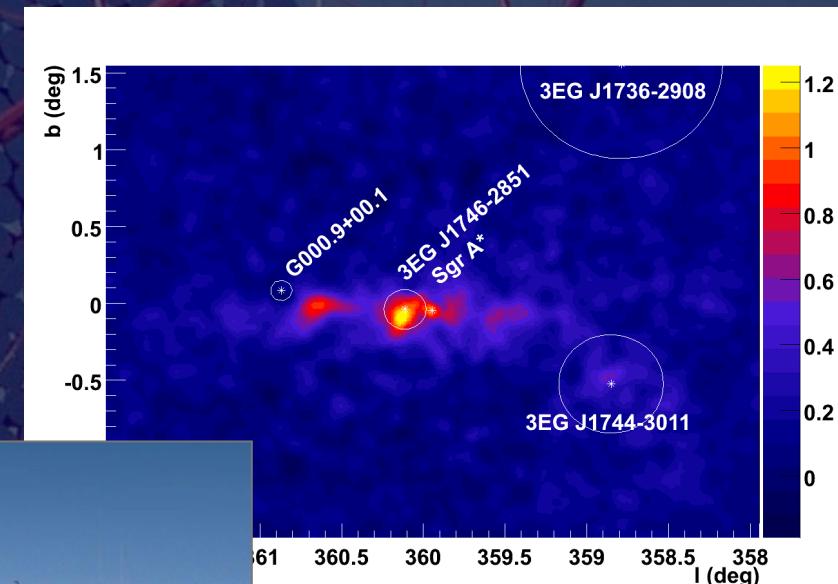


Dernières découvertes de H.E.S.S.

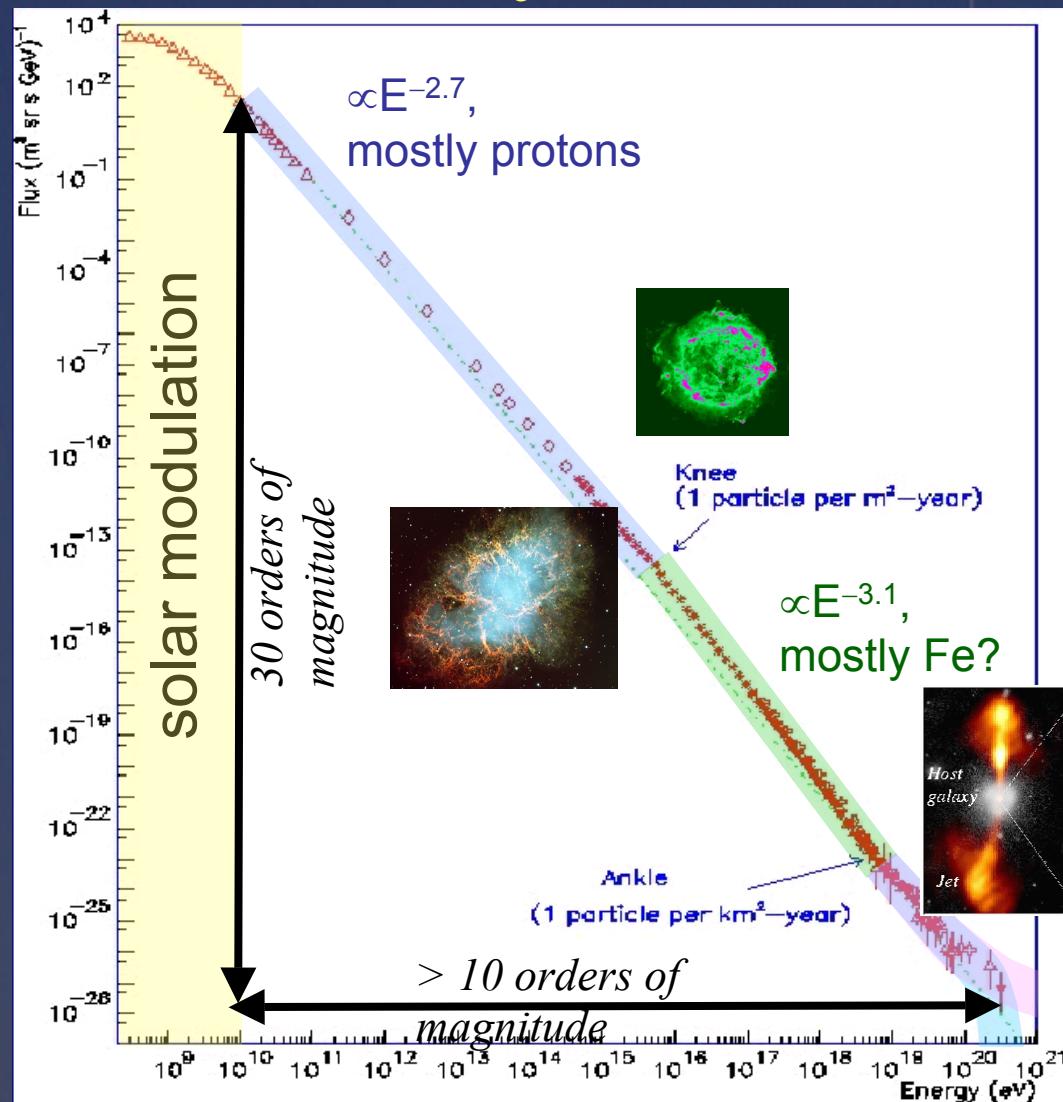
Loïc Rolland

CEA-Saclay/DSM/DAPNIA/SPP

- L'astronomie γ
- L'expérience H.E.S.S.
- Résultats récents
 - Sources galactiques
 - Fond IR extragalactique



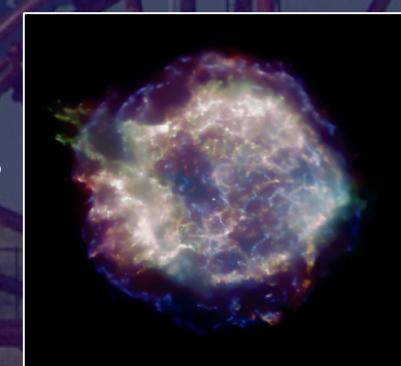
Le mystère des rayons cosmiques



Découverte
en ballon
Victor Hess, 1912



10 ordres de grandeur en énergie
30 ordres de grandeur en flux
Origine, composition inconnues
Transition galactique/extragalactique



Meilleurs candidats galactiques

- les restes de supernovae
- électrons à 100 TeV

L'origine du rayonnement γ

□ Protons ou hadrons de haute énergie

$$\square p + \text{noyau} \rightarrow X \pi^0 \rightarrow X \gamma \gamma$$

□ Electrons de haute énergie

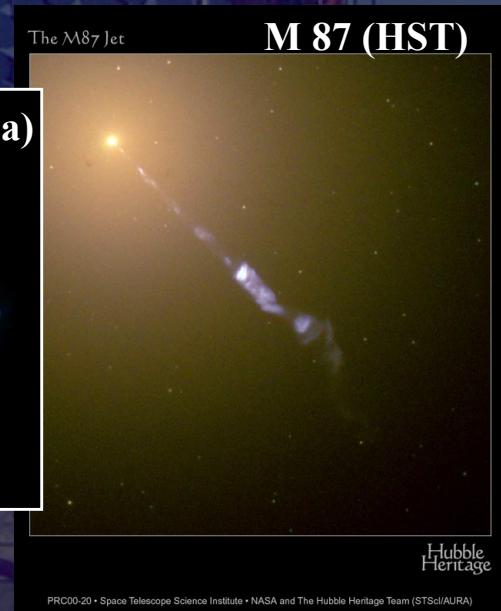
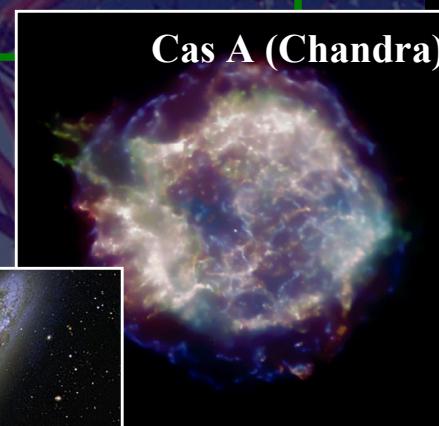
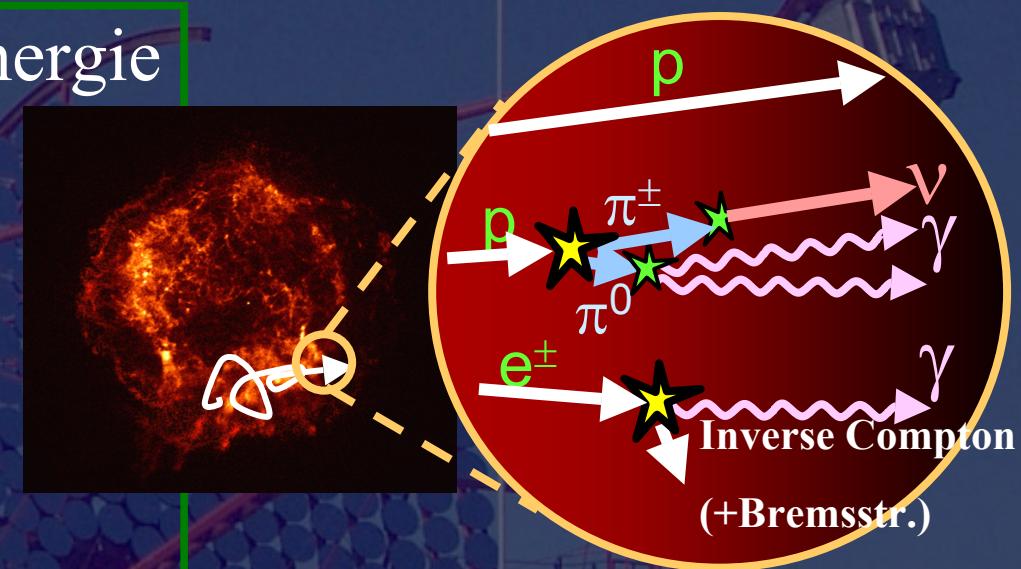
\square Pertes synchrotron

\square Bremsstrahlung

\square Diffusion Inverse-Compton

□ Annihilation de matière noire

$$\square \chi\chi \rightarrow X \gamma$$



PRC00-20 • Space Telescope Science Institute • NASA and The Hubble Heritage Team (STScI/AURA)

L'imagerie Cherenkov atmosphérique

Photon γ
Rayon cosmique

gerbes de particules

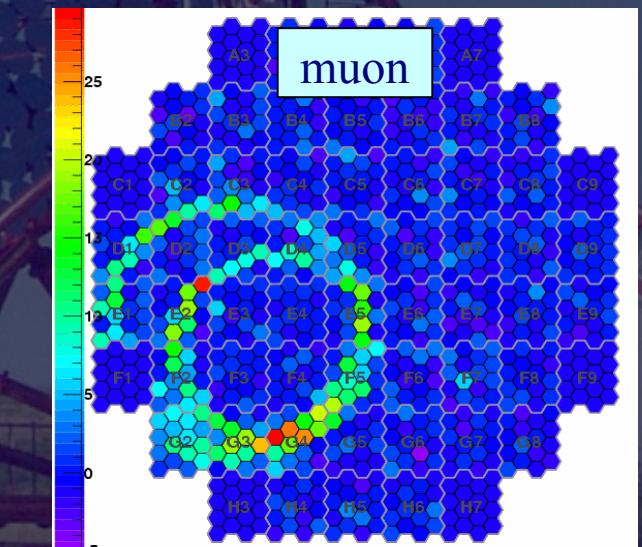
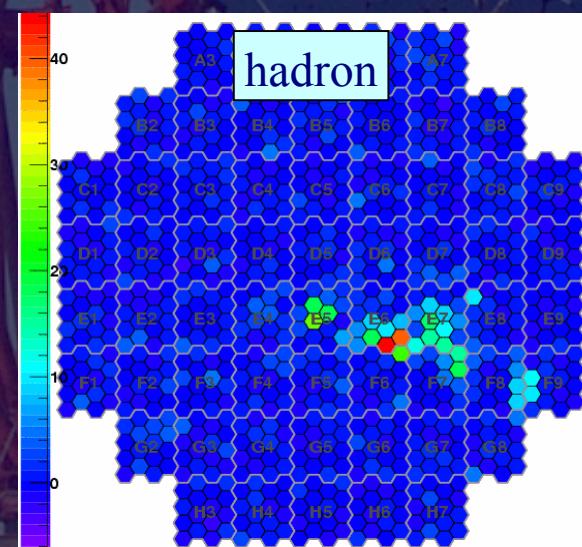
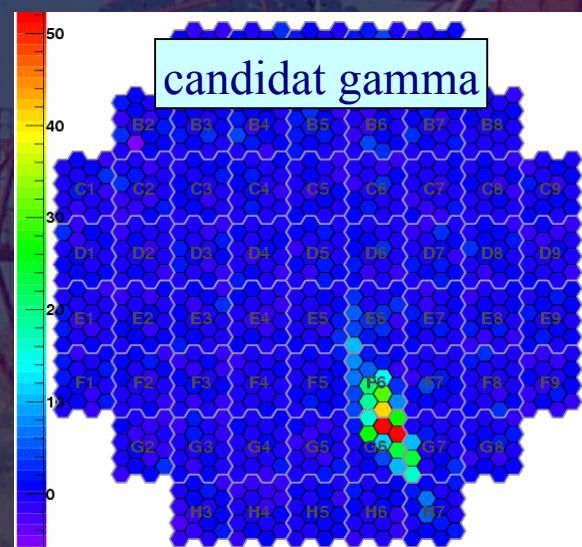
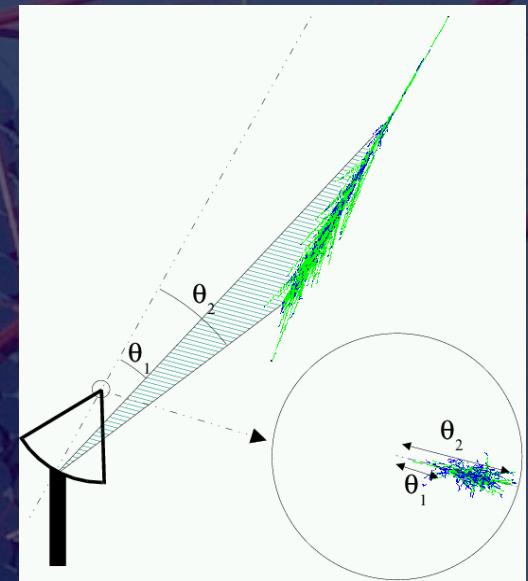
Lumière Cherenkov

~ 10 km

~ 1°

~ 120 m

- Atmosphère = calorimètre
- Image des flashes Cherenkov (~ 3 ns)



La stéréoscopie

Direction de la source

- Eliminer les muons isolés
- Baisser le seuil
- Améliorer la réjection hadronique
- Améliorer la reconstruction des γ

