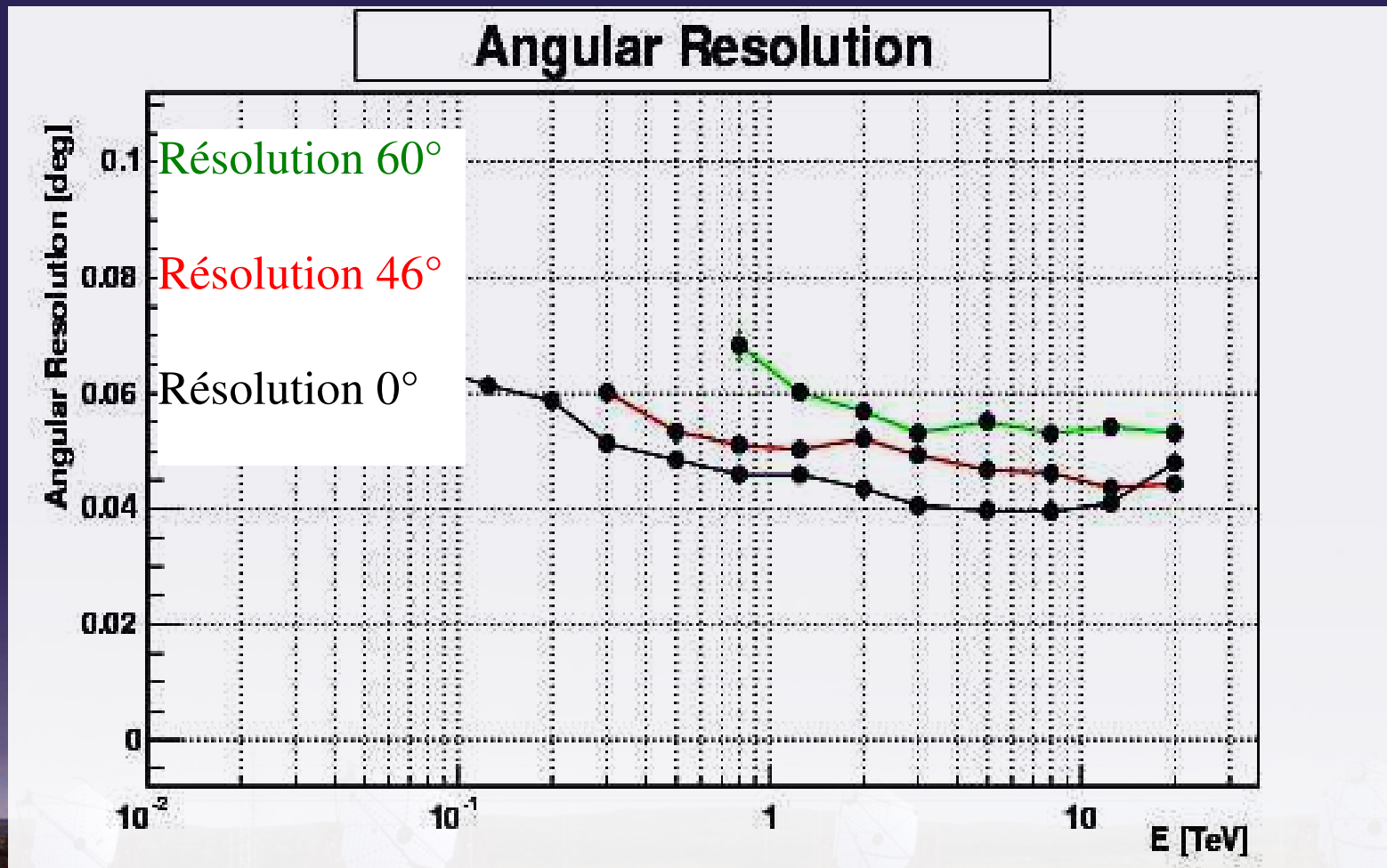
=>Une seule coupure indépendante de l'angle zénithal et de l'énergie

Effacité γ

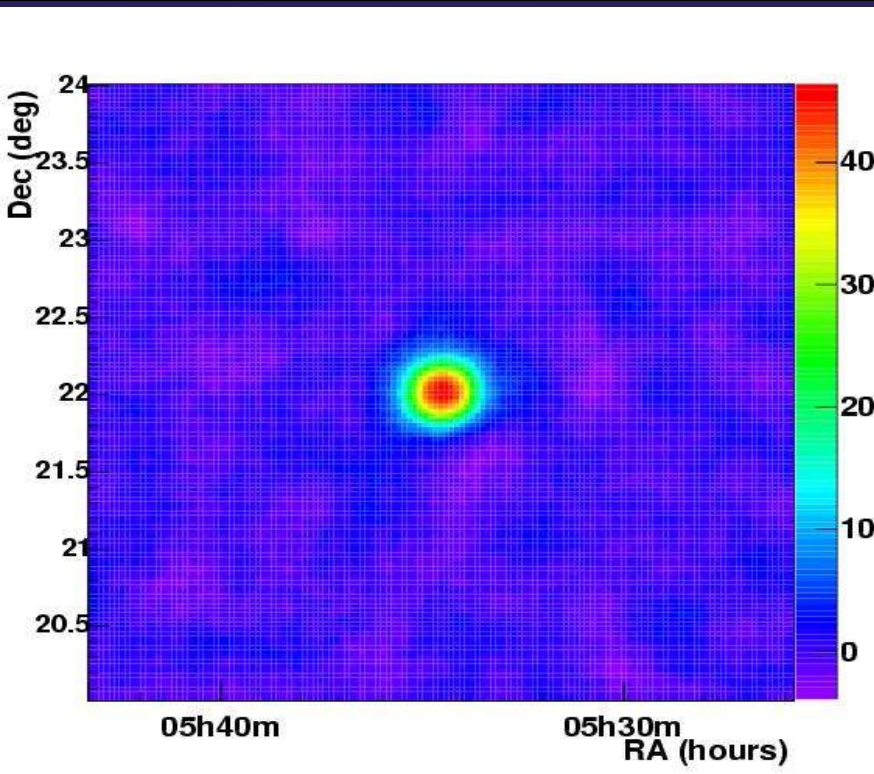


Résolution angulaire en fonction de l'énergie

Résultats obtenus à partir de simulations



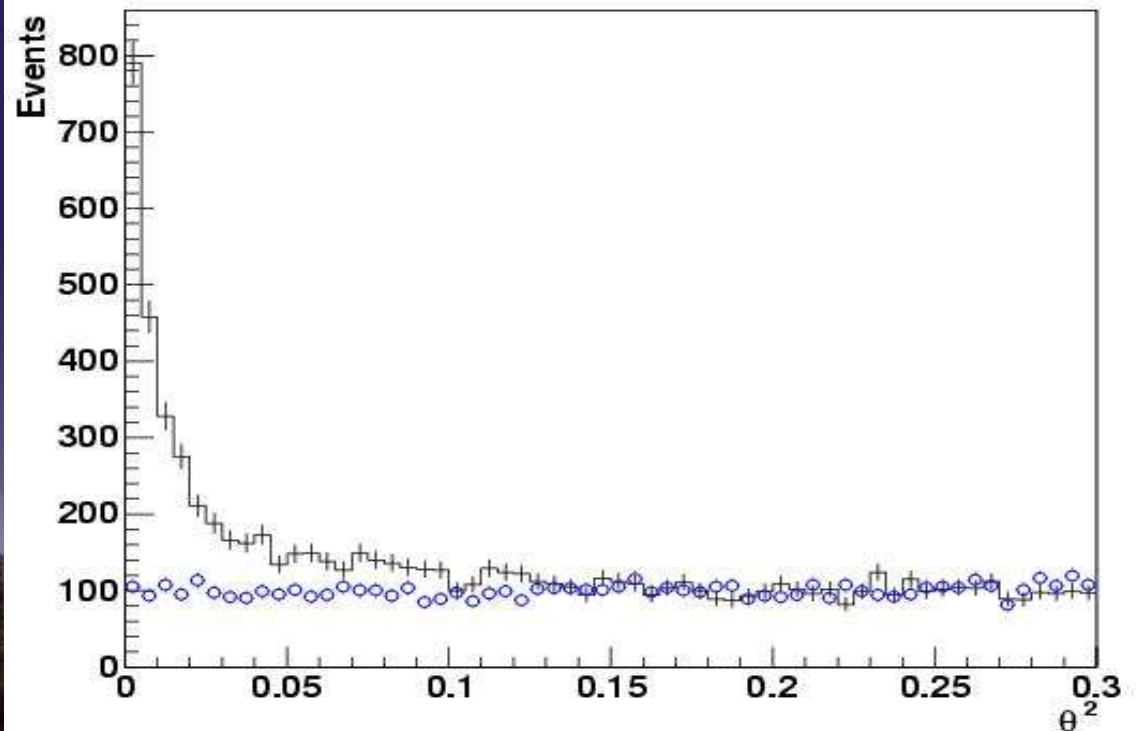
Résultat obtenu sur le Crabe



2.7 heures d'observation à 47 deg

46.3 sigmas

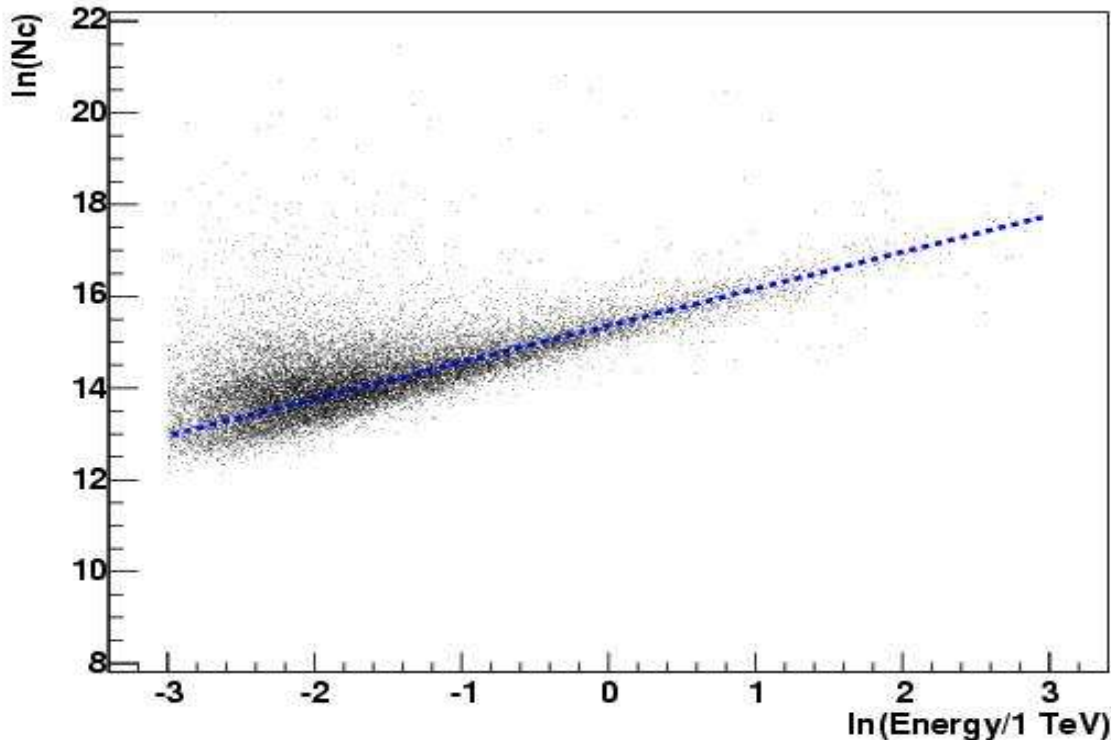
1704 gammas (+/- 75)