Photon γ
Rayon cosmique

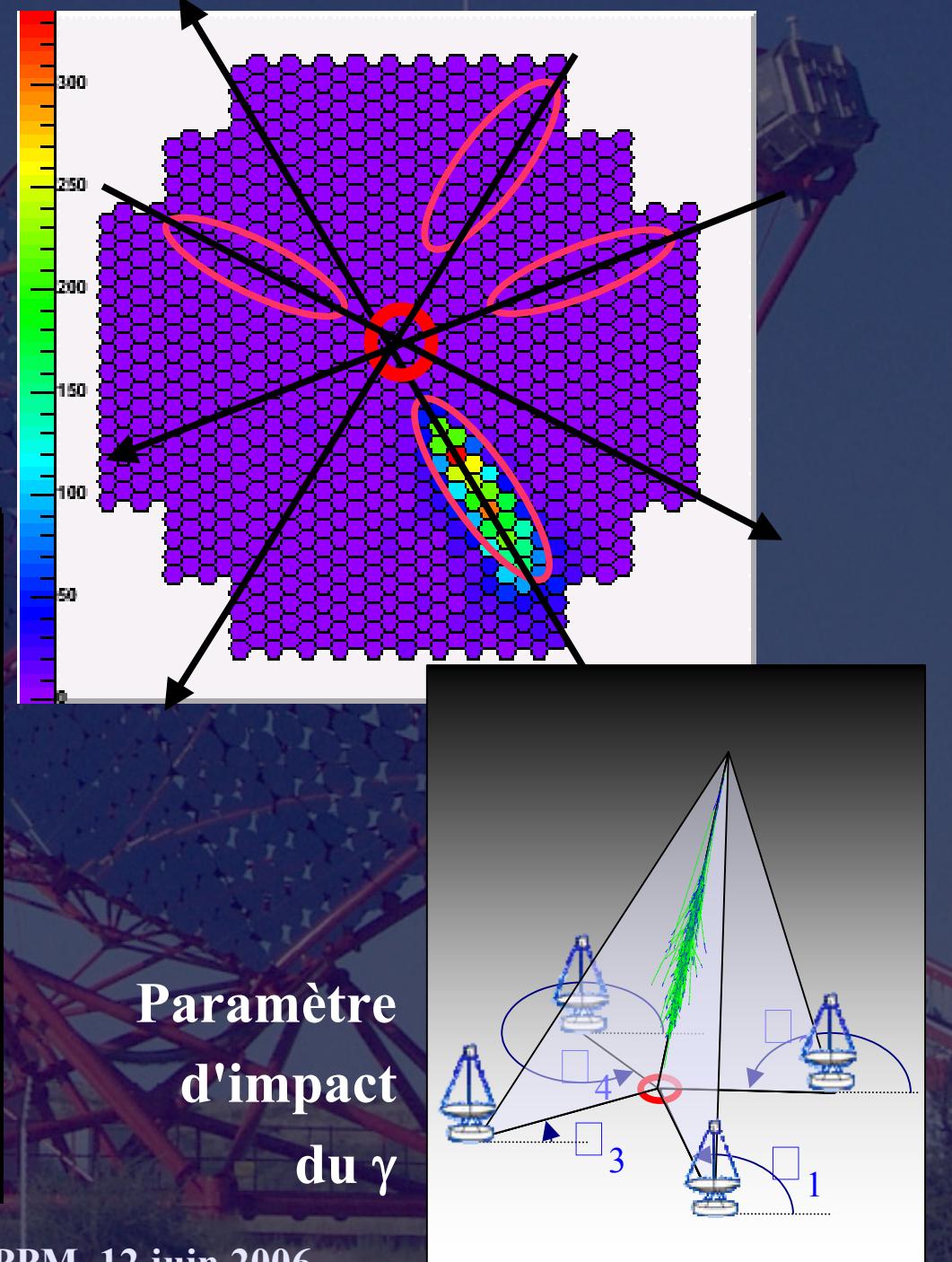
gerbes de
particules

Lumière Tcherenkov

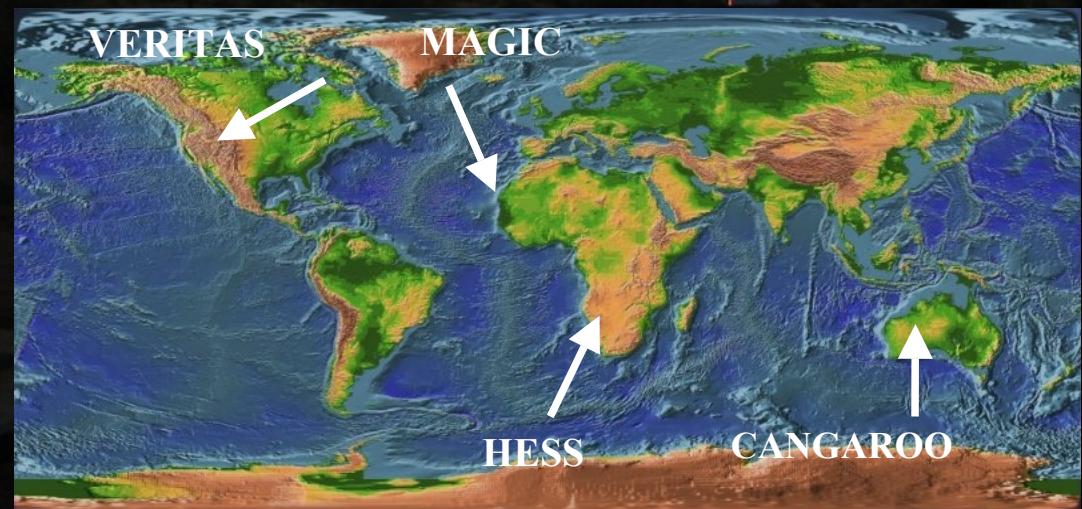
~ 10 km

$\sim 1^\circ$

Paramètre
d'impact
du γ

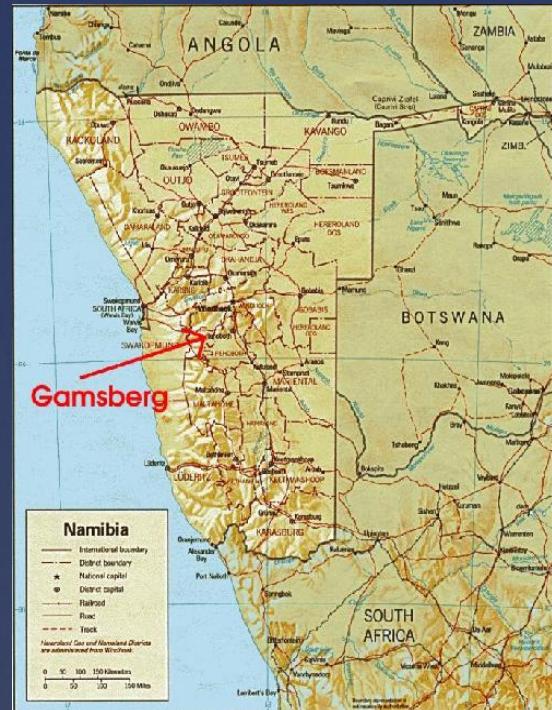


LE DETECTEUR H.E.S.S.



H.E.S.S. : un instrument de 3ème génération

Site : Namibie, $23^{\circ}16''$ S, $16^{\circ}30''$ E, altitude 1800 m



Télescopes

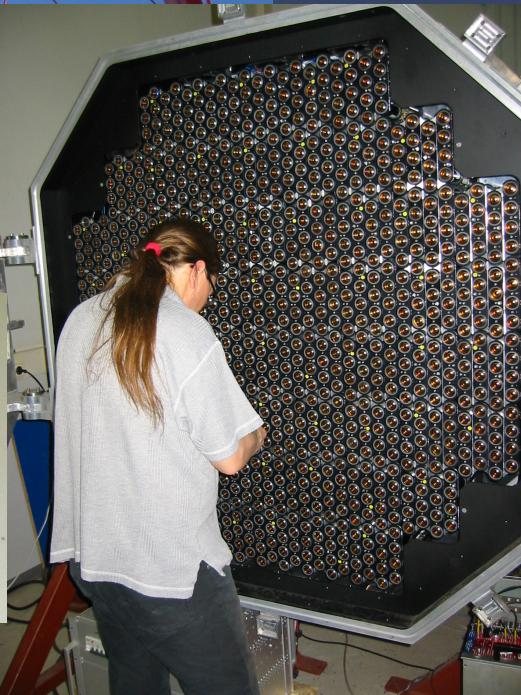
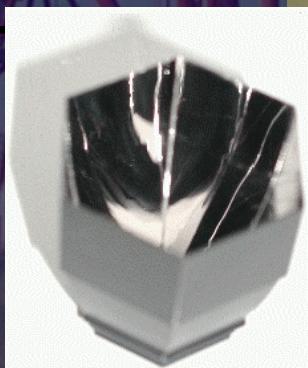
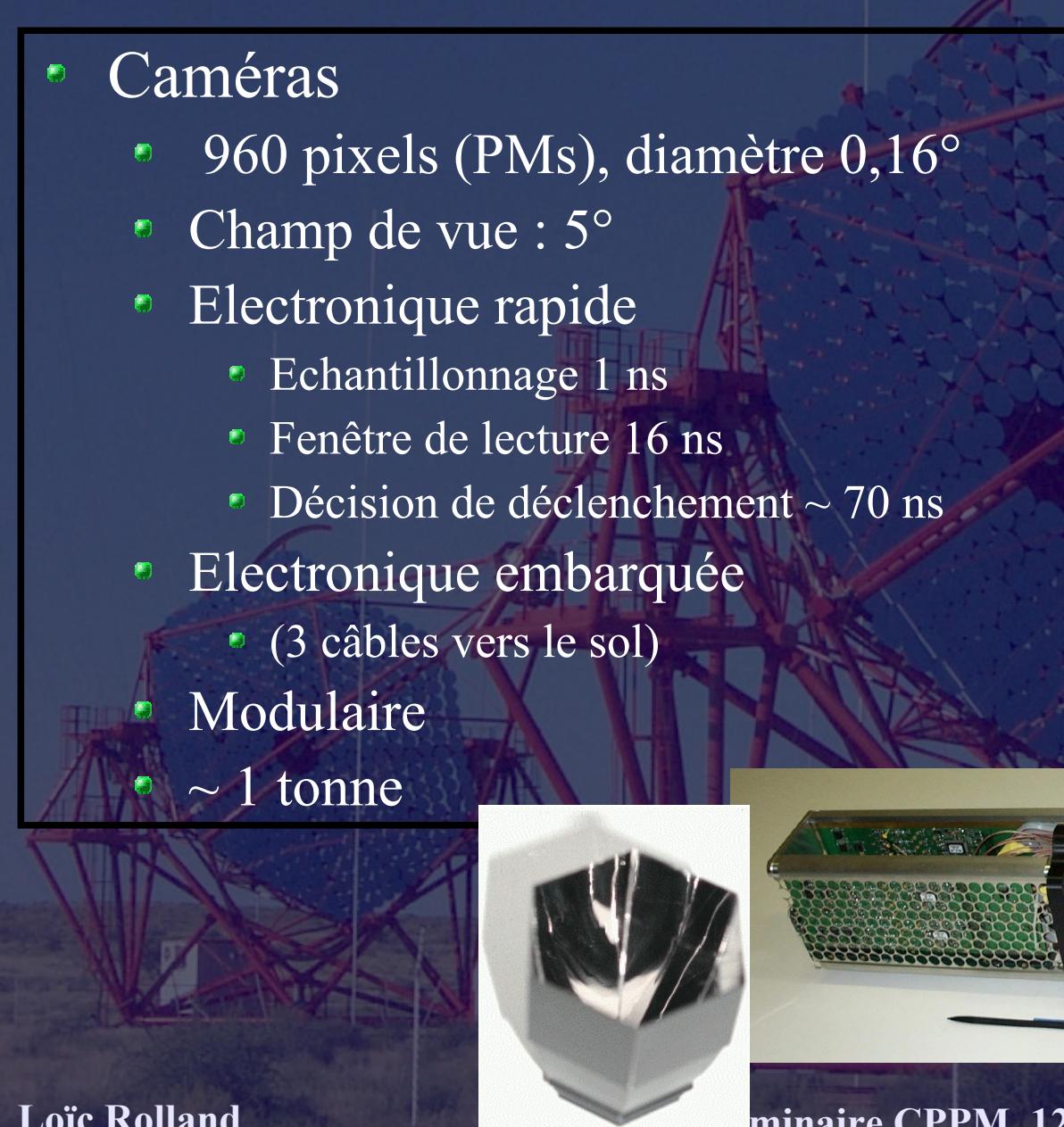
- Réflecteur Davies-Cotton segmenté, 12 m de diamètre
- Focale : 15 m
- PSF du miroir $\sim 9'$ sur axe
- Précision de pointe : 8"



H.E.S.S. : un instrument de 3ème génération

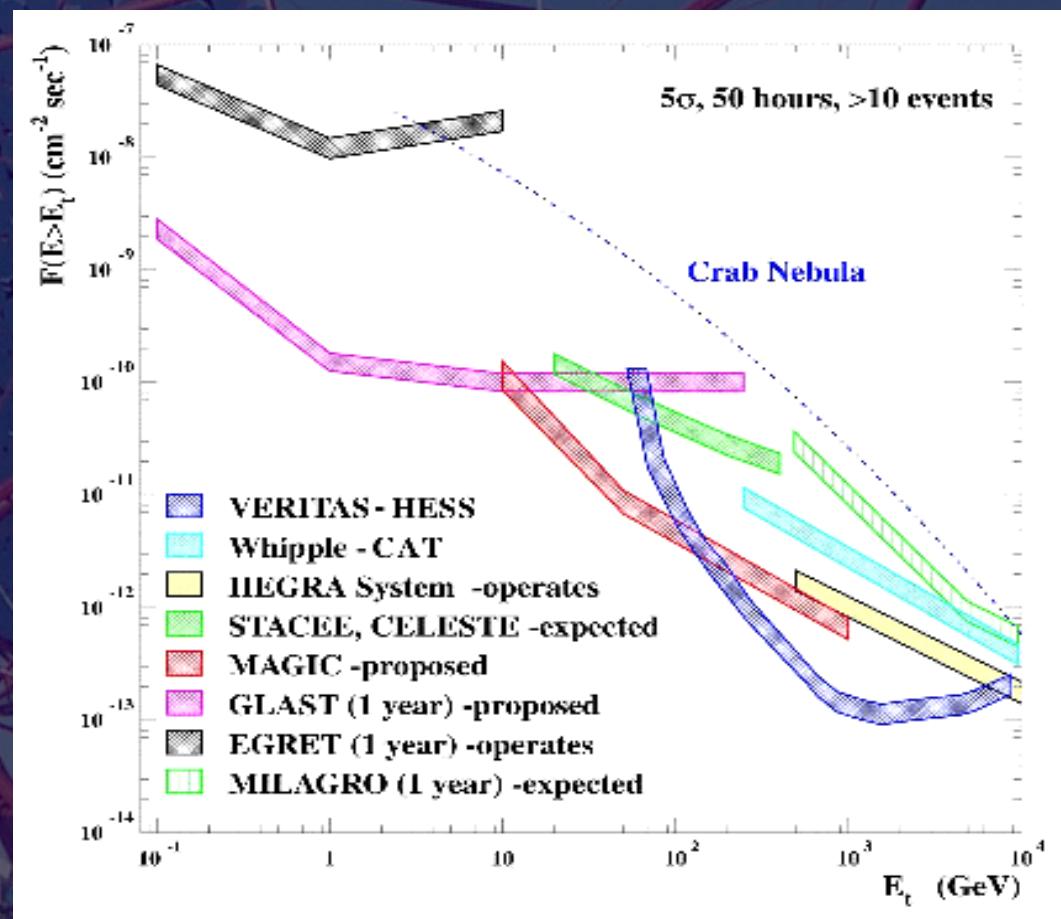
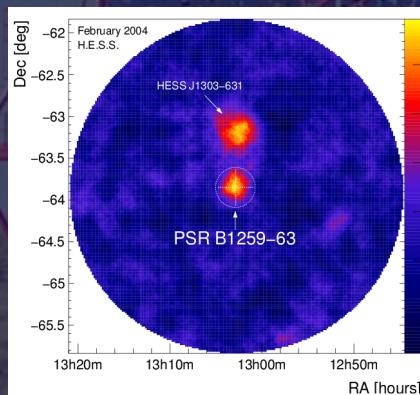
- Caméras

- 960 pixels (PMs), diamètre 0,16°
- Champ de vue : 5°
- Electronique rapide
 - Echantillonnage 1 ns
 - Fenêtre de lecture 16 ns
 - Décision de déclenchement ~ 70 ns
- Electronique embarquée
 - (3 câbles vers le sol)
- Modulaire
- ~ 1 tonne



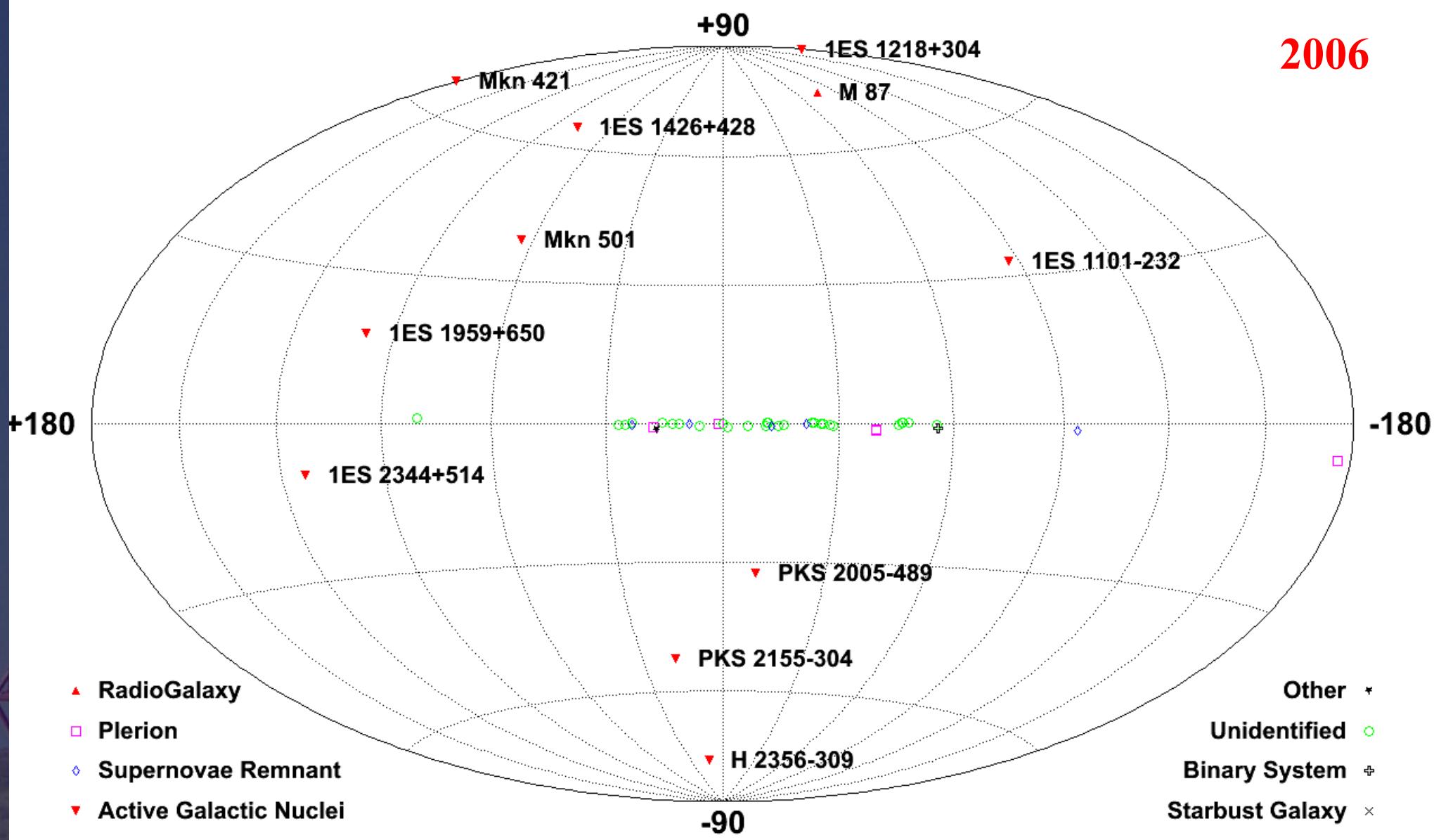
Les performances de H.E.S.S.

- Seuil ~ 100 GeV au zénith
- Résolution angulaire $< 6'$ gerbe à gerbe
- Résolution en énergie $\sim 15\%$
- Détection Nébuleuse du Crabe au zénith :
 - 0,01 Crabe : ~ 25 h
 - 0,05 Crabe : ~ 1 h
 - 0,10 Crabe : ~ 15 min
 - 1,00 Crabe : ~ 30 s



Le ciel gamma de très haute énergie

2006



SOURCES GALACTIQUES

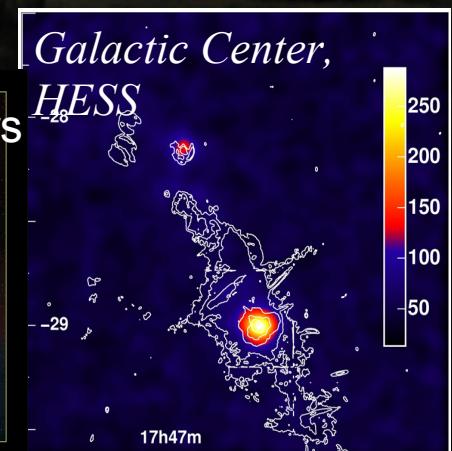
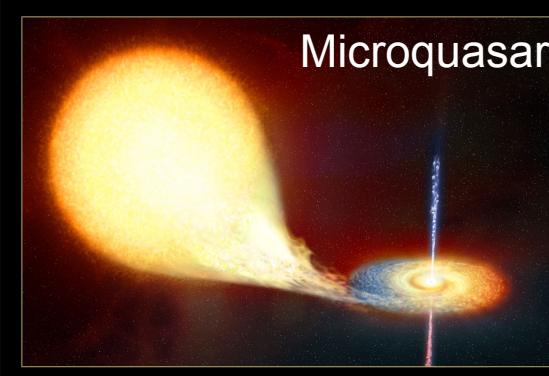


Observations systématiques du plan galactique

Plérions et restes de supernovae

Binaires X

Région du Centre Galactique

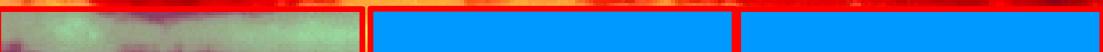


Observations du plan galactique

- Plan galactique : $|b| < 6^\circ$
- Mosaique 2004 : $\sim 200\text{h}$ en 400 pointés (4 mois), $|l| < 30^\circ$

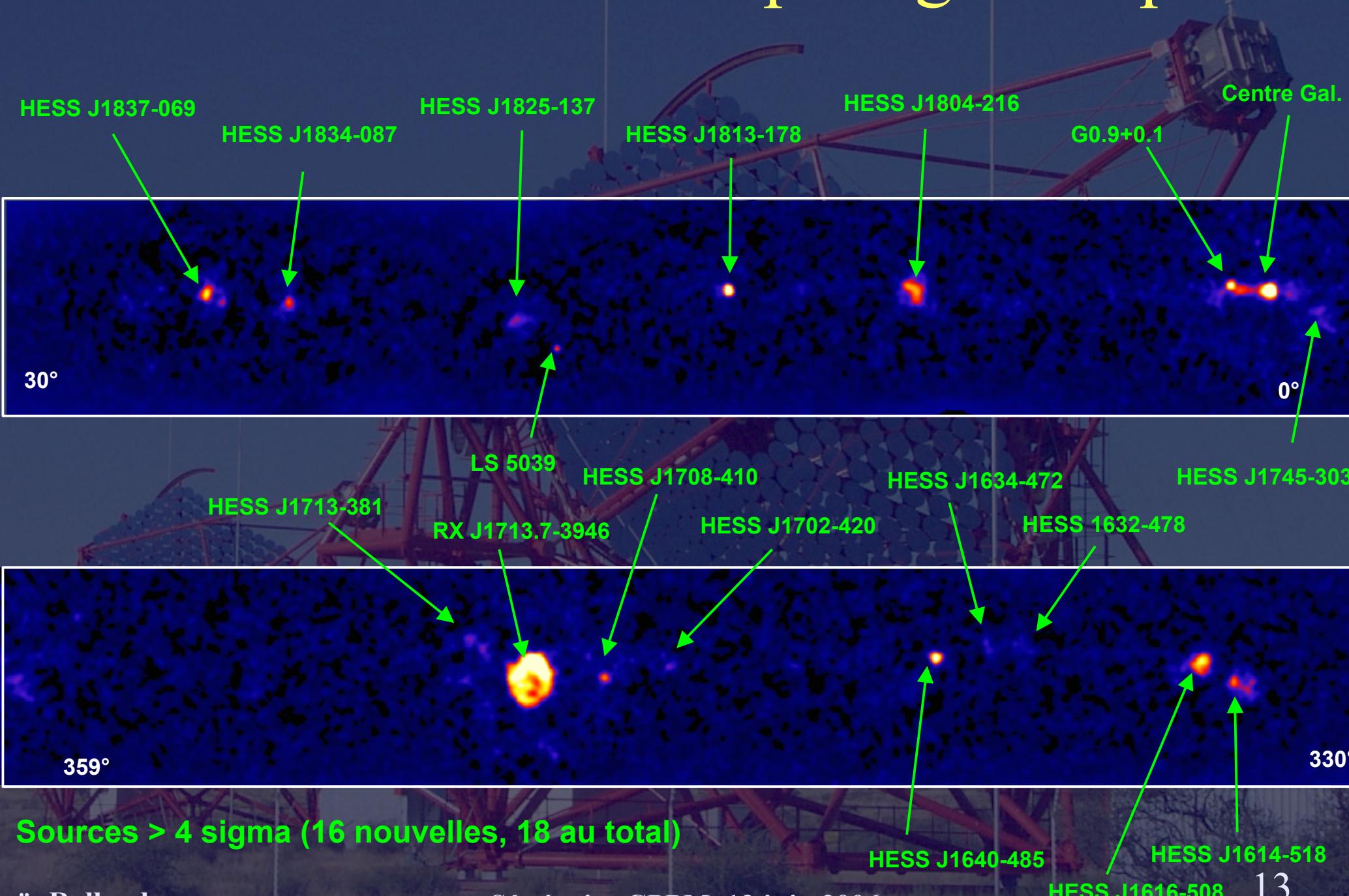
EGRET

Région observée par H.E.S.S.



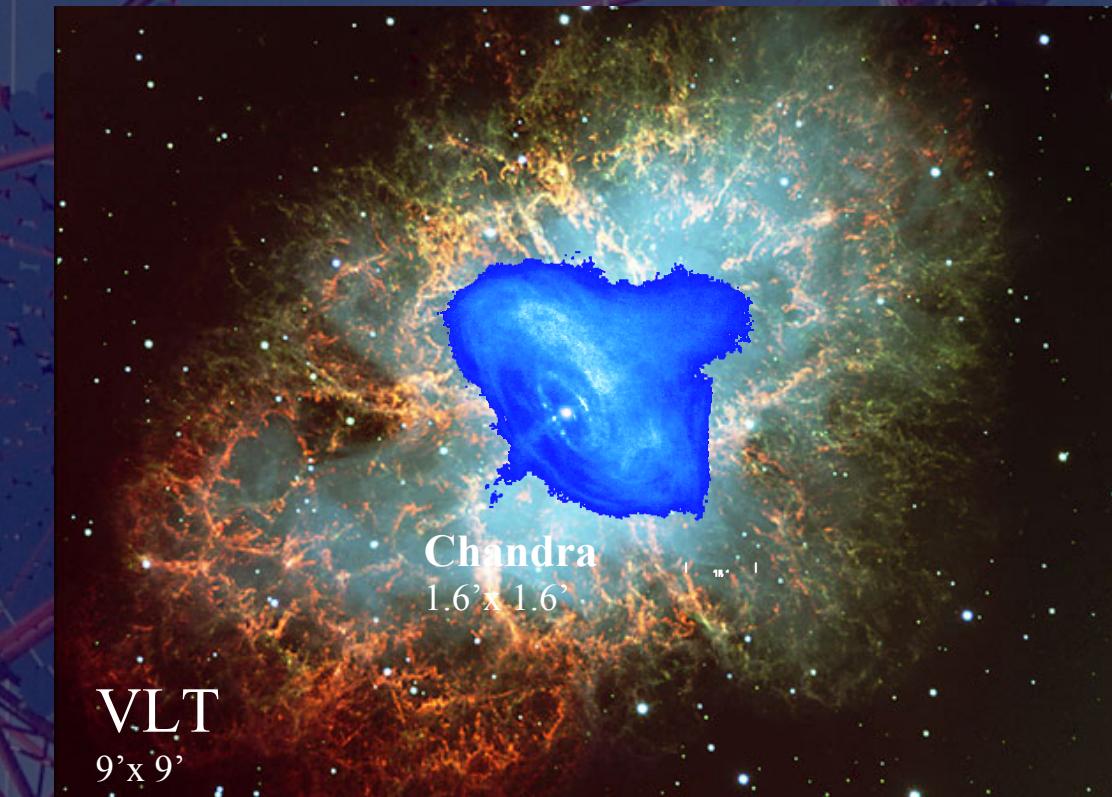
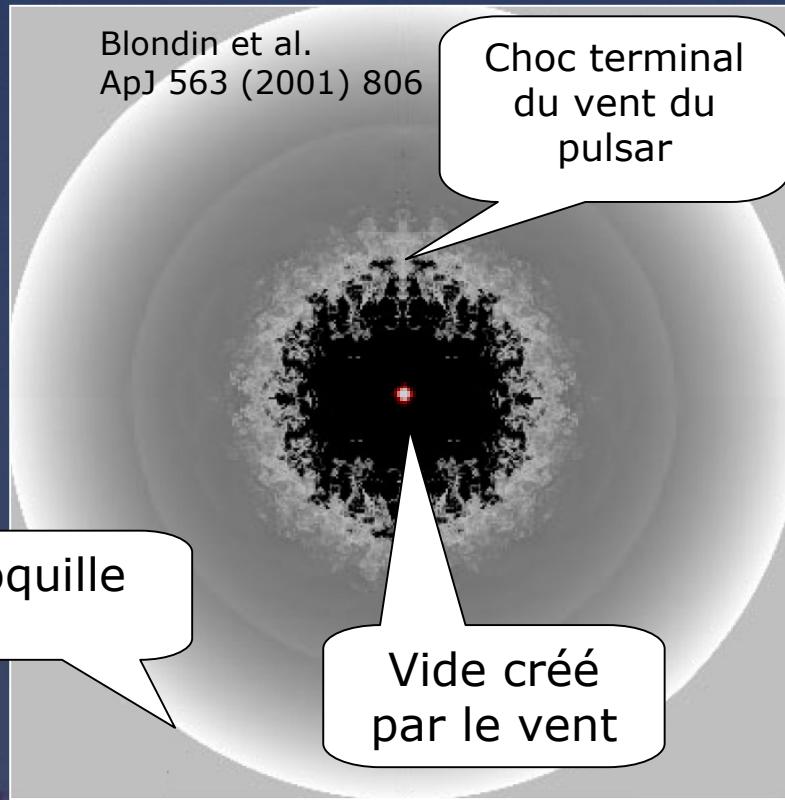
Scan galactique -

Nouvelles sources du plan galactique

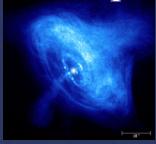


Plérions (nébuleuses de pulsar)

- Nébuleuse synchrotron générée par un pulsar



- Vent du pulsar : e^- , e^+ , (hadrons ?).
Comment sont-ils accélérés ? Champ B ?

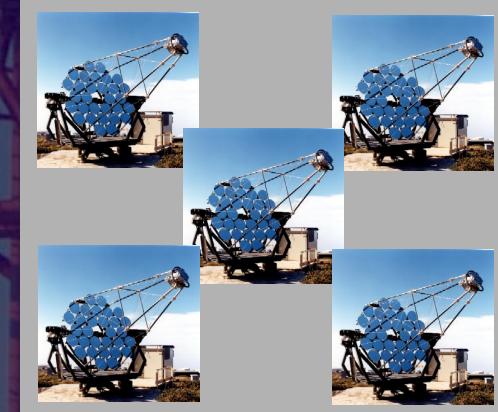


La nébuleuse du Crabe

- Chandelle standard de l'astronomie γ .
Première source au TeV (1989), source stable



Detection de gamma du TeV en provenance du Crabe
Whipple 1989: 50 h d'observation



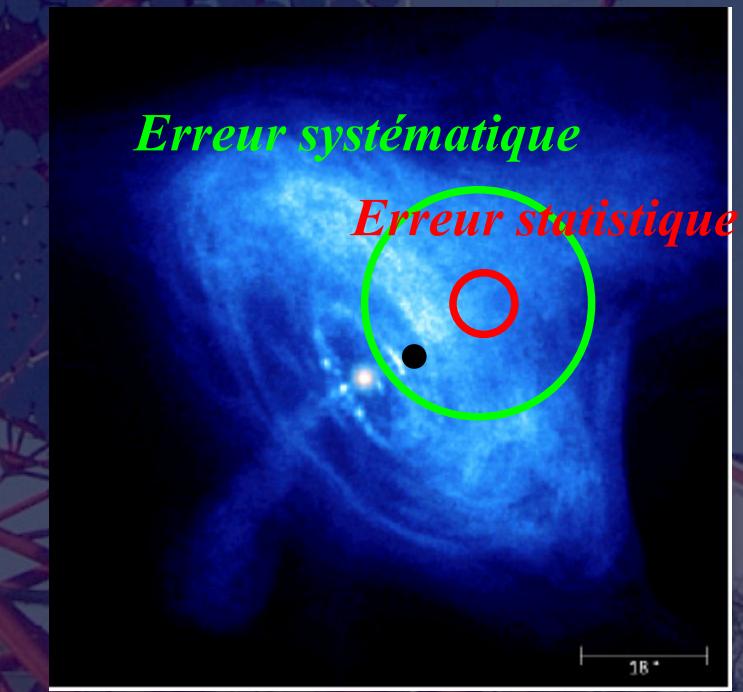
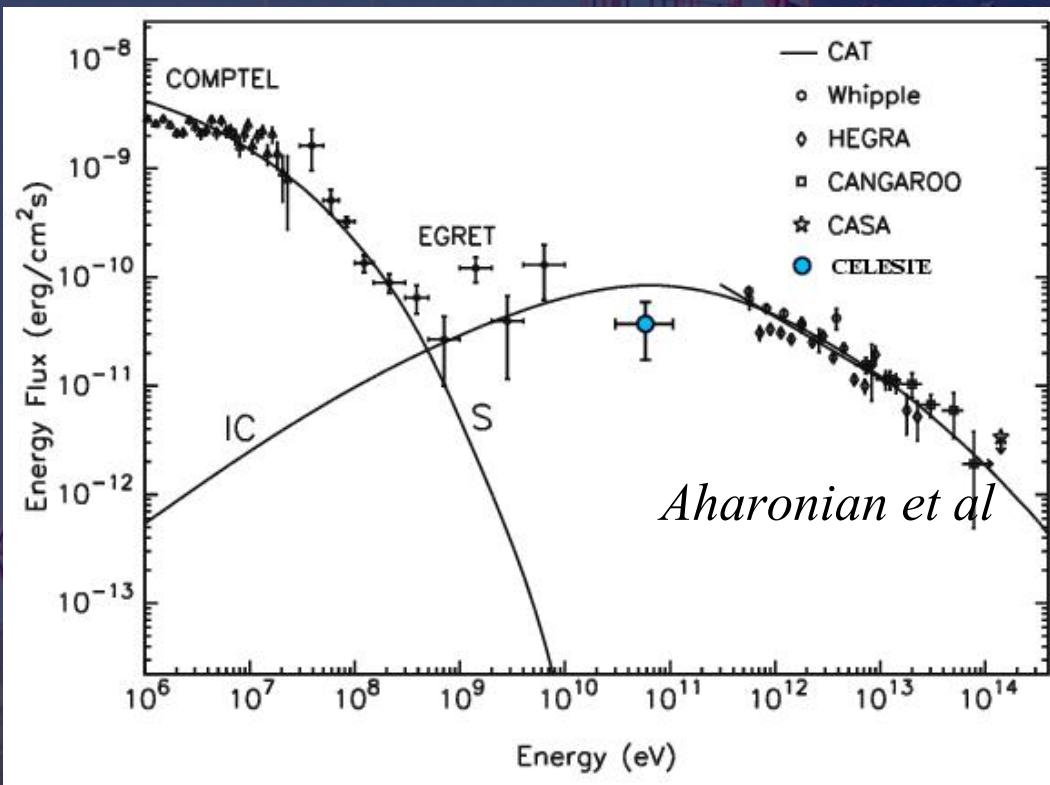
HEGRA 1997:
15 min