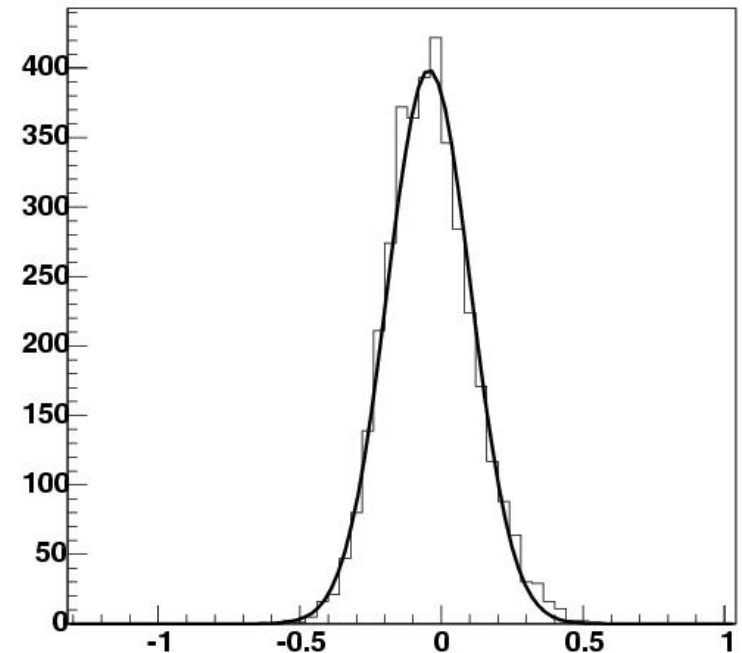
Estimation de l'énergie

- Variable calculée : Nombre de photons dans la gerbe
- Calibration à partir de simulations : $\ln(E_{\text{estimée}}) = a + b * \ln(N_{\text{phot}})$
- a et b dépendent de l'angle zénithal

Simulations au zénith

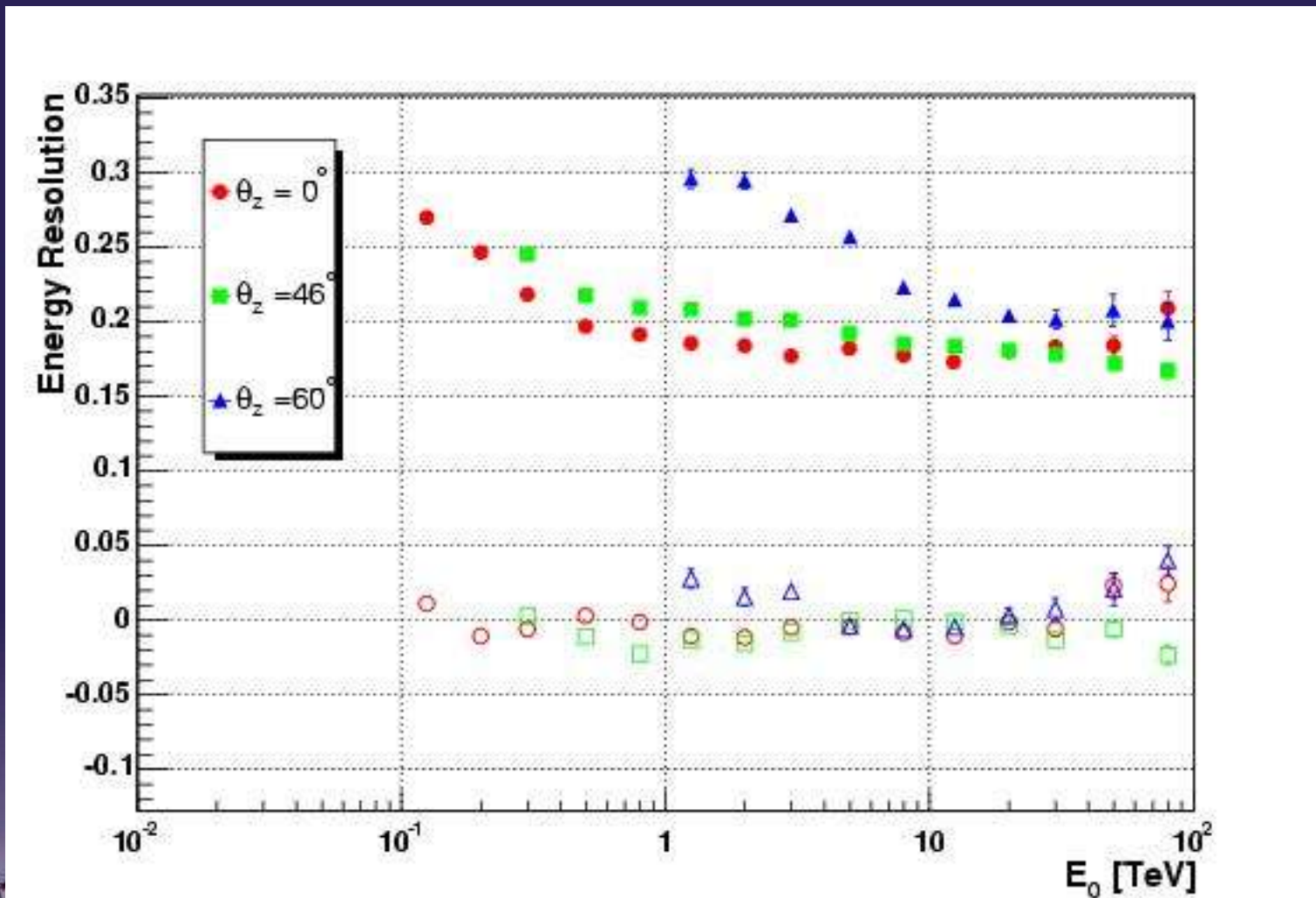


Simulation au zénith à 1 TeV



Résolution en énergie

Simulations de γ sur axe



*Une méthode de soustraction du fond
adaptée à l'étude des sources étendues*

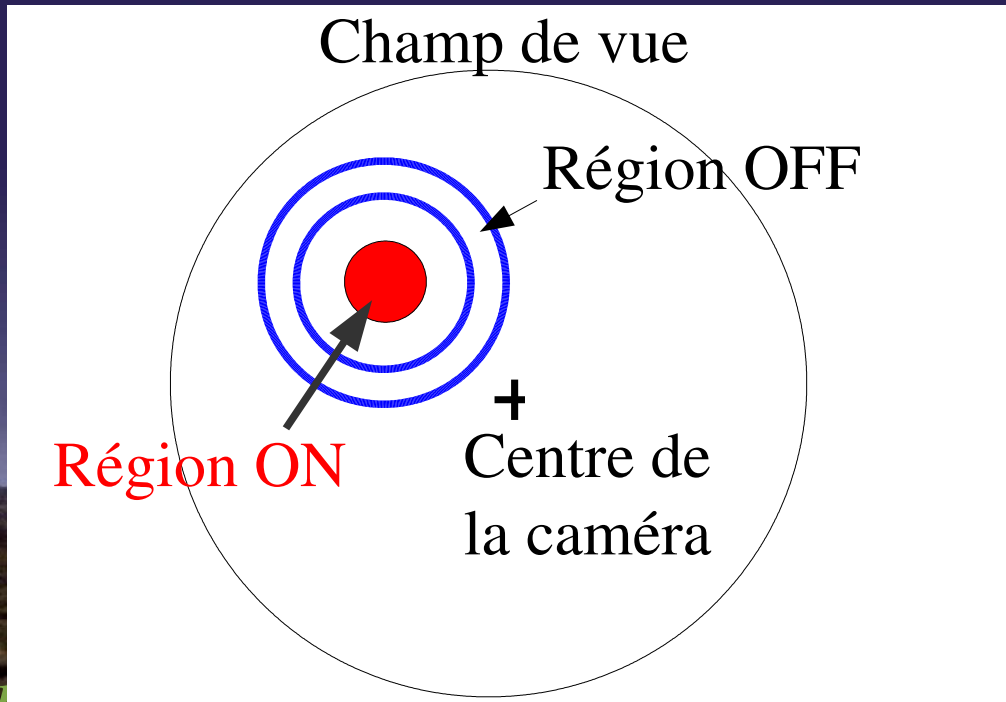
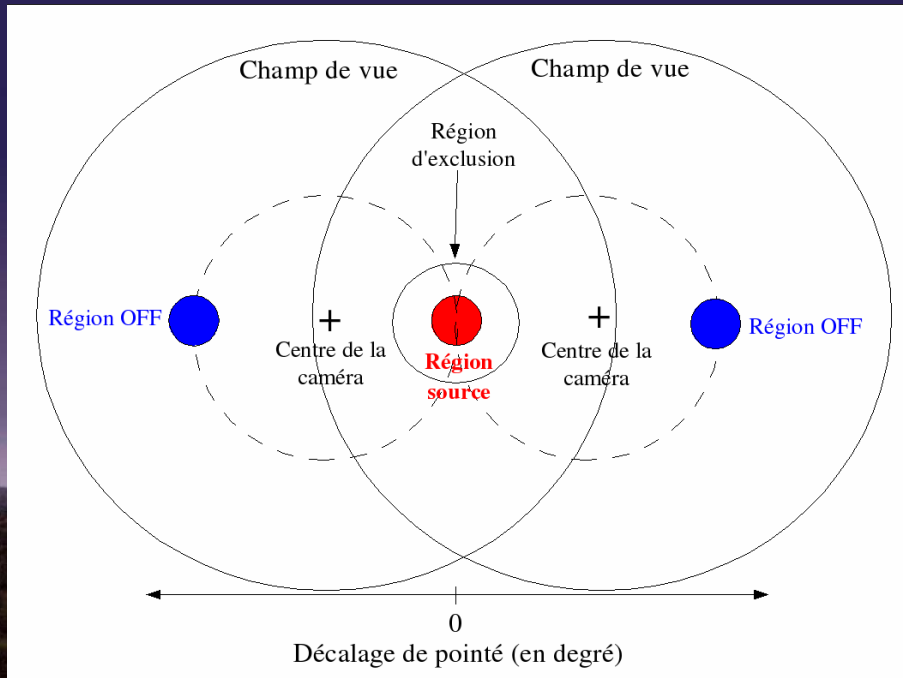


Les objectifs

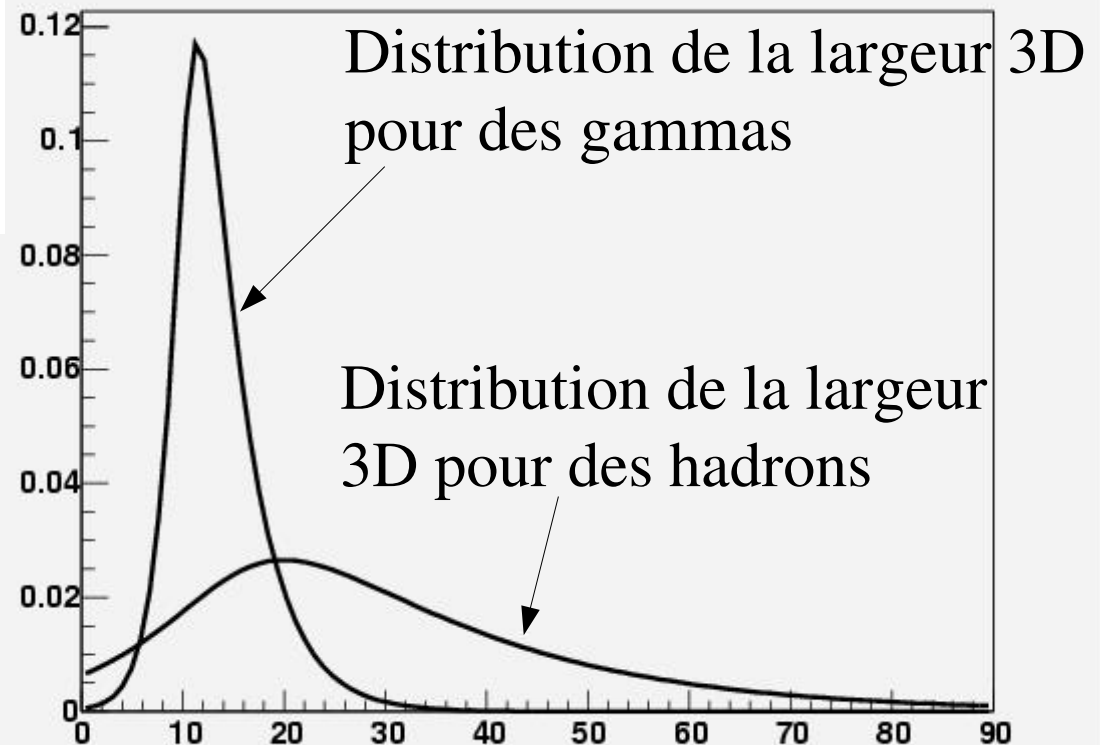
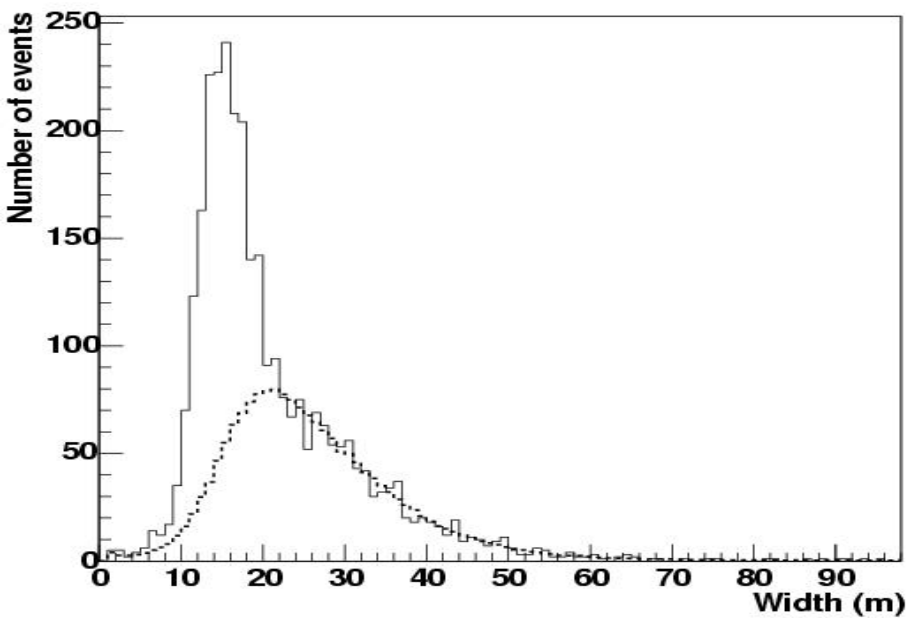
Développer une méthode de soustraction du fond qui ne fait aucune hypothèse sur :

- la distribution du fond hadronique dans le champ de vue
- le contenu en gamma de la région du ciel observée

Suppose que la région “OFF” ne contient aucun γ et que la distribution du fond possède une symétrie azimuthale



La distribution de largeur : sélection des gammas et des hadrons

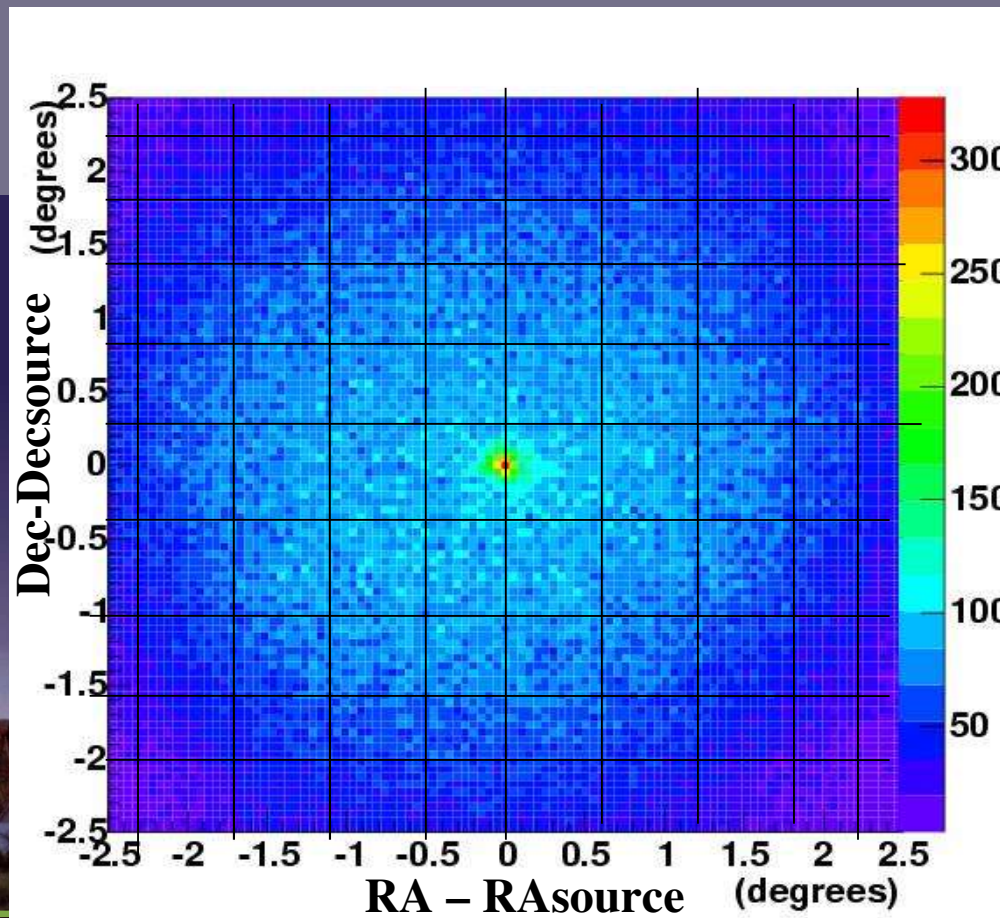


La méthode des poids (1)

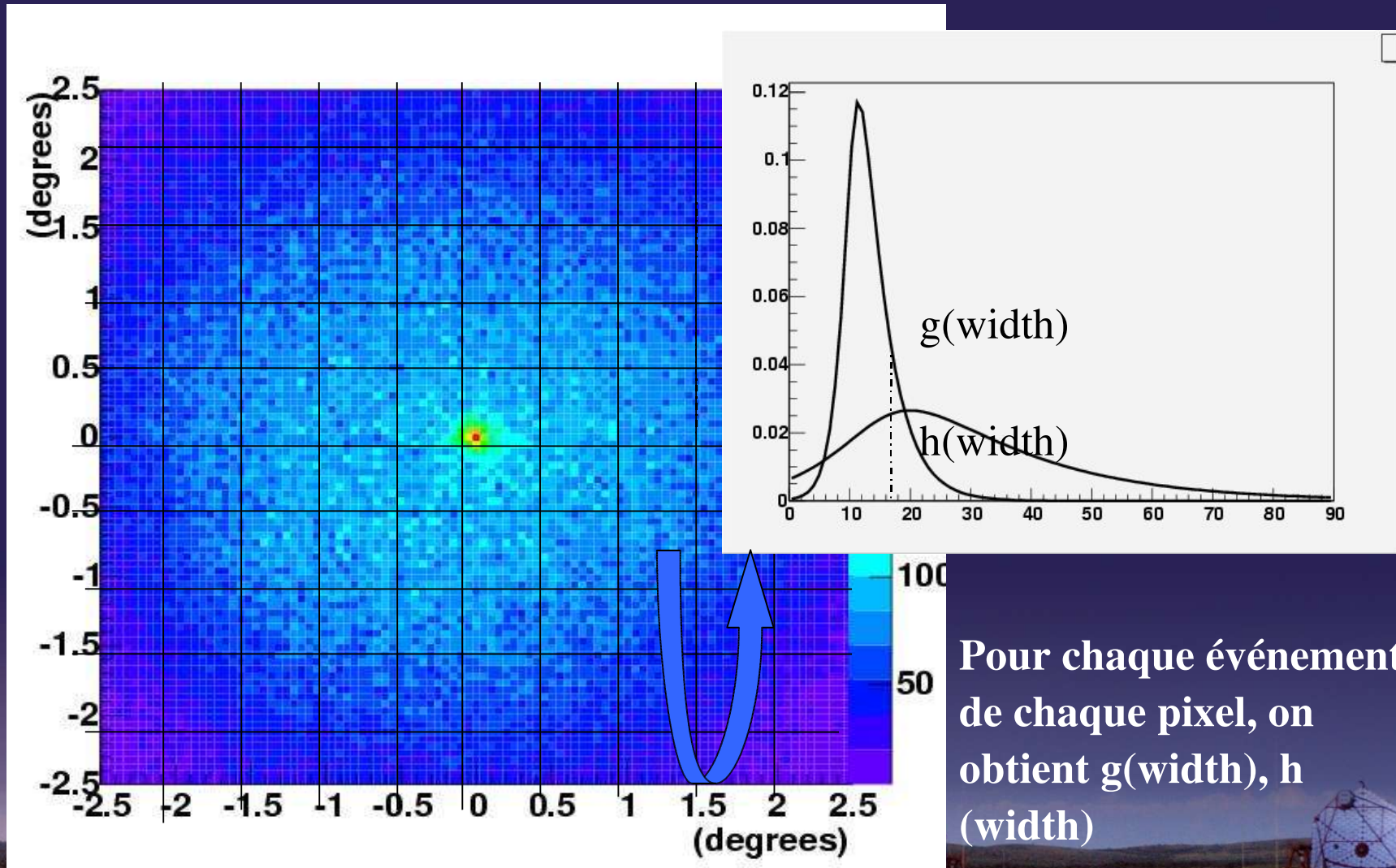
On utilise une carte en Ascension droite-Déclinaison obtenue après reconstruction avec le modèle 3D sans faire de coupure sur la largeur.