HESS 2004:
30 sec

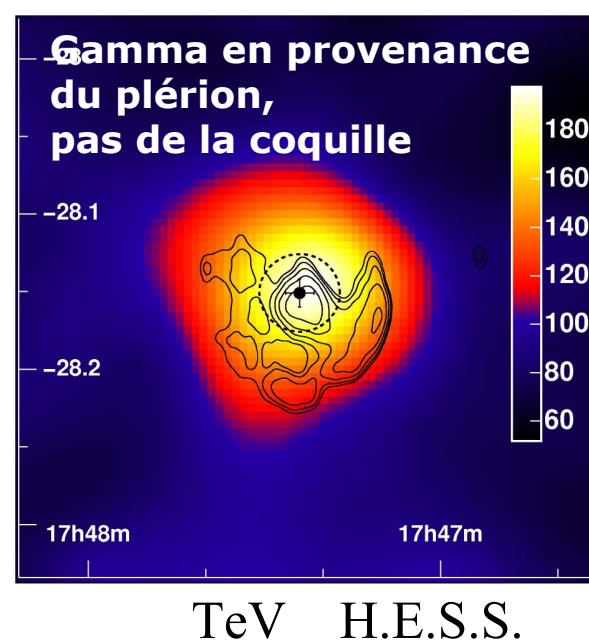
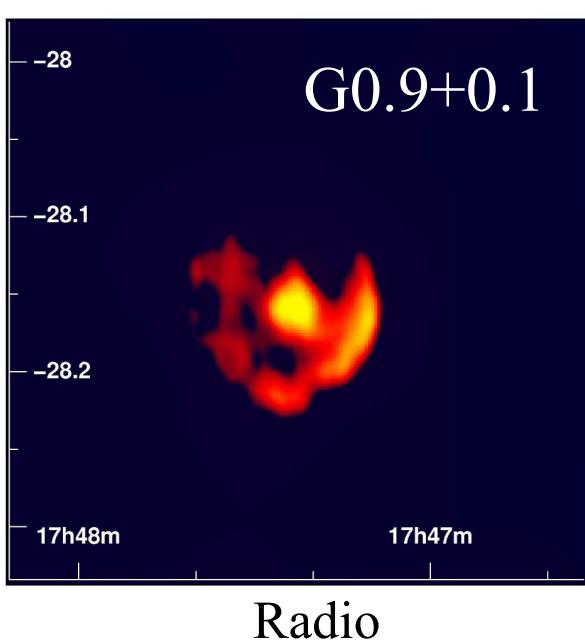
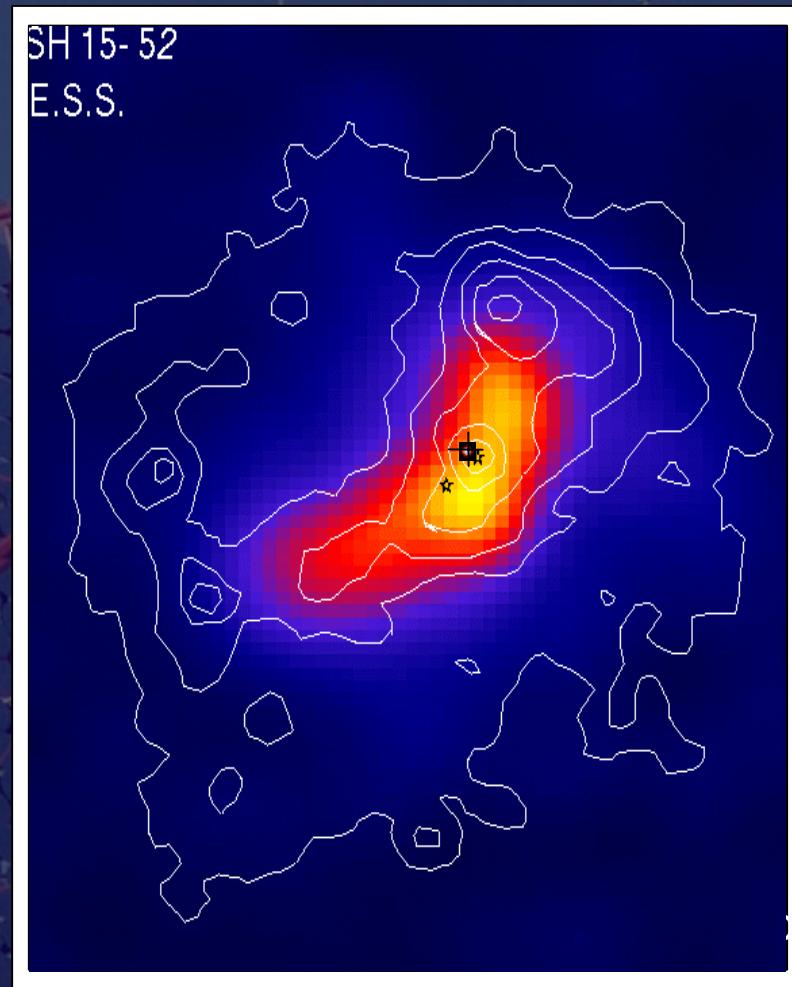
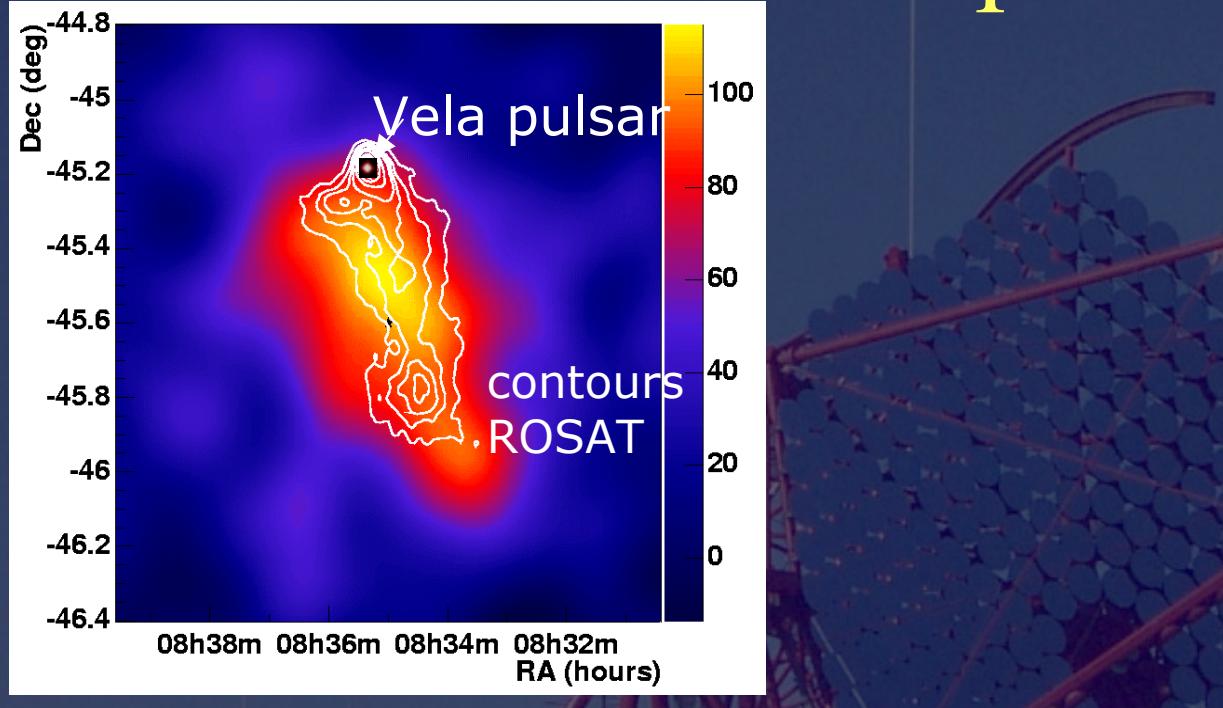


Le Crabe en gamma

- Modèle synchrotron (X) + inverse Compton (TeV)
- Spectre de 50 GeV (Celeste) à 80 TeV (HEGRA)
Energie de coupure ?
- Position compatible avec le centre de gravité de l'émission X



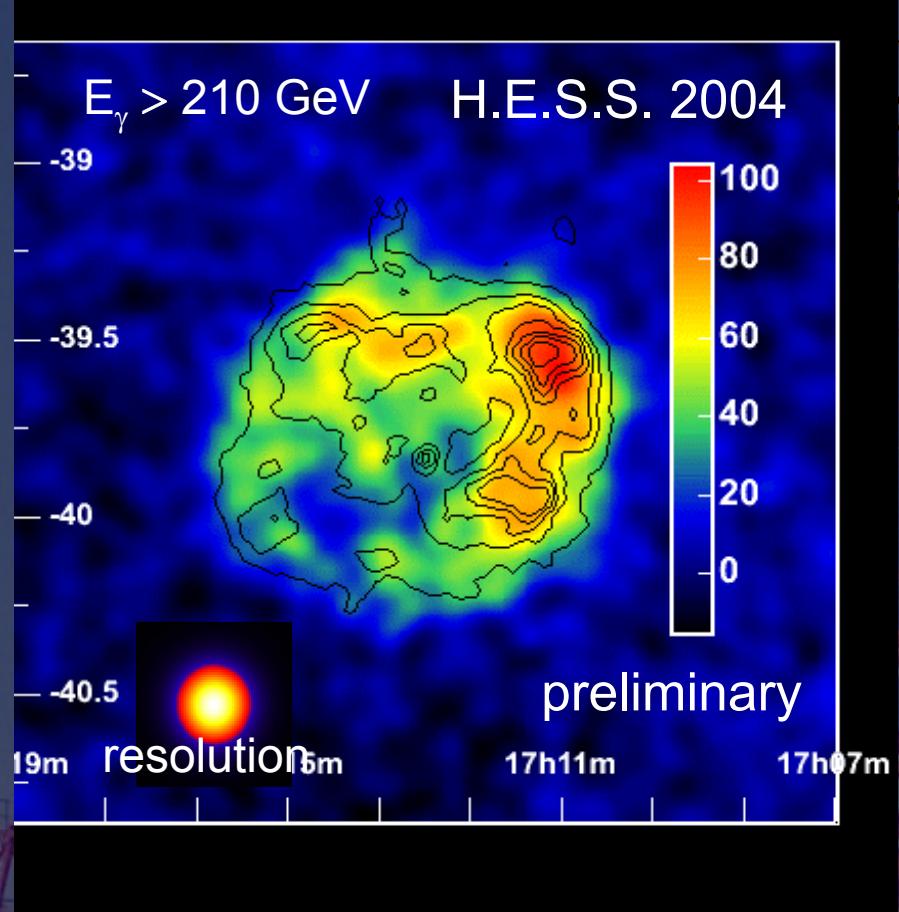
Autres plérions



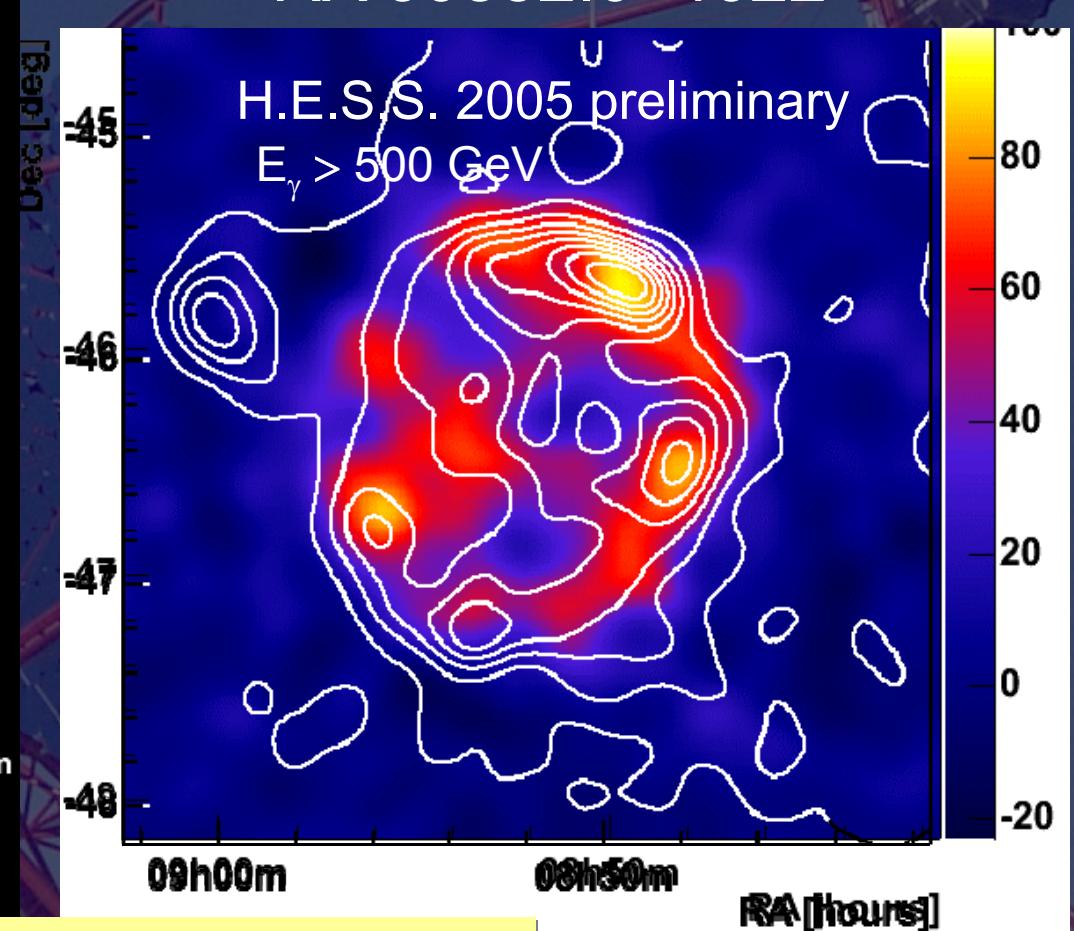
MSH 15-5-02
Premières observations de
plérions étendus

Restes de supernovae en coquille

RX J1713.7–3946



RX J0852.0–4622



Forte corrélation X-gamma

- Particules accélérées jusqu'à au moins 100 TeV dans les coquilles...
Mais sont-elles des protons/noyaux ou des électrons?

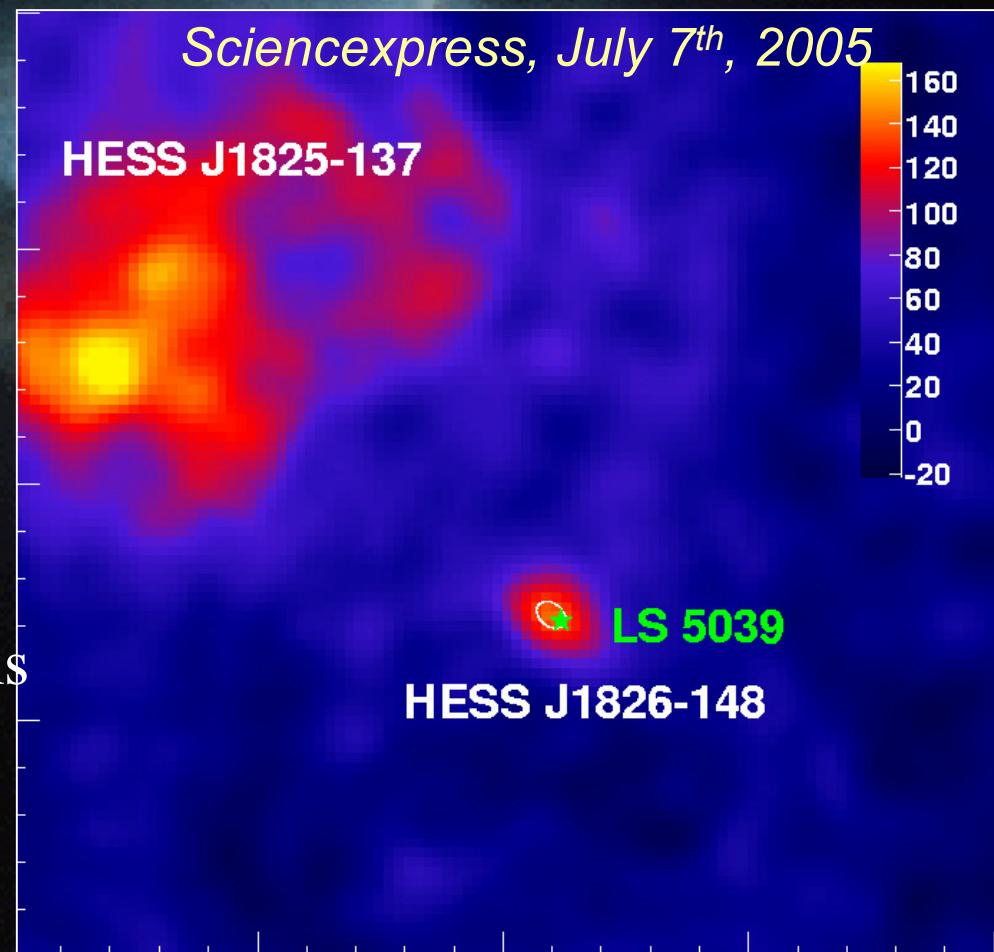
La binaire X LS5039 : le premier micro-quasar détecté au TeV

Accretion d'une étoile sur un trou noir de masse stellaire
⇒ échelle réduite d'AGN dans notre galaxie

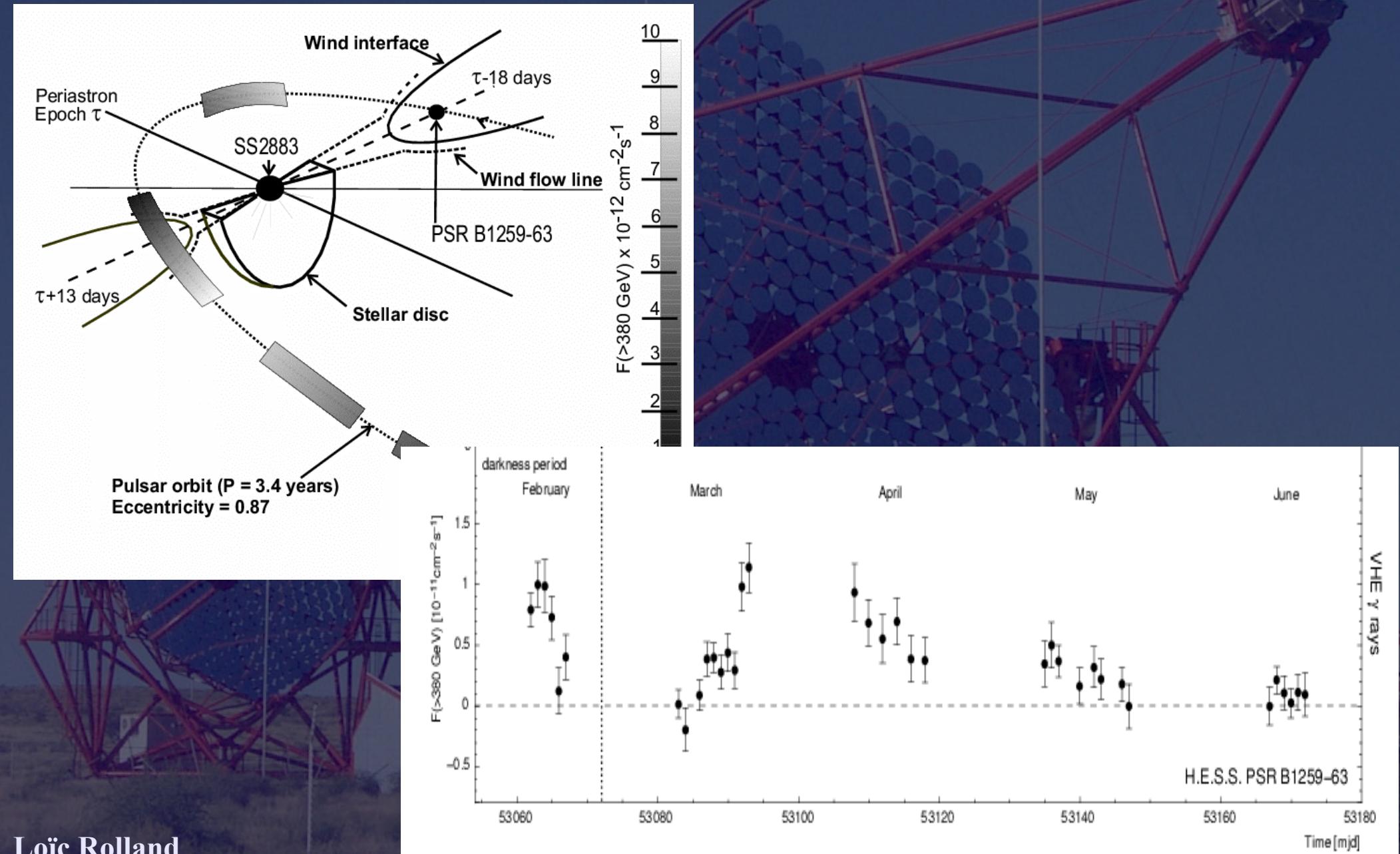
- Problématique principales :
 - Dynamique de l'accrétion
 - Production des jets
 - Accélération d'électrons vs. hadrons

Accélération de particules à
 >10 TeV établie !