Le champ de vue est divisé en pixels dans les coordonnées célestes et la même procédure est appliquée séparément à chaque pixel.

Exemple :
Crab data



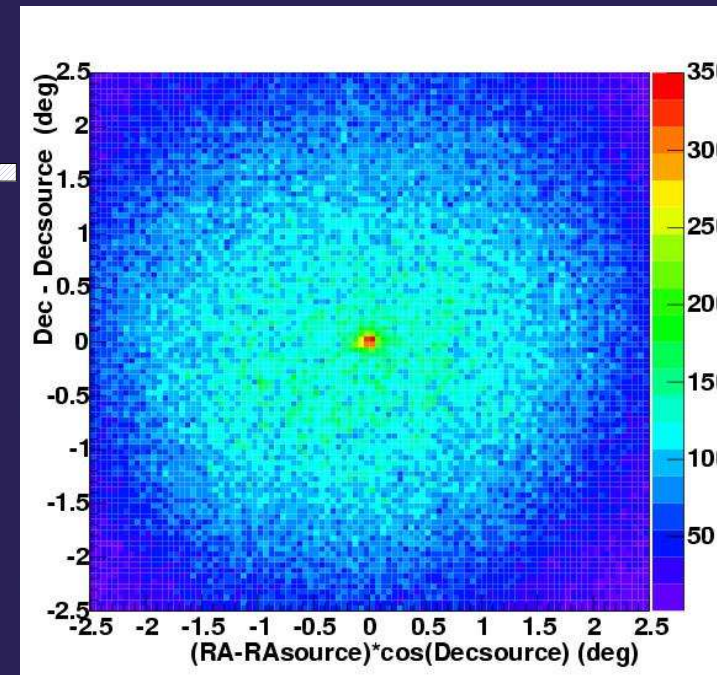
La méthode des poids (2)



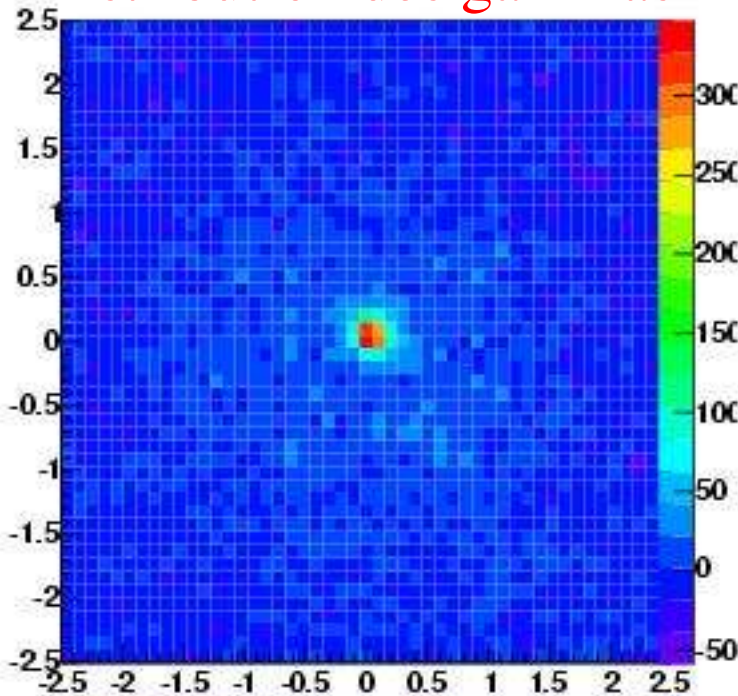
Pour chaque événement de chaque pixel, on obtient $g(\text{width})$, $h(\text{width})$

Résultat obtenu sur le Crabe

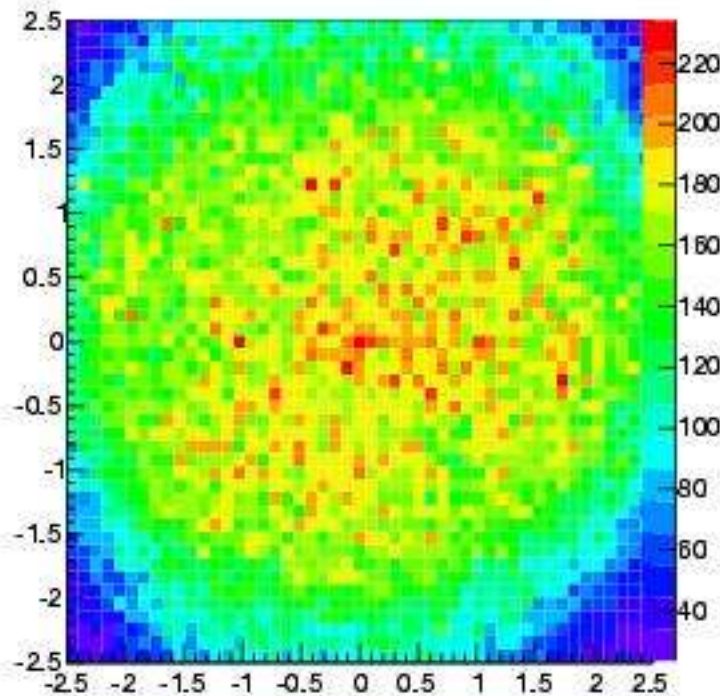
Ngammas ~ 1800



Distribution des gammas

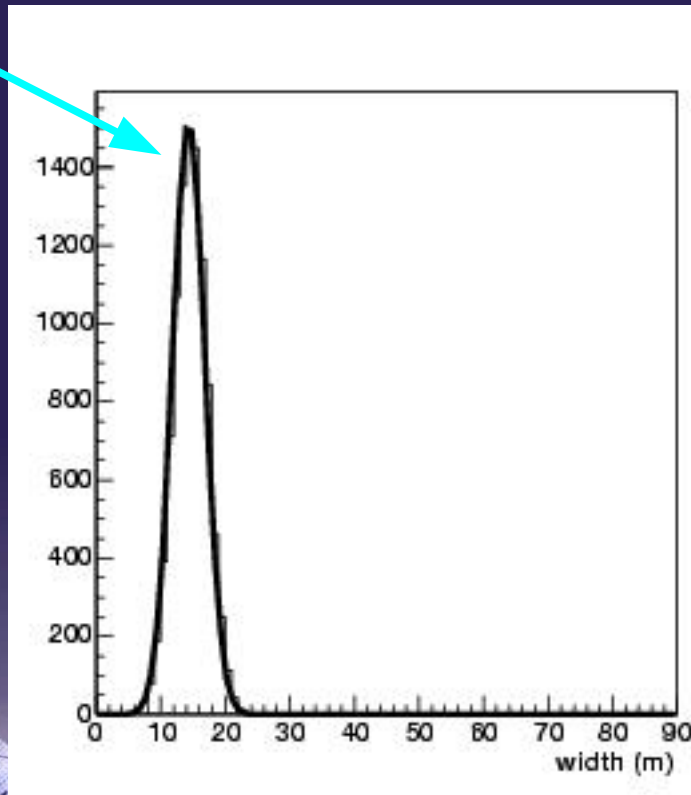


Distribution des hadrons

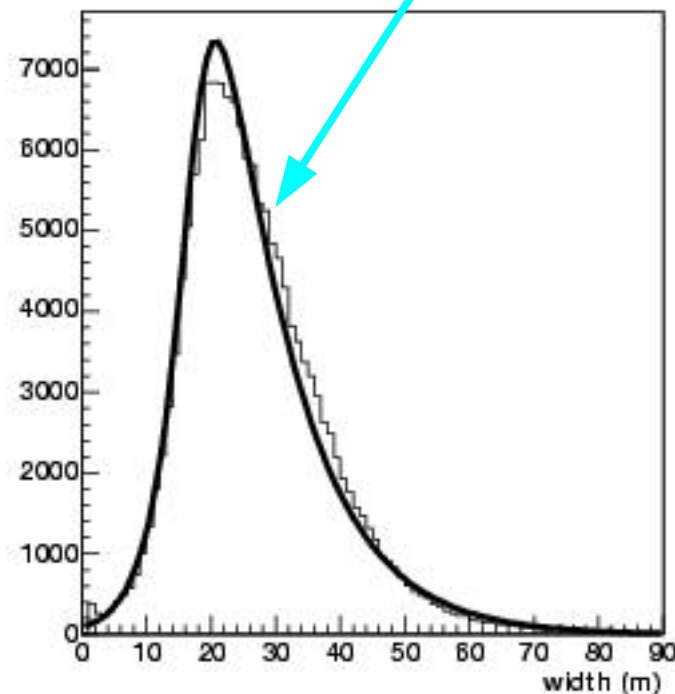


Test complémentaire

Distribution de la largeur 3D des
gammas après soustraction de
fond (comparée à la fonction $g(x)$
utilisée)



Distribution de la largeur 3D
des hadrons après
soustraction de fond
(comparée à la fonction $h(x)$
utilisée)