Confirmé en 2005

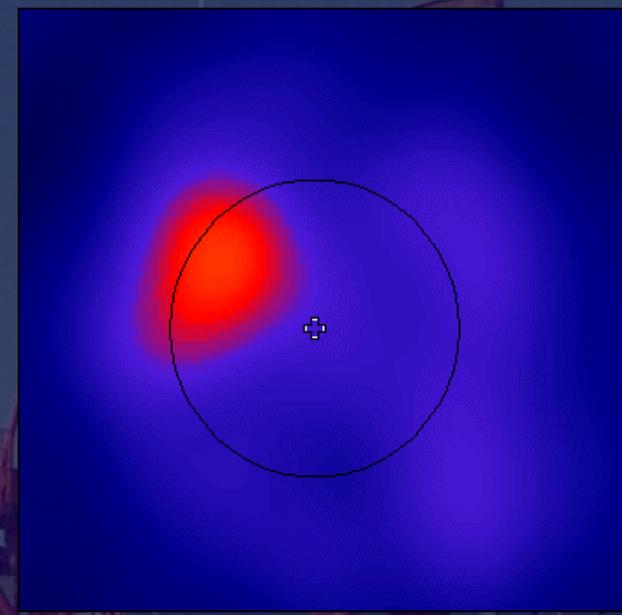


Première binaire au TeV : PSR B1259-63



... un nouveau type de sources ?

rayons
radio
X
TeV



- étendues
- spectre dur, $\Gamma \approx 2$
- émission stable

Quatre sources : TeV J2032+4130 (HEGRA)

HESS J1303–631, HESS J1616–508

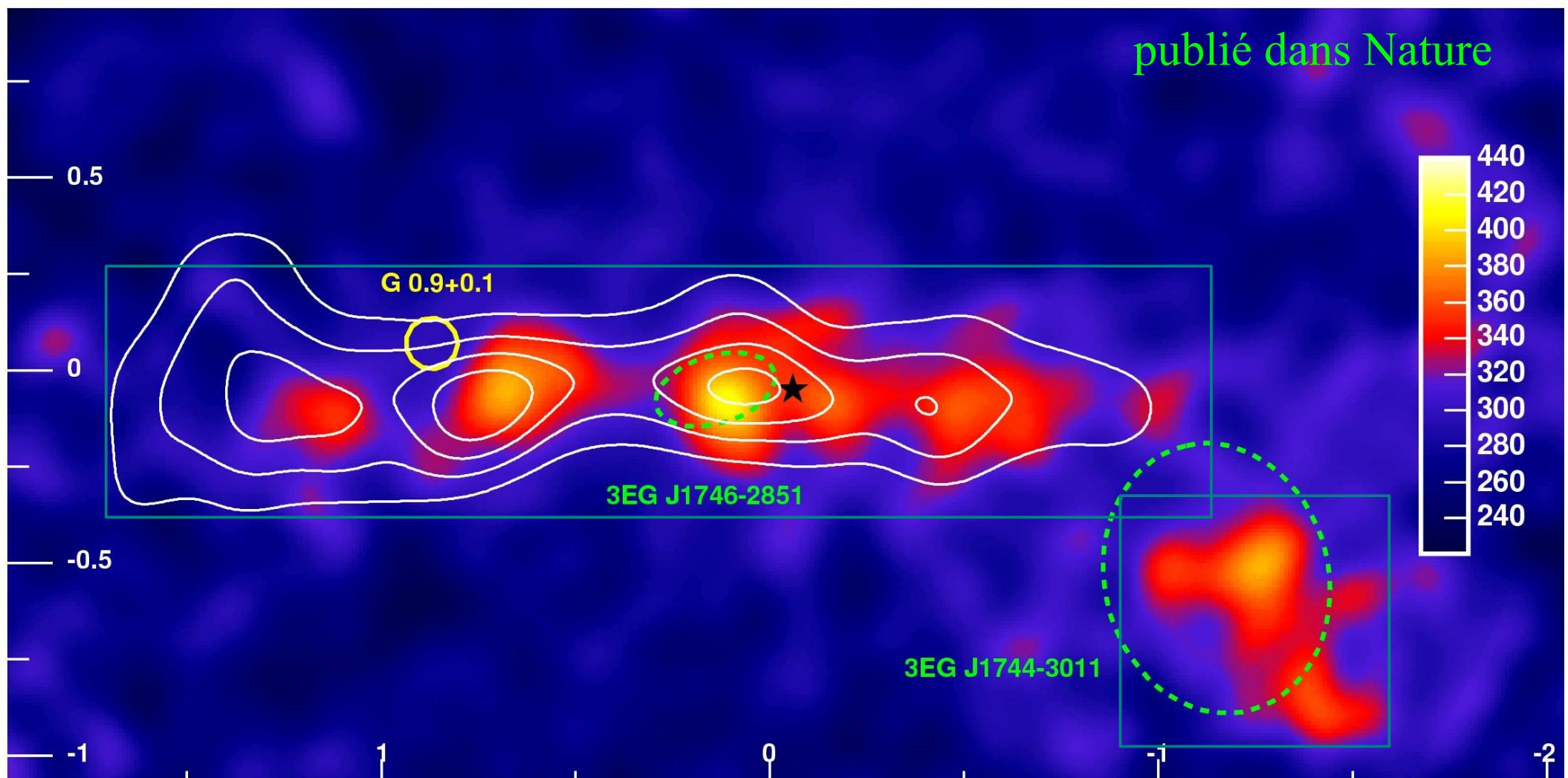
HESS J1708-410,

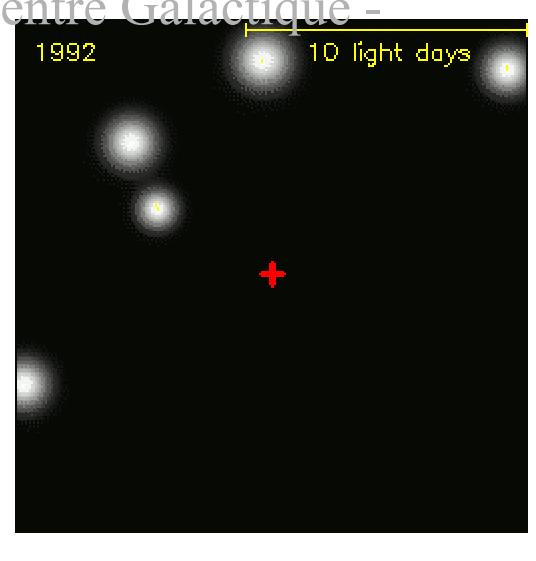
More to come...

Quelles sont ces sources ? Accélèrent-elles des hadrons ?

La région du Centre Galactique

publié dans Nature





HESS J1745-290

Chandra GC survey
NASA/UMass/D.Wang et al.

CANGAROO (80%)

H.E.S.S. (95%)

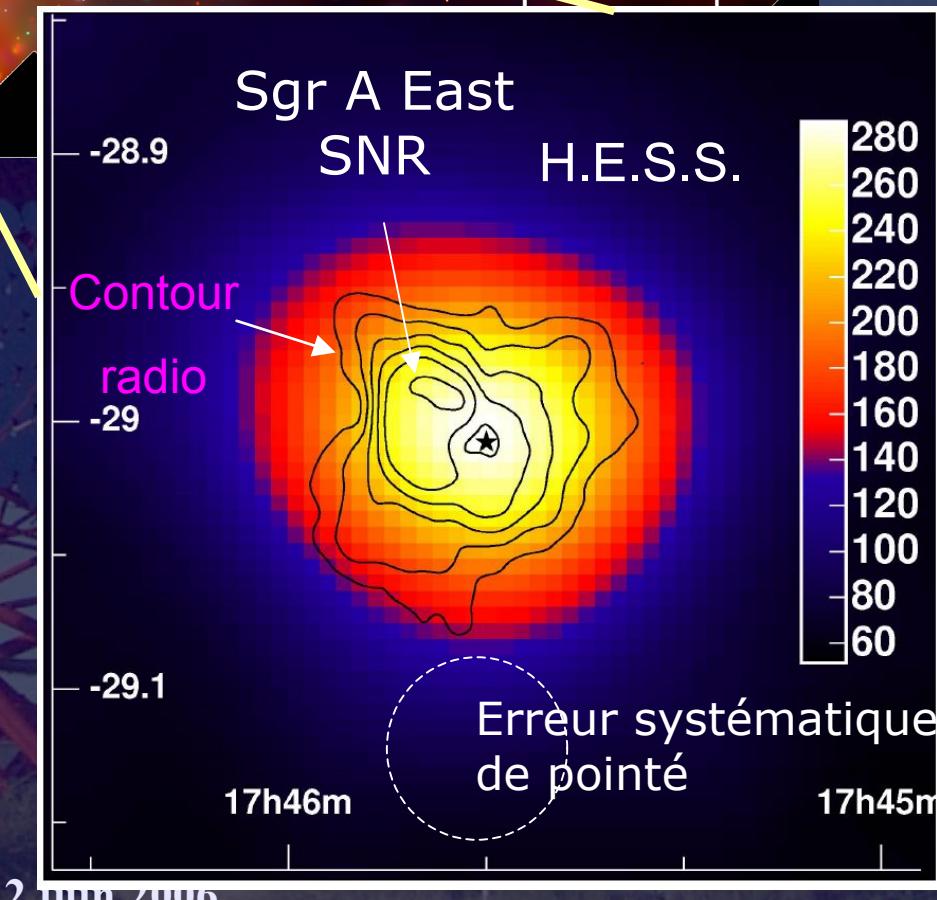
DéTECTé par MAGIC
également

Contours from Hooper et al. 2004

Candidats astrophysiques :

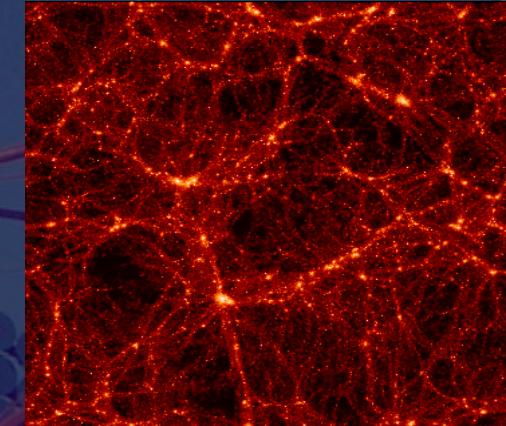
- trou noir Sgr A* de $3 \times 10^6 M_{\odot}$
 - Chocs dans le disque d'accrétion
- Reste de supernova Sgr A East
 - Ondes de chocs en expansion
 - Découverte récente d'un plérion (X)

Où annihilation de matière noire ?



Recherche de matière noire

- Matière noire non baryonique : 23% du contenu de l'Univers
- Prédiction : DM forme des halos liés sous l'effet de la gravité
- Annihilation de DM émet des gammas
- Flux γ d'annihilation attendu



$$\frac{d\Phi}{dE}(\Delta\Omega, E) = F_0 \times \frac{dN}{dE} \times \frac{\sigma v}{\sigma v_{ref}} \times \left(\frac{1 \text{ TeV}}{m_{DM}}\right)^2 \times \bar{J}(\Delta\Omega) \times \Delta\Omega$$

- H.E.S.S. : $\Delta\Omega = 10^{-5} \text{ sr}$

Modèle de physique des particules

Modèle de halo

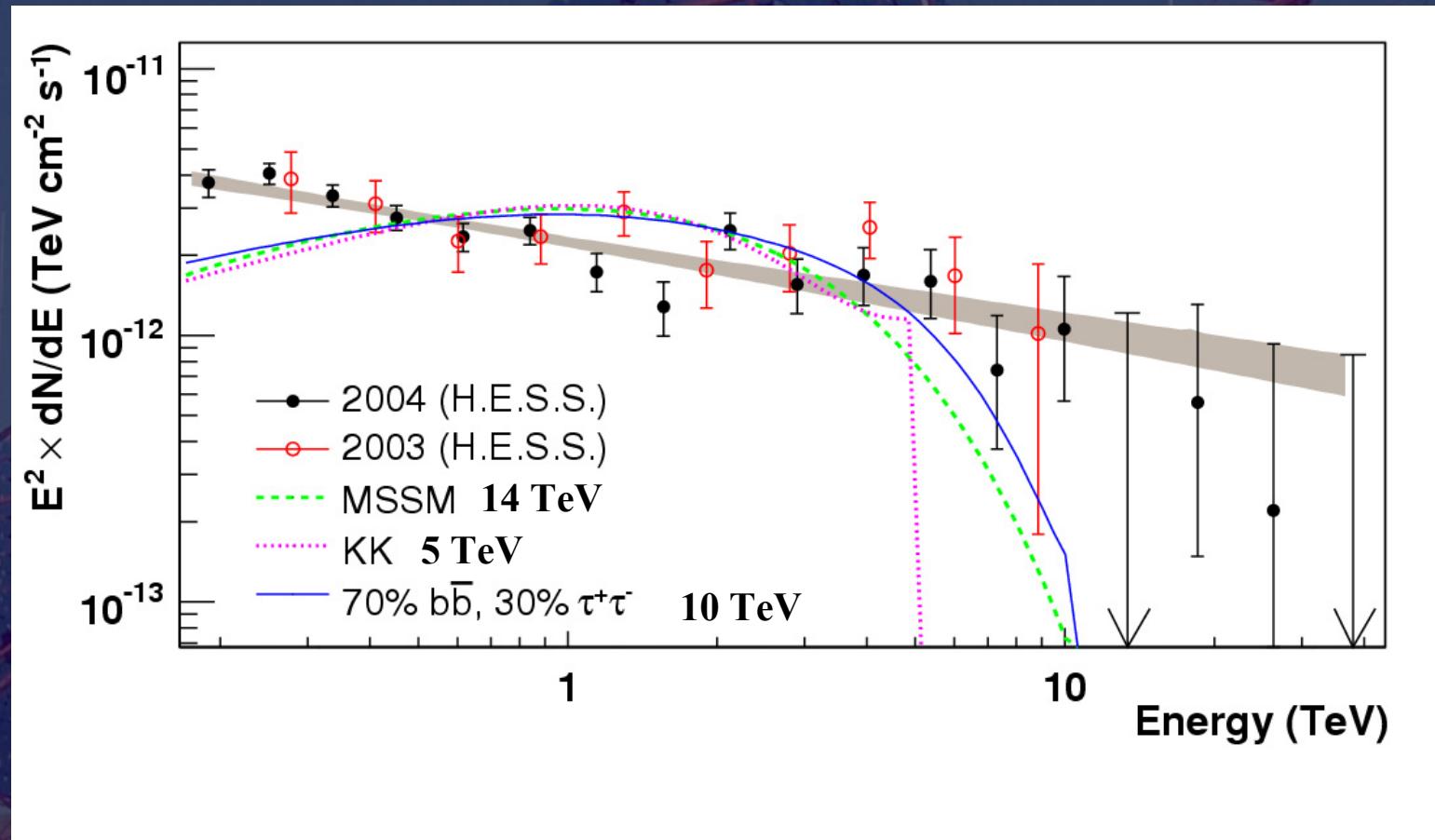
Spectre en énergie

Distribution angulaire

HESS J1745-290

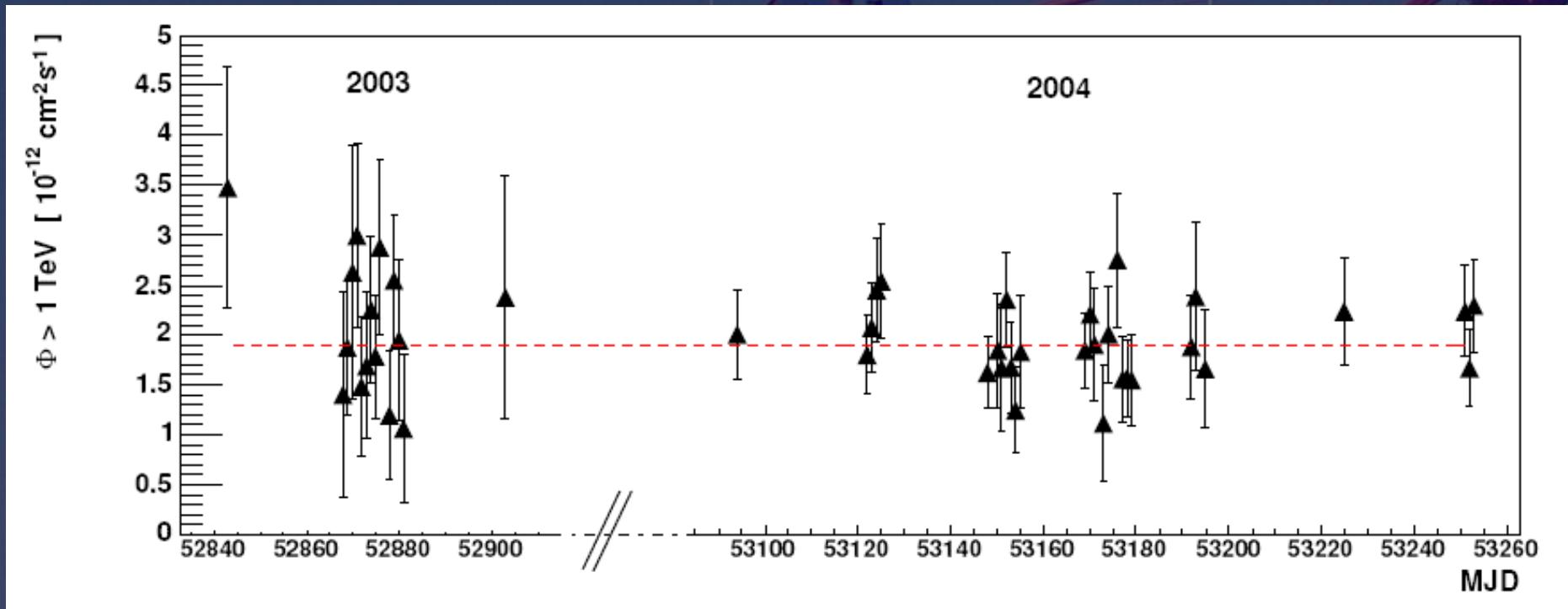
Spectre et matière noire

- Données 2004



warf)

Variabilité de HESS J1745-290 ?

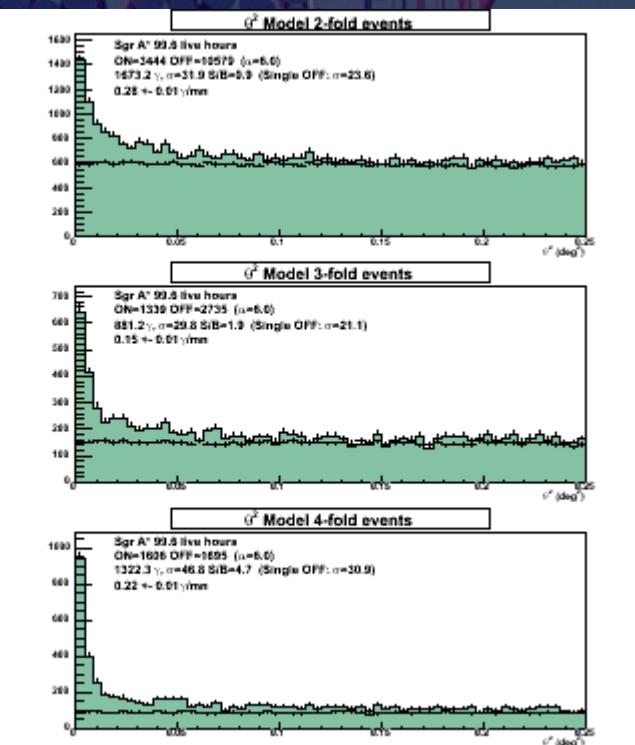
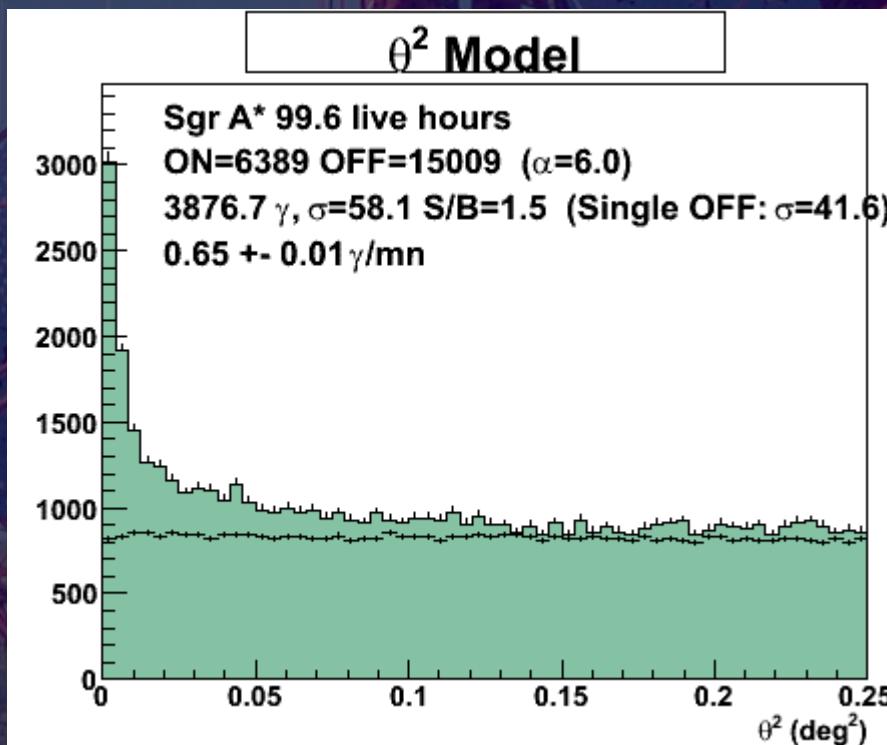


- Pas de variabilité significative

HESS J1745-290 : perspectives

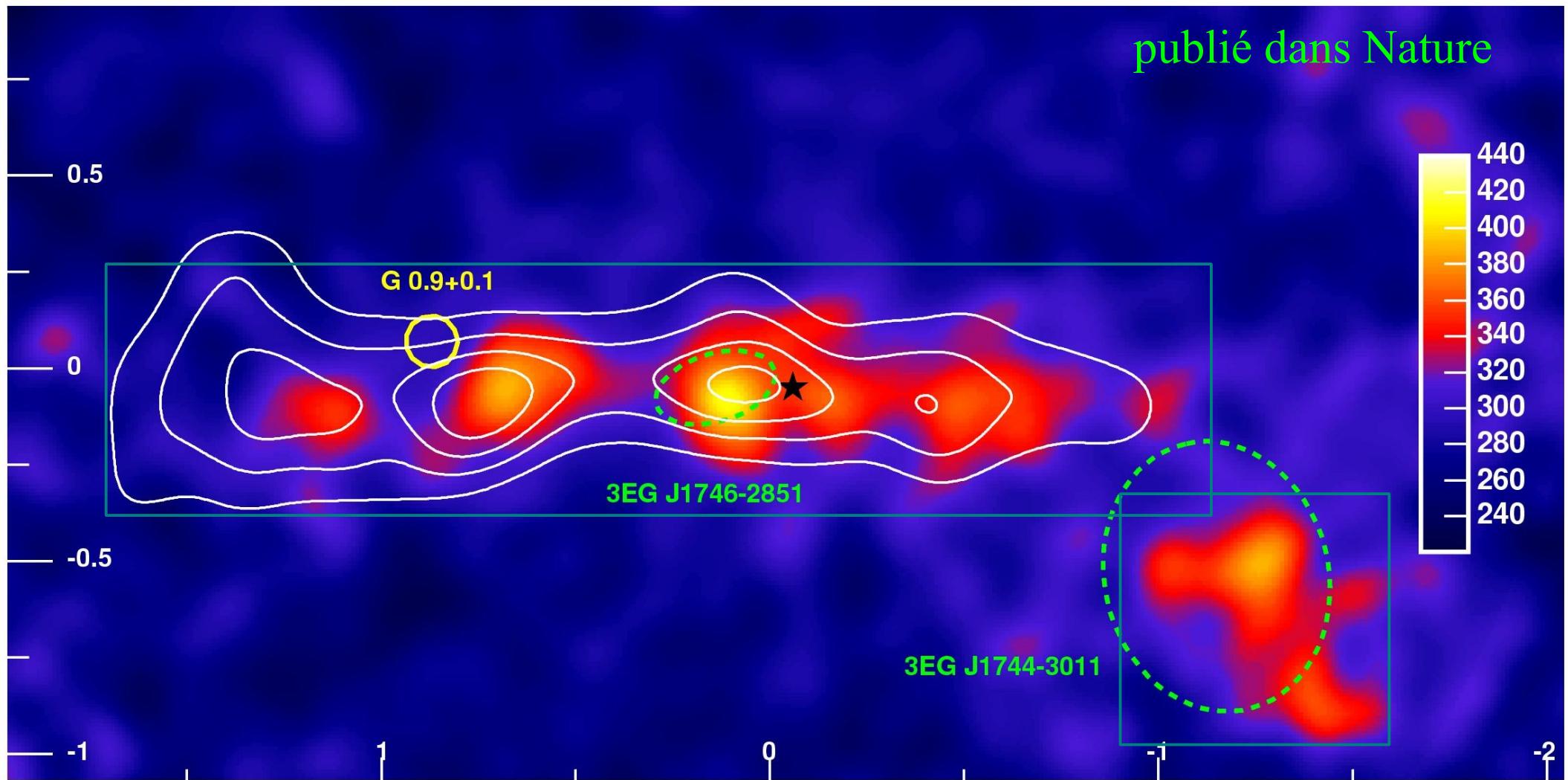
- Total 100 h d'observations (2004+2005)
- 50 h supplémentaires en 2006

- Spectre et variabilité
- Extension de la source
- Position de la source
- Etude multi-longueurs d'onde
(Chandra, INTEGRAL,...)



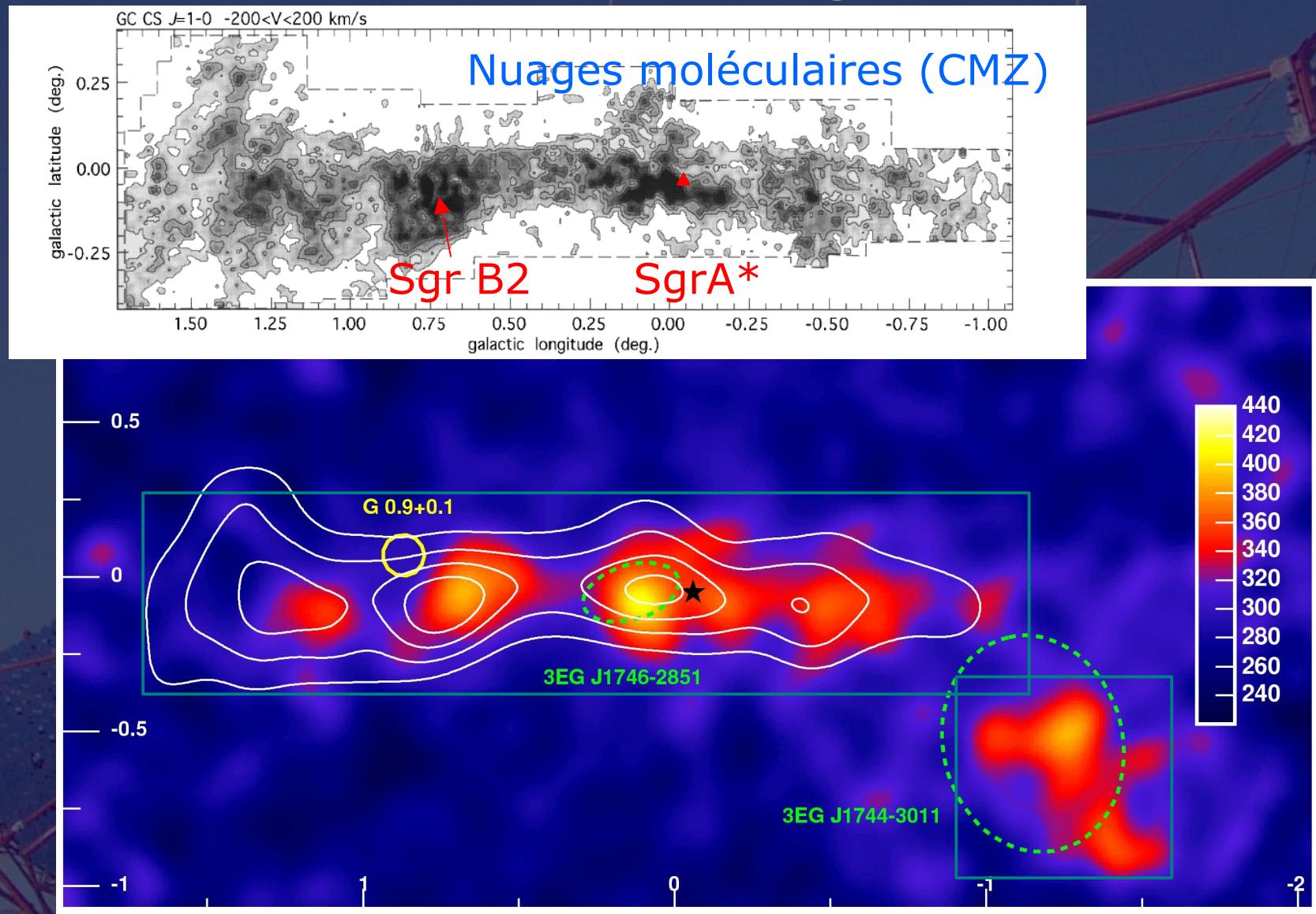
Centre Galactique -
Emission diffuse au Centre Galactique

publié dans Nature



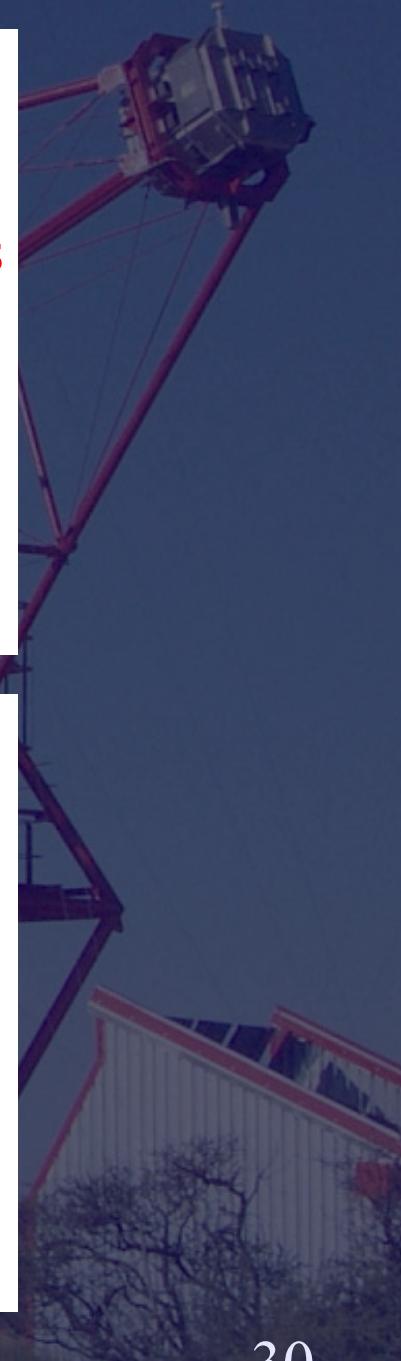
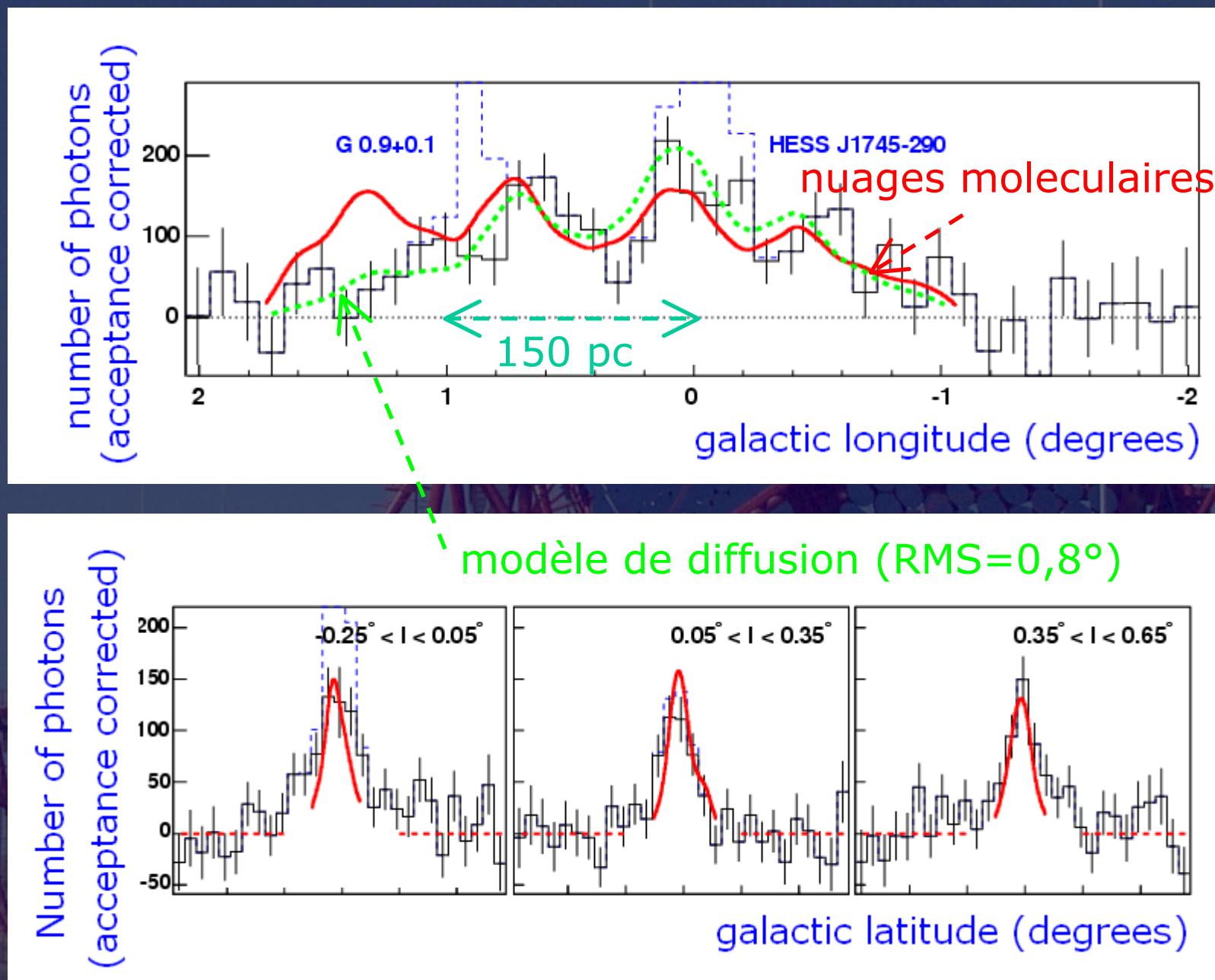
Centre Galactique -