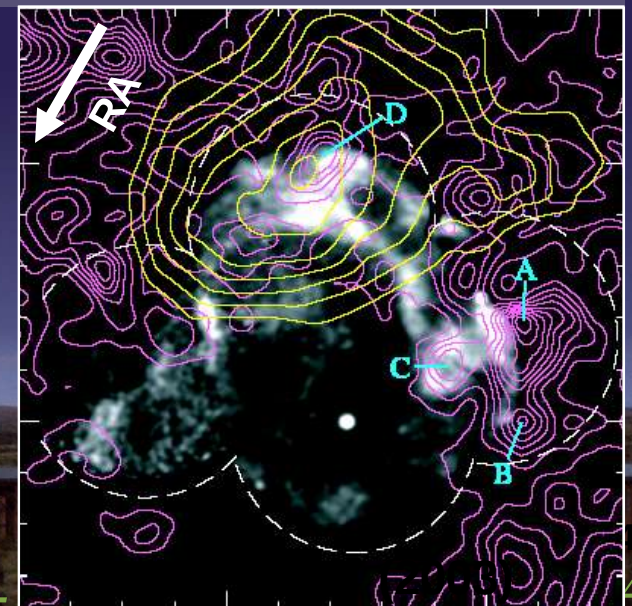
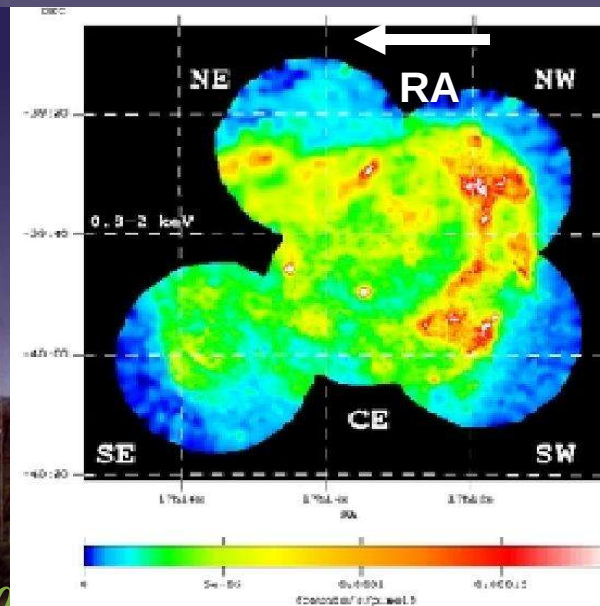
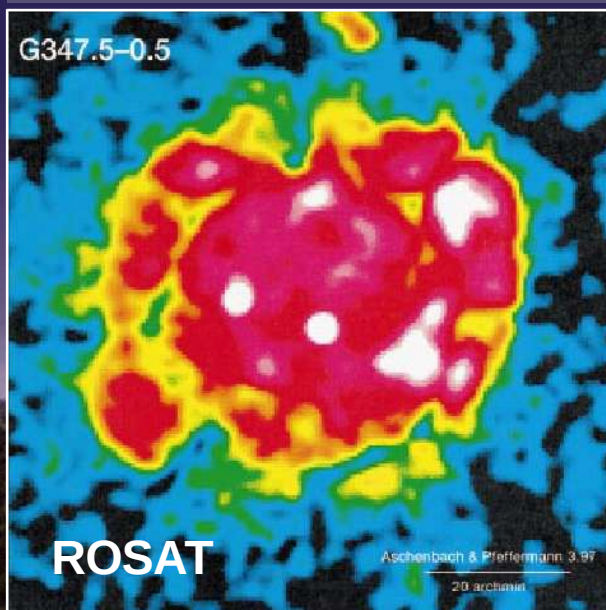


Résultats obtenus sur les vestiges de supernova



RX J1713.7 - 3946

- Découverte: ROSAT All-Sky Survey (1996)
- Distance: ~ 1 kpc (~ 3200 années lumière)
(Cassam-Chenai et al. et Fukui et al., 2004)
- Détection au TeV par CANGAROO (Enomoto et al., 2000)
- Détection par H.E.S.S. en 2004 (Aharonian et al., 2004, Nature)

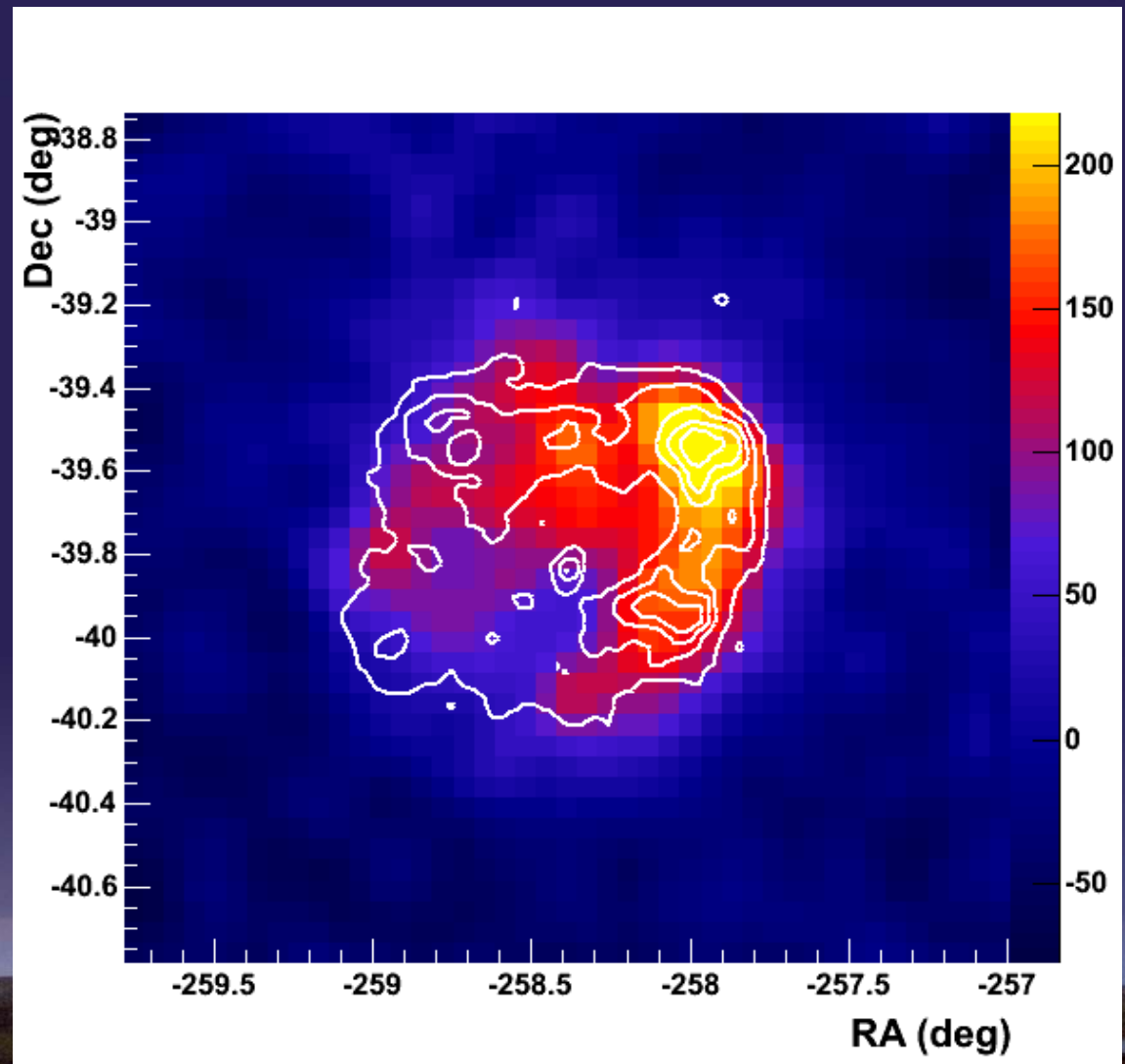


Résultats des observations effectuées par H.E.S.S.

Résolution angulaire $\sim 4'$ $\rightarrow$ morphologie résolue

Données 2004 :
33 heures sur source
angle zénithal : 15 à 60°

Carte d'excès
(nombre de γ)
Contours : ASCA (X)



Spectre de RX J1713.7-3946

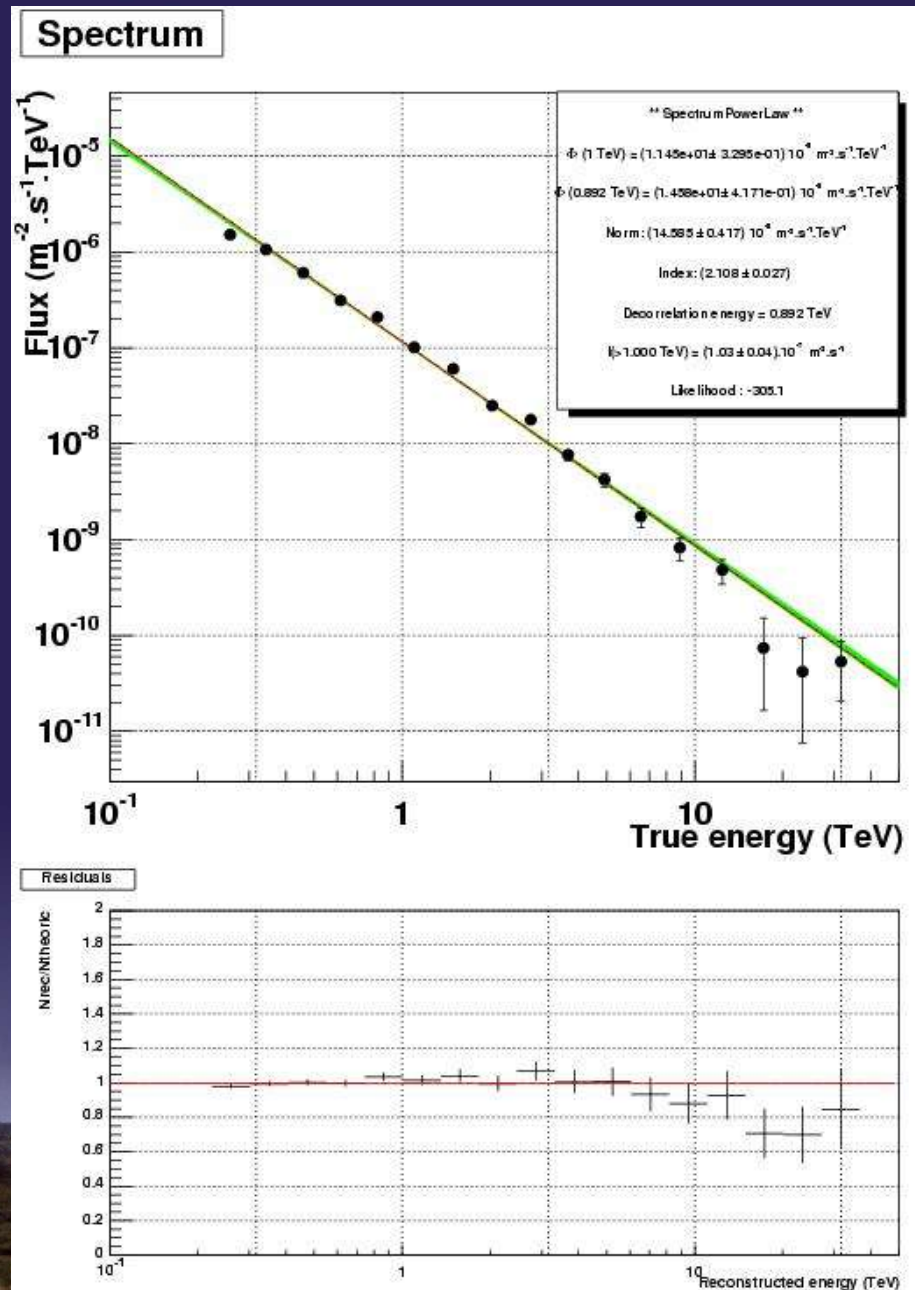
Indice spectral :

$$-2.19 \pm 0.02 \pm 0.15$$

Flux(>1TeV) :