Corrélation avec les nuages moléculaires

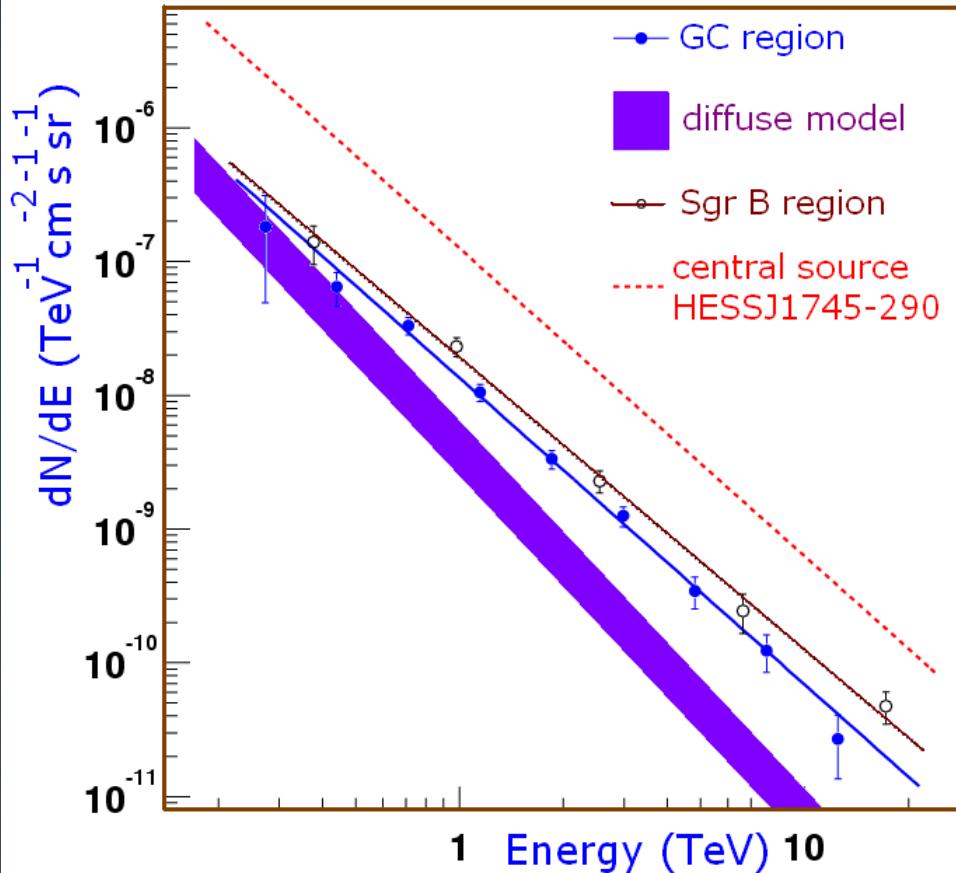


- Corrélation avec la densité de nuages moléculaires sur $\sim 2^\circ$ (~ 150 pc)
 - trace la présence de RCs hadroniques !!

Corrélation avec les nuages moléculaires



Spectre de l'émission diffuse



- Spectre observé :
- loi de puissance
- indice spectral : $\Gamma \sim 2.3$
- indépendant de la position

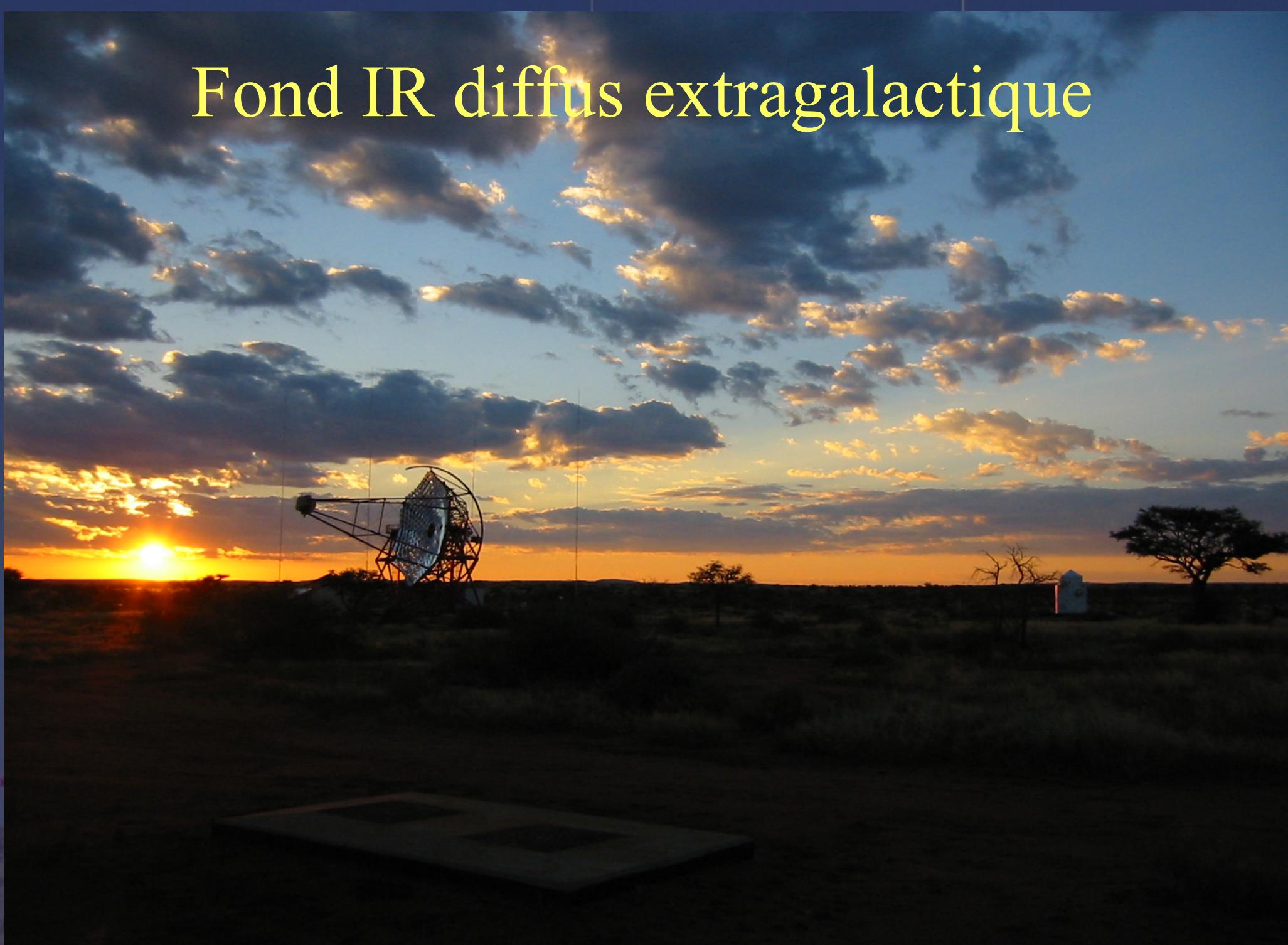
- Corrélation émission γ /densité massique
 - $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ \rightarrow spectre $\gamma \approx$ spectre des protons
 - spectre des protons plus dur qu'au voisinage du soleil ($\Gamma \sim 2.7$)

Une interprétation possible...

- Interaction de protons diffus ?
 - spectre de protons plus dur que le spectre local
→ source de RCs proche
 - temps de diffusion sur $150 \text{ pc} \sim 10\,000 \text{ ans}$
→ âge du reste de supernova Sgr A Est
- Somme de sources d'électrons ?
 - ~ 100 plérions (taille $\sim 5'$), non détectés en X
→ très improbable !

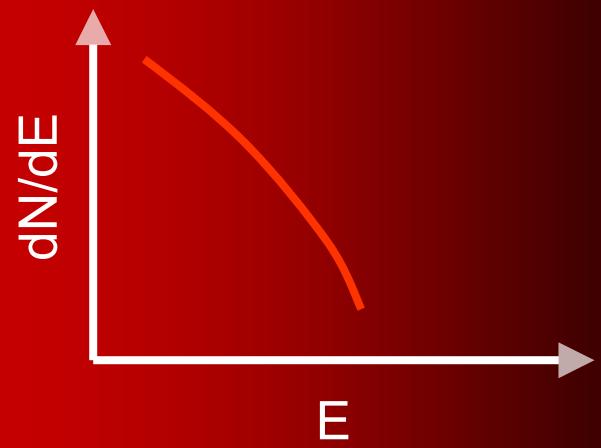
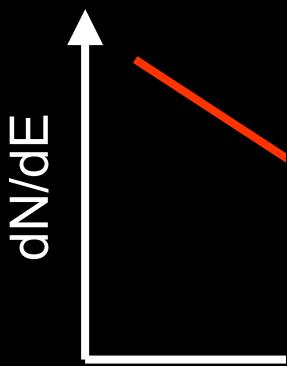
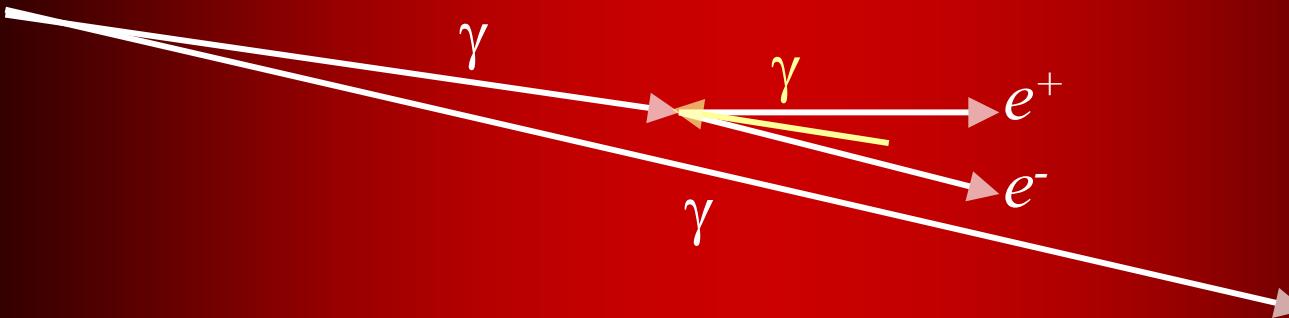


Fond IR diffus extragalactique



Fond IR diffus extragalactique

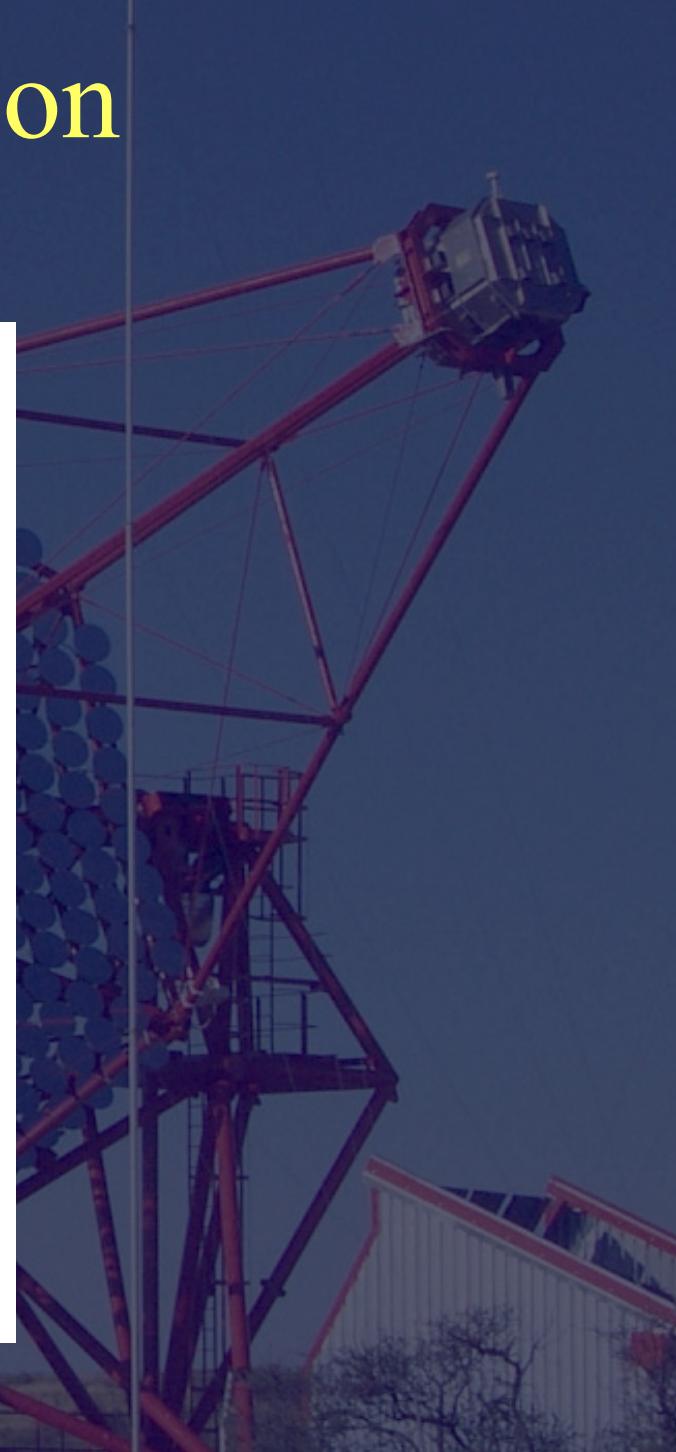
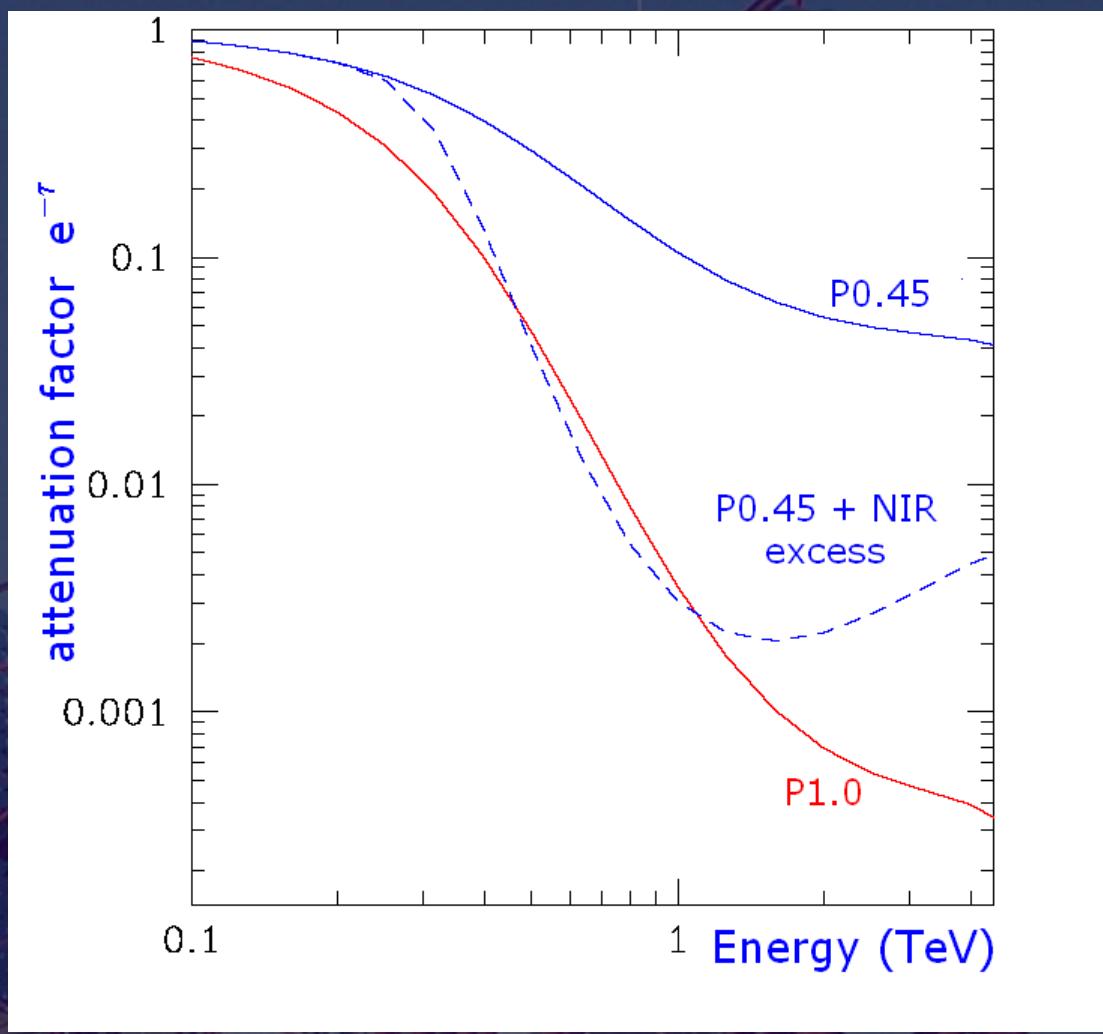
Absorption par (infrared) le fond de lumière (infrarouge) extragalactique (EBL) :
 $\gamma(\text{TeV}) + \gamma(\text{EBL}) \rightarrow e^+e^-$



Physique des objets compacts
accélération/absorption dans les jets,...