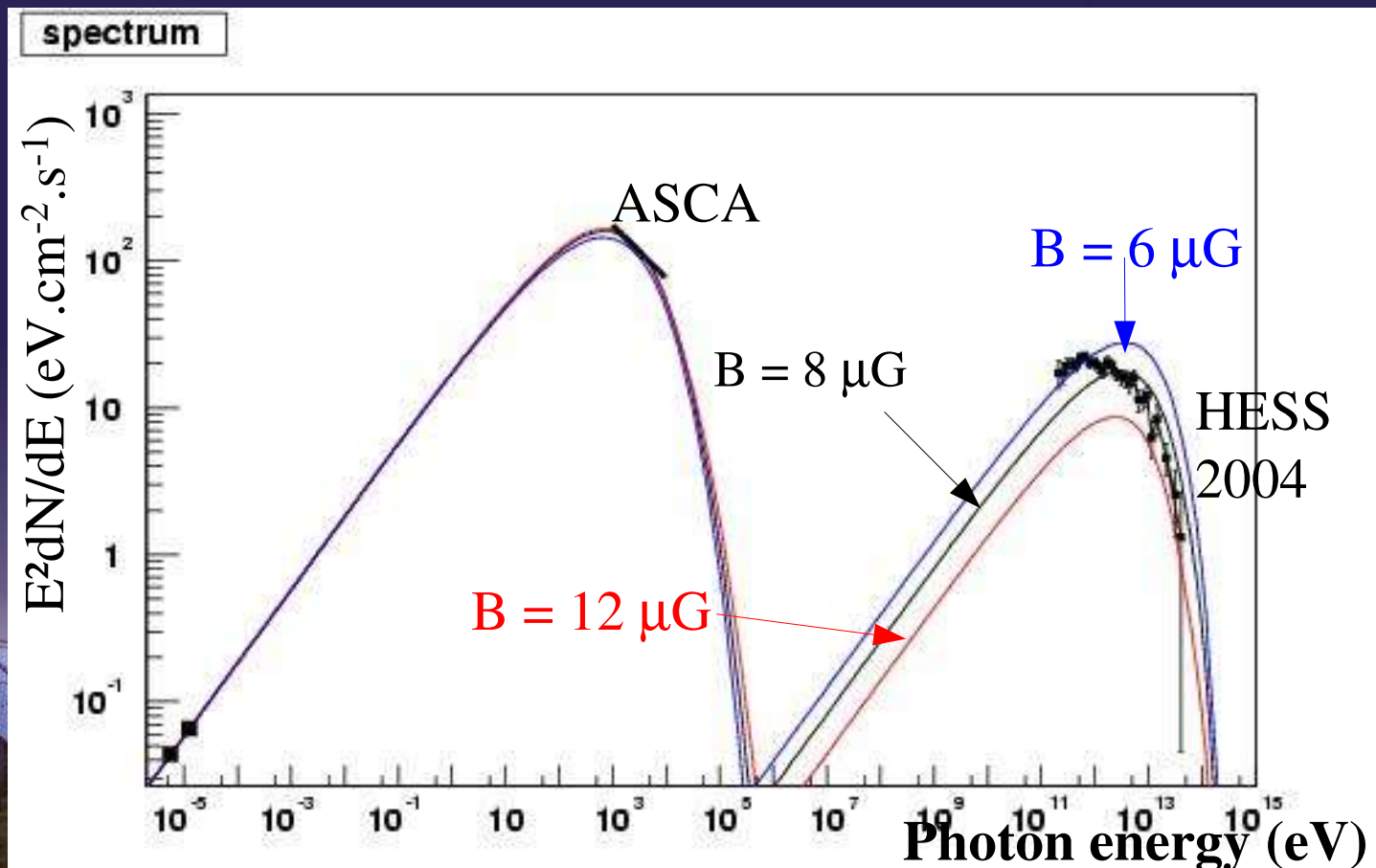
$$(13.5 \pm 0.40) \times 10^{-12} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

Des particules accélérées
jusqu'à ~ 100 TeV



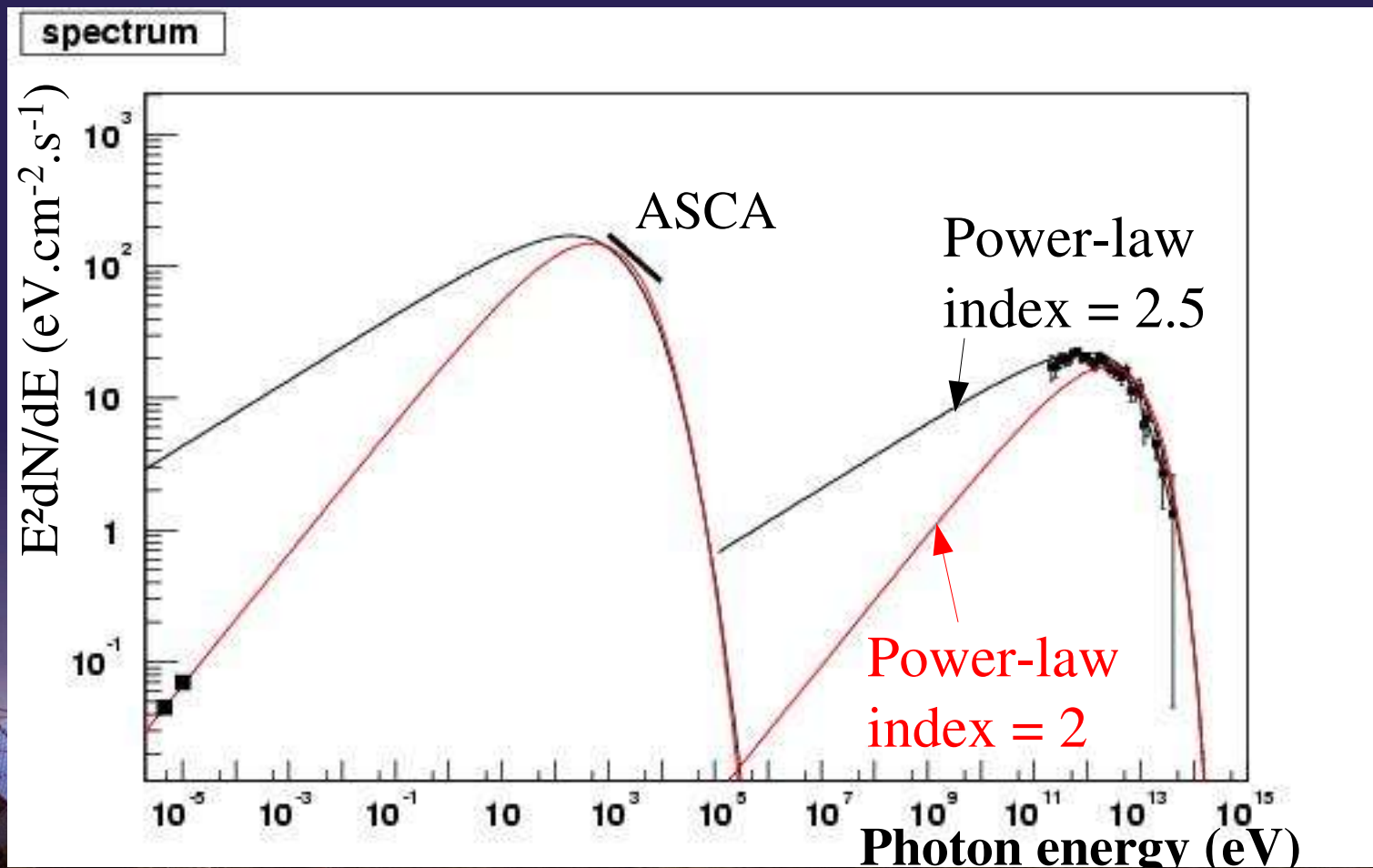
Processus leptonique ou hadronique ? (I)

- Modèle simple : synchrotron + IC sur le fond cosmologique et infra-rouge
- **Electrons**: Loi de puissance + coupure exponentielle à 100 TeV
Indice de la loi de puissance = 2
Energie injectée aux électrons = $1.2 \cdot 10^{37} \text{ erg.s}^{-1}$ ($B = 8 \mu\text{G}$)



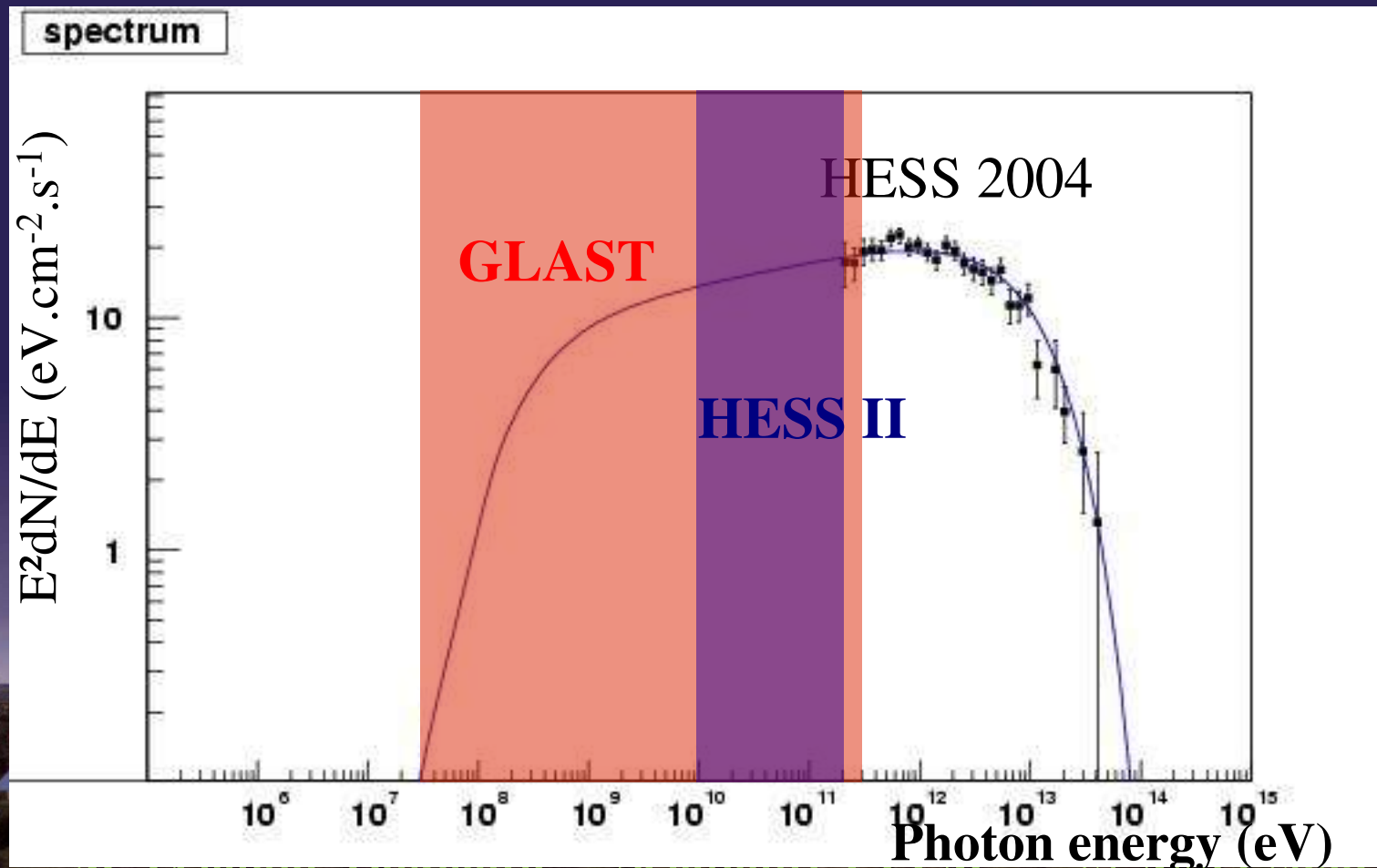
Processus leptonique ou hadronique ? (II)

- Modèle simple : synchrotron + Inverse-Compton
- **Electrons**: loi de puissance d'indice 2.5



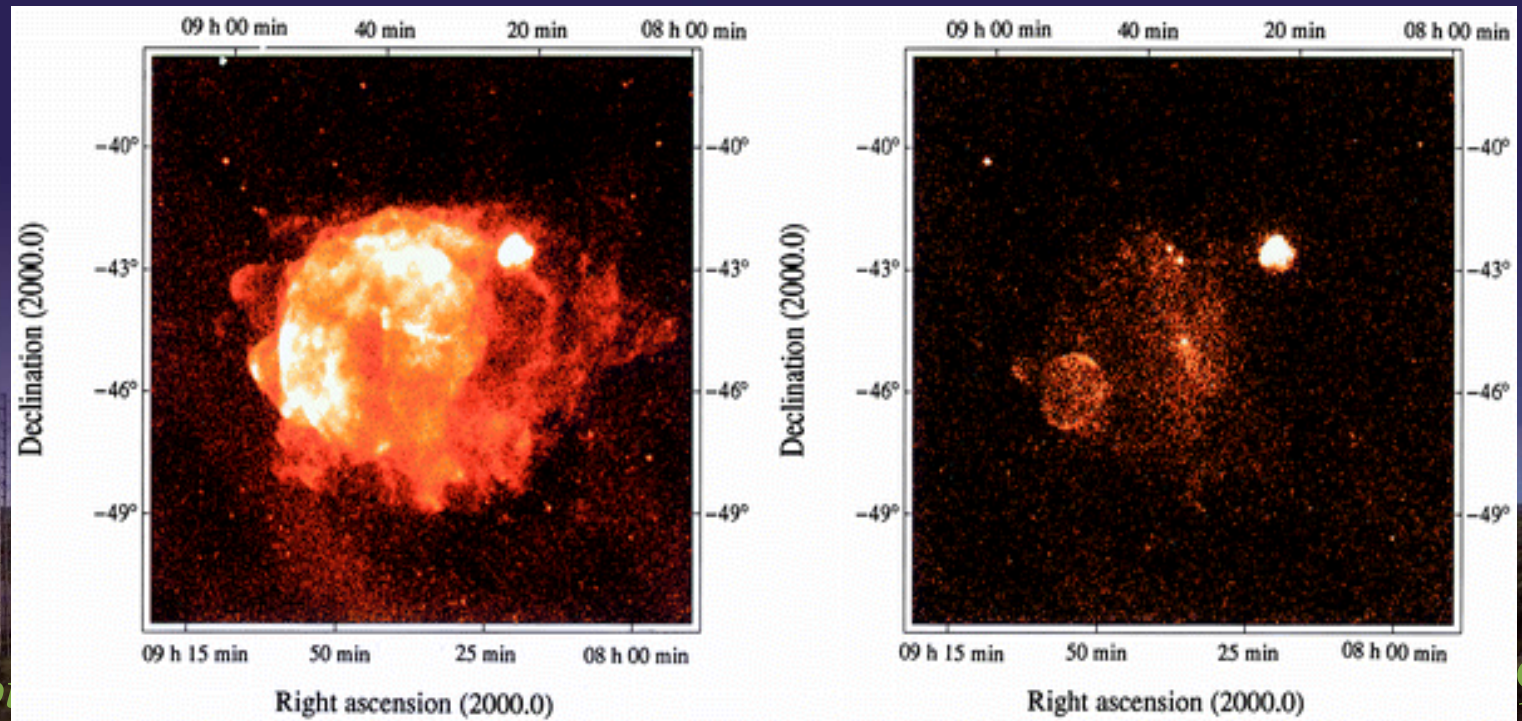
Processus leptonique ou hadronique ? (III)

- Modèle de désintégration des π^0
- Distribution des **protons** : loi de puissance + coupure exponentielle
 $E_{\text{cut}} = 150 \text{ TeV}$ et indice = 1.95
- Energie totale = $1.7 \cdot 10^{50}$ ergs



Vela Junior

- Reste de supernova à coquille découverte par ROSAT (1998)
- Diamètre de 2 degrés
- Situé au Sud-Est du reste de supernova Vela SE => étude dans le domaine des X et de la radio complexifiée par la superposition de l'émission provenant de Vela
- Grande incertitude sur la distance et l'âge de Vela Junior (*pourrait être située à 200 pc...ou à 2 kpc !*)



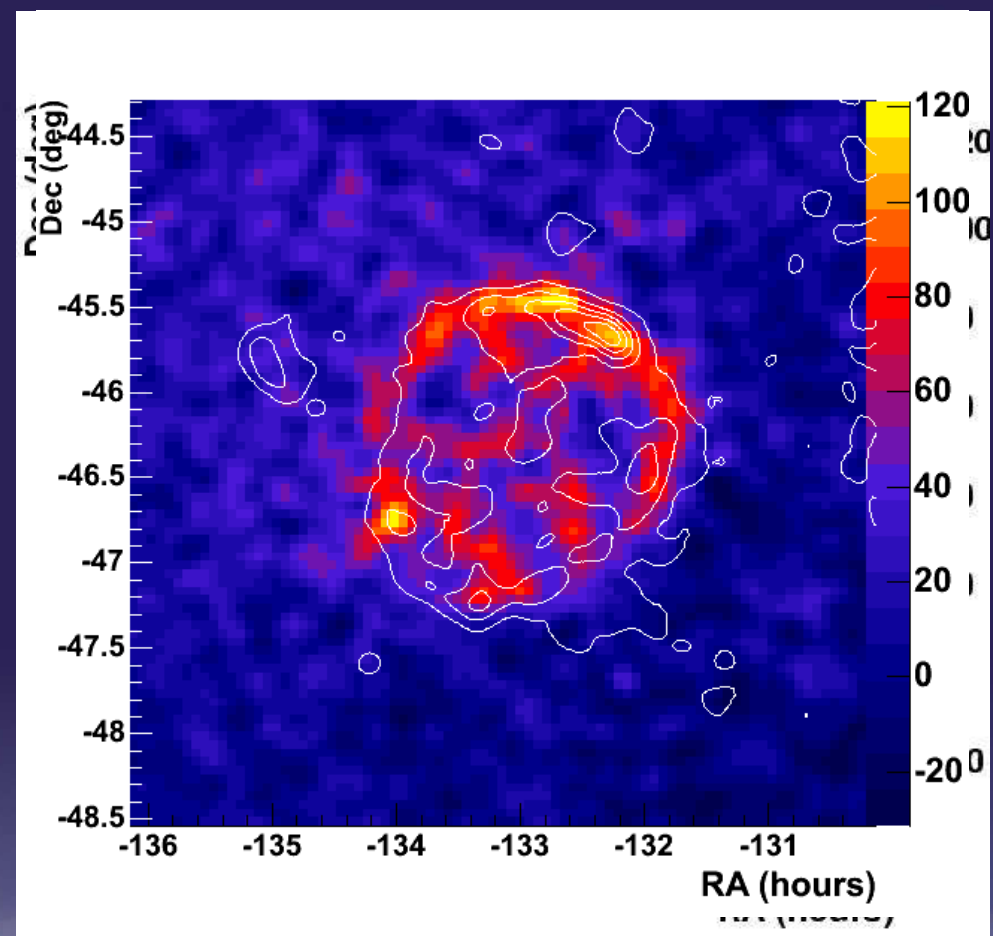
Morphologie résolue par HESS

20 heures utiles prises entre Décembre 2004 et Mai 2005

Angles zénithaux compris entre 20° et 50°

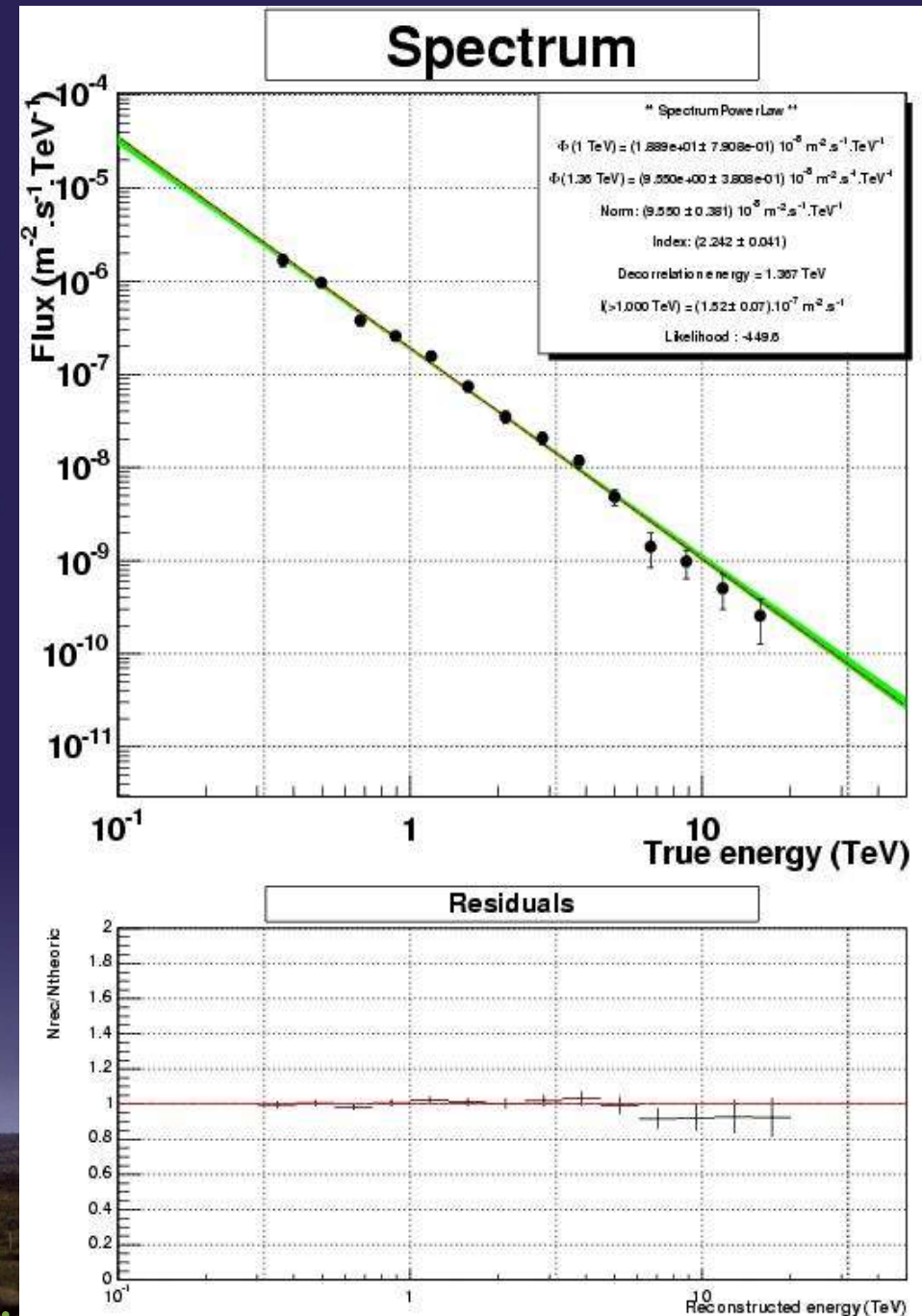
Des méthodes indépendantes ont confirmées ce résultat

Haute corrélation avec les X ($\sim 65\%$)



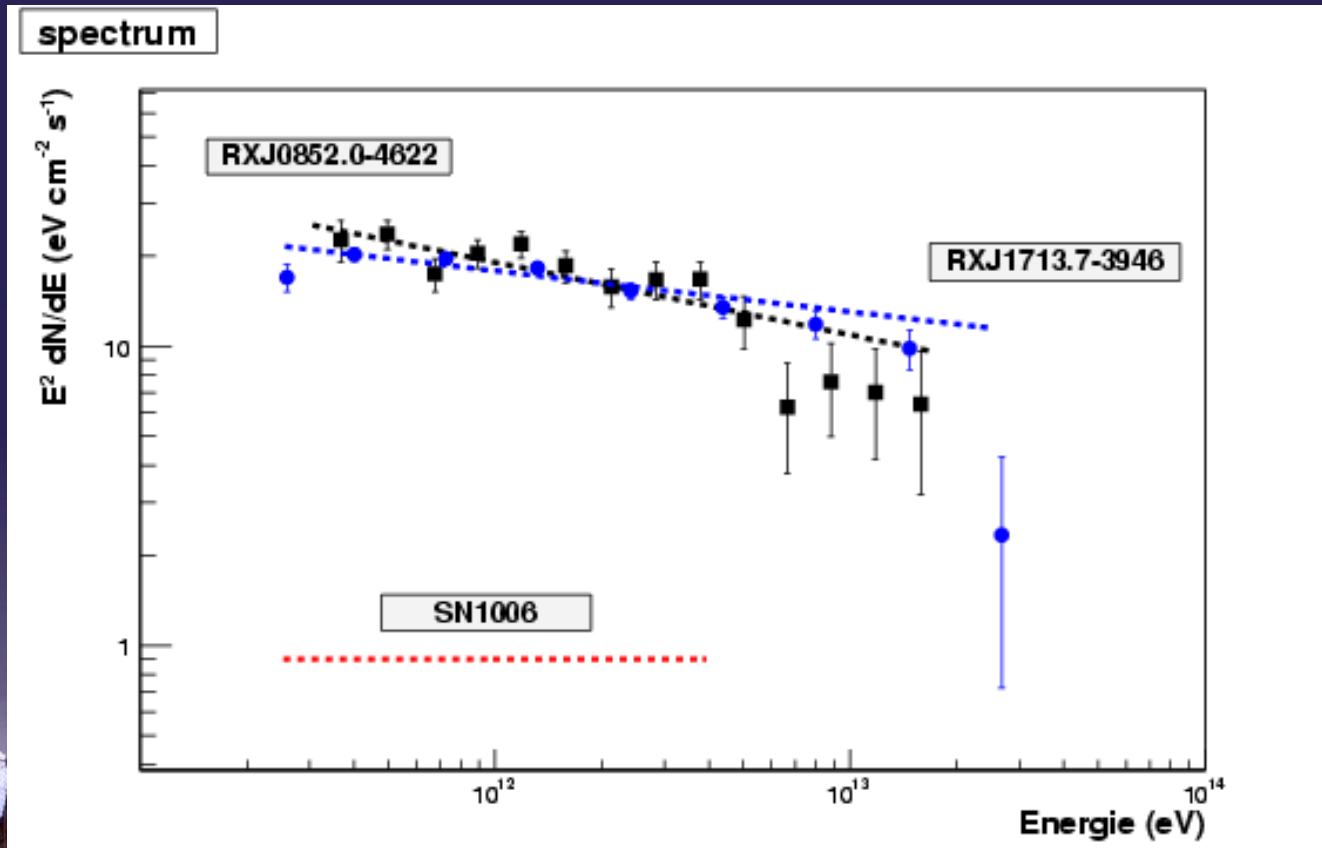
Spectre de Vela Junior

- Spectre s'étalant de 300 GeV jusqu'à 20 TeV
- Indice spectral = $2.24 \pm 0.05_{\text{stat}}$
- $I(> 1\text{TeV}) = (15.2 \pm 0.7) \times 10^{-12} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$
- Indication de déviation à haute énergie



Deux vestiges de supernovae potentiellement intéressants pour les neutrinos (I)

- Flux de RX J1713.7-3946 et Vela Junior ≈ 1 Crab
- Indice spectral ≈ 2.2

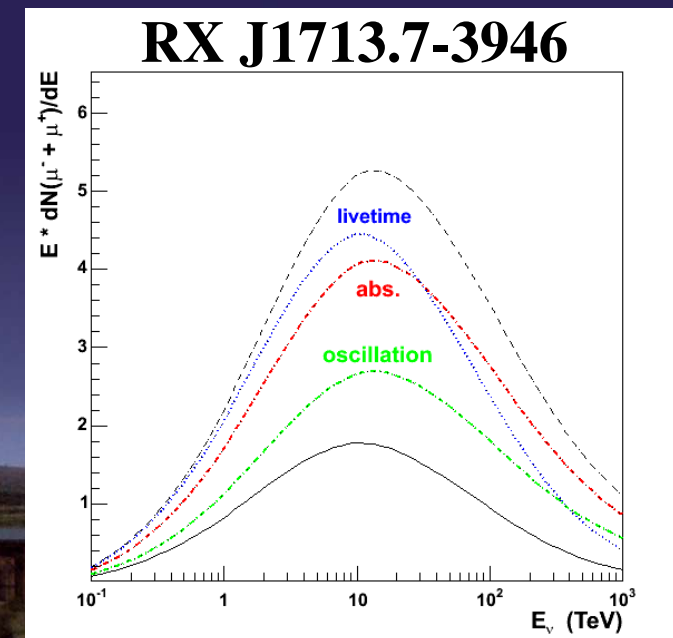
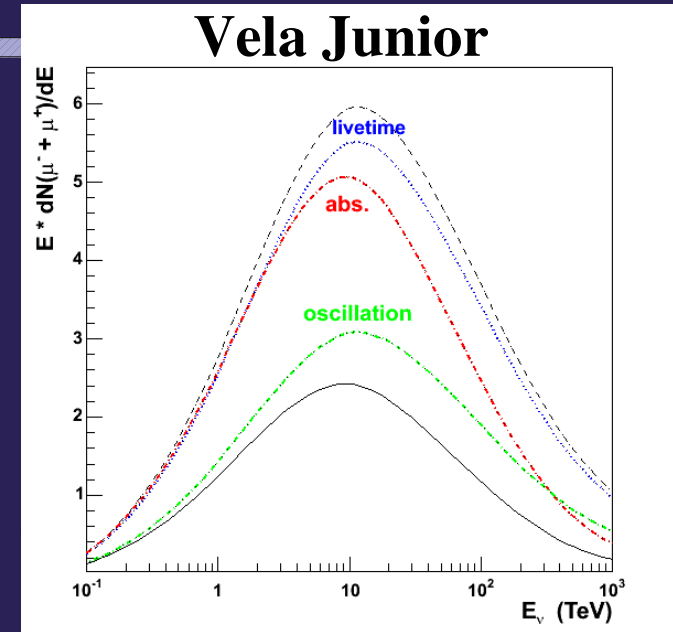


Deux vestiges de supernovae potentiellement intéressants pour les neutrinos (II)

- Calcul du flux de μ à travers un détecteur de 1 km^2 publié par Constantini & Vissani (2005)
- Flux de ν_μ
- Temps de visibilité de la source
- Absorption des ν par la Terre
- Oscillations de saveur

=> 10 événements par an pour RXJ1713.7-3946

=> 12 événements par an pour Vela Junior



Conclusion (I)

Resultats très encourageants avec des hypothèses simples : le Modèle 3D, donne des résultats aussi bons voire meilleurs que l'analyse traditionnelle.

Lemoine-Goumard, M. et al., accepté par AstroParticle Physics

La méthode de soustraction de fond nous permet d'obtenir, sans faire de coupure sur la largeur, la distribution des gammas dans le champ de vue
=> très utile pour les sources étendues ou pour la recherche de sources inconnues dans un champ de vue.



Conclusion (II)

Deux vestiges de supernovae résolus dans le domaine du TeV

=> Démontre la sensibilité atteinte par HESS ainsi que sa grande résolution angulaire

- D'autres nouvelles sources viennent augmenter la liste du catalogue des restes de supernovae observés au TeV
- Discrimination entre les processus leptonique et hadronique dans les restes de supernovae en marche....