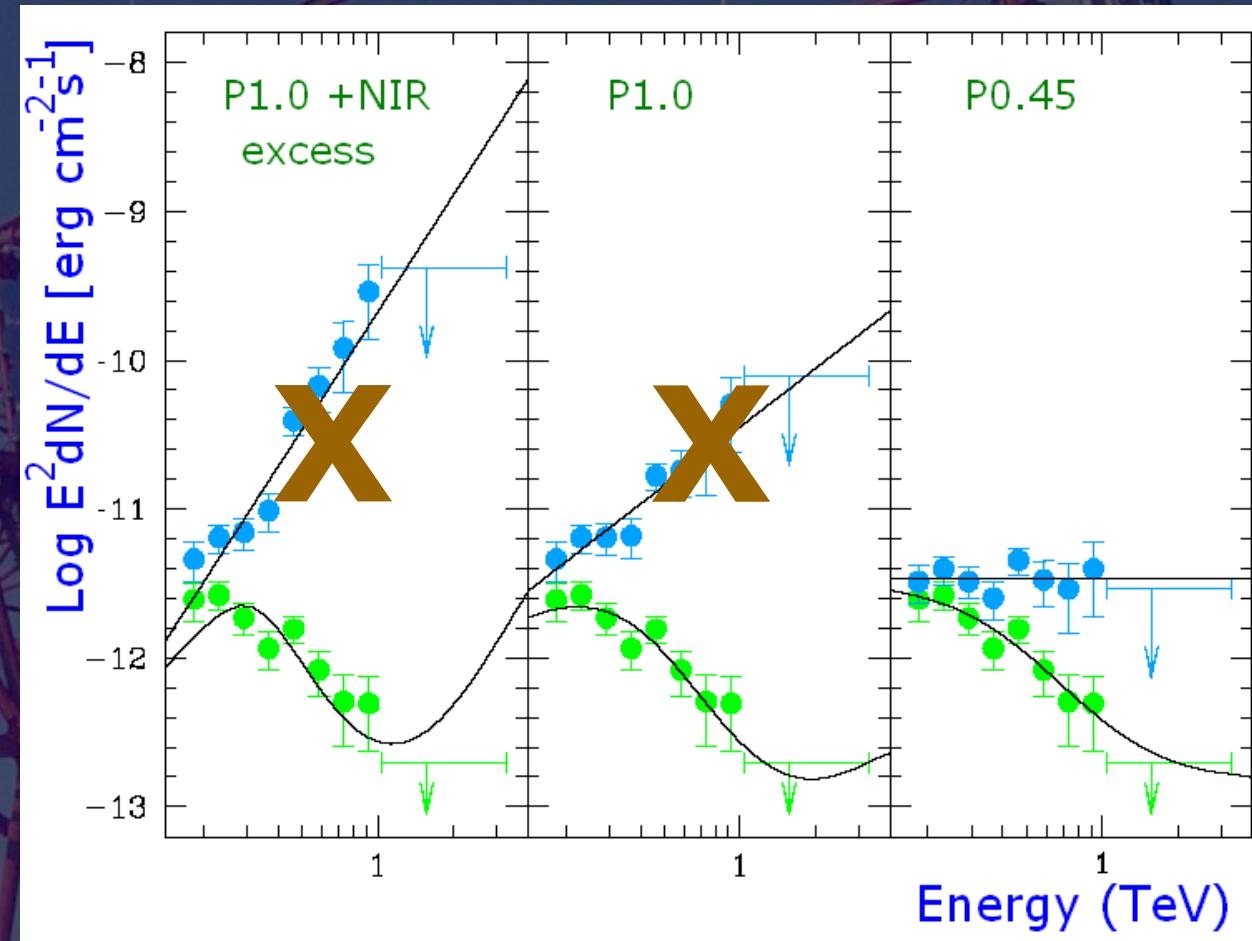
Mesures du fond IR
(→ Cosmologie)

Facteur d'atténuation



Spectre intrinsèque de H2356-309

- redshift de $z = 0.165$
 - 10σ en 40 h d'observation
 - indice spectral mesuré :
 - $\Gamma = 3,06 \pm 0,21$



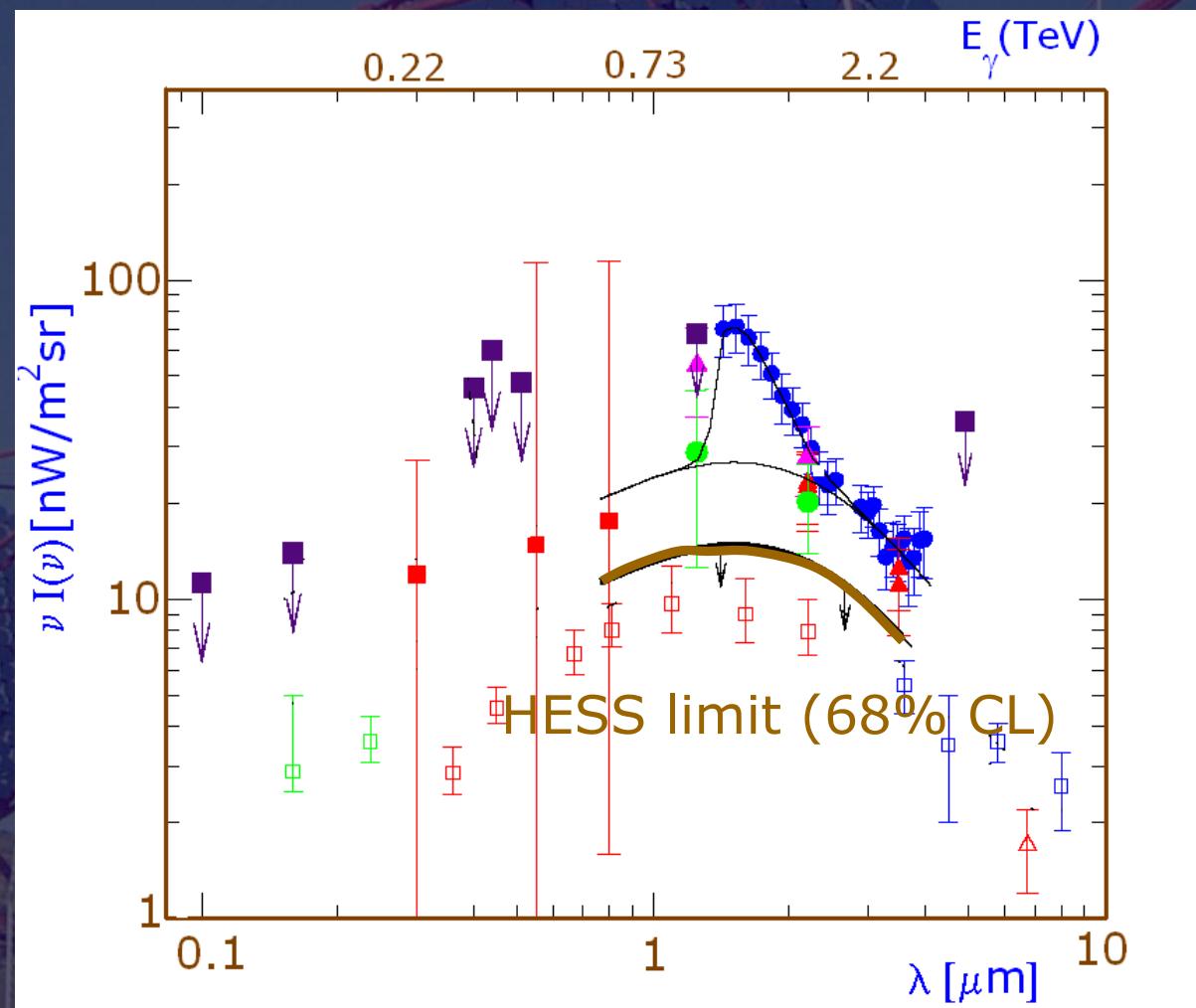
Autre AGN : 1ES 1101-232

$z=0.186$

AGN le plus lointain détecté au TeV !

Limites sur le fond de lumière extragalactique

- Limites supérieures de H.E.S.S. sont proches des limites inférieures provenant des comptages de galaxies



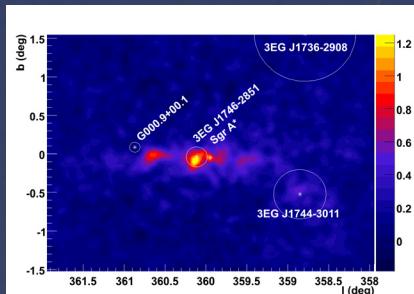
CONCLUSION

H.E.S.S. : détecteur **le plus sensible** actuellement !

nombreuses sources détectées, nouveaux types de sources

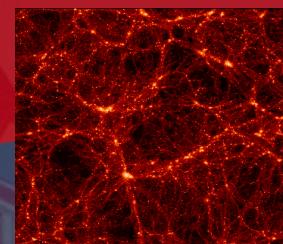
Première détection indirecte

de RC hadroniques du TeV hors du système solaire !



Pas de contrainte sur la **matière noire** au CG,

mais d'autres candidats en cours d'étude



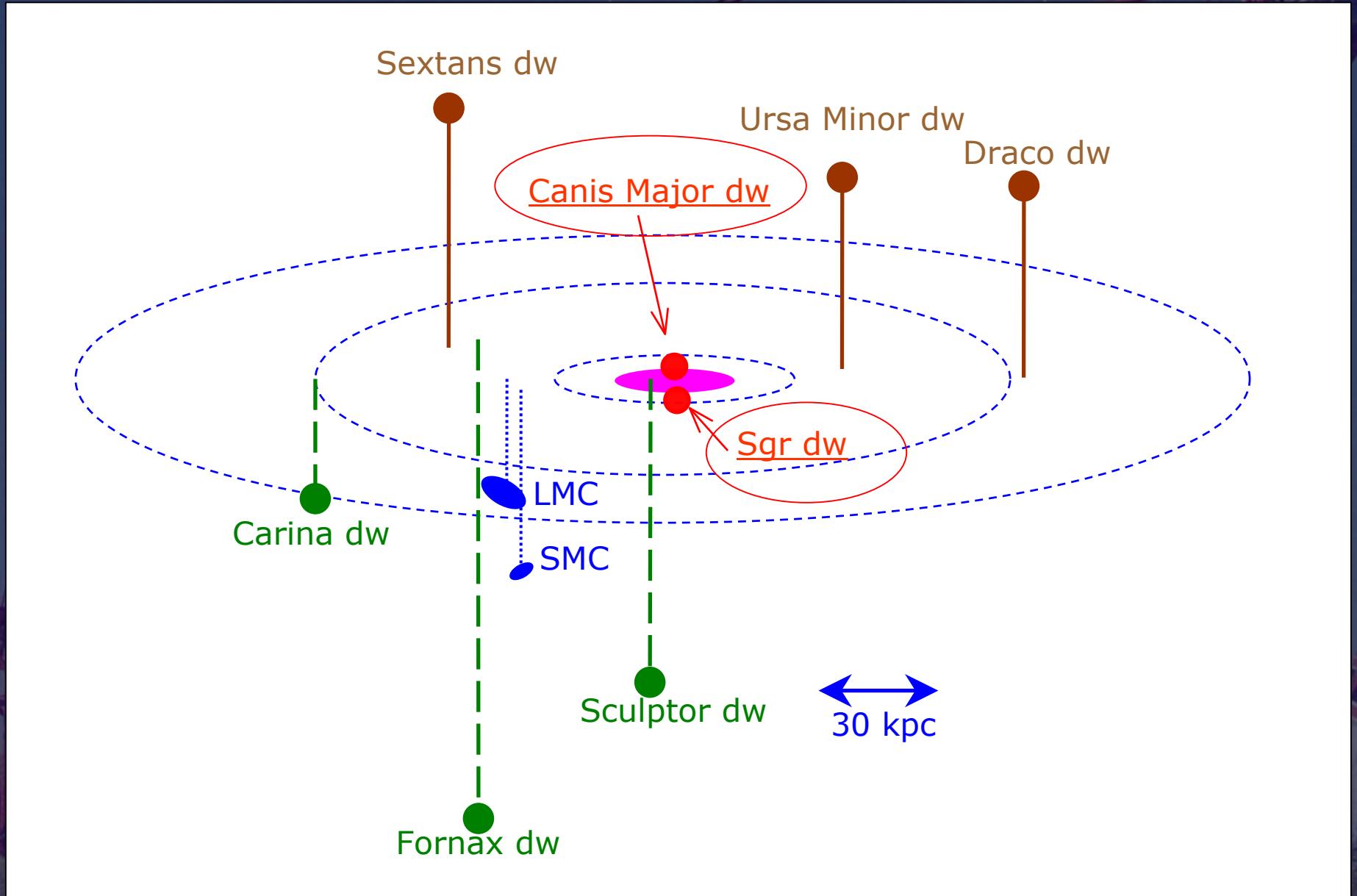
Contraintes sur le fond diffus de lumière extragalactique :

l'Univers serait plus transparent aux γ que ce que l'on pensait



D'autres source potentielles ?

Galaxies satellites de la Voie lactée



Sensibilité de H.E.S.S.

Flux des galaxies naines proches ~ flux en provenance du Centre Galactique

- Hypothèses
 - profil de halo de NFW
 - spectres DM

Modèle particule	Objet	Exposition	N_γ	$N\sigma$
'Meilleur' MSSM	Sgr A Dwarf	7.5 h	97.5	5.6
Kaluza-Klein	Sgr A Dwarf	7.5 h	6	0.3
'Meilleur' MSSM	Canis Major	5 h	342	24
Kaluza-Klein	Canis Major	5 h	16	1

→ Observations de Sgr A Dwarf et Canis Major en 2006

A photograph of a large satellite dish antenna in a field at sunset. The sky is filled with orange and yellow clouds. The dish is silhouetted against the bright horizon. In the background, there are some trees and a small white building.

ANALYSE DES IMAGES

Objectifs de l'analyse

- Sélection des images de gerbes électromagnétiques
 - Réjection des images de gerbes hadroniques

- Reconstruction des γ
 - direction
 - énergie

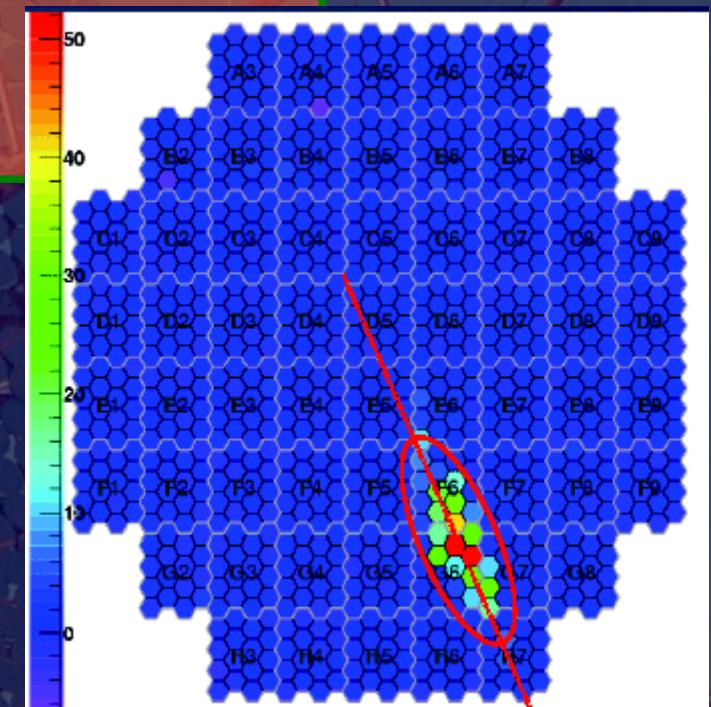
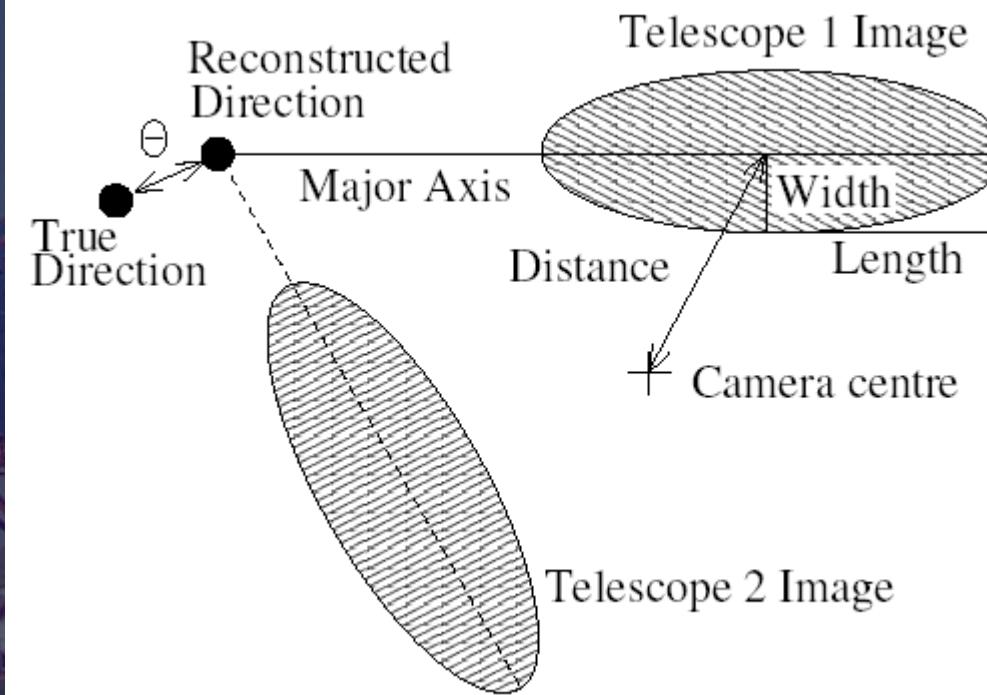
- Résultats
 - position
 - morphologie
 - spectre

Problématique du fond :
~1 gamma/minute
déclenchement de 400 Hz

Analyse “de Hillas”

Paramètres : moments d'ordre 1 et 2 des images (1984)

- longueur
- largeur
- distance au centre de la caméra
- amplitude



Nécessite un
nettoyage de l'image

Paramètres réduits moyens

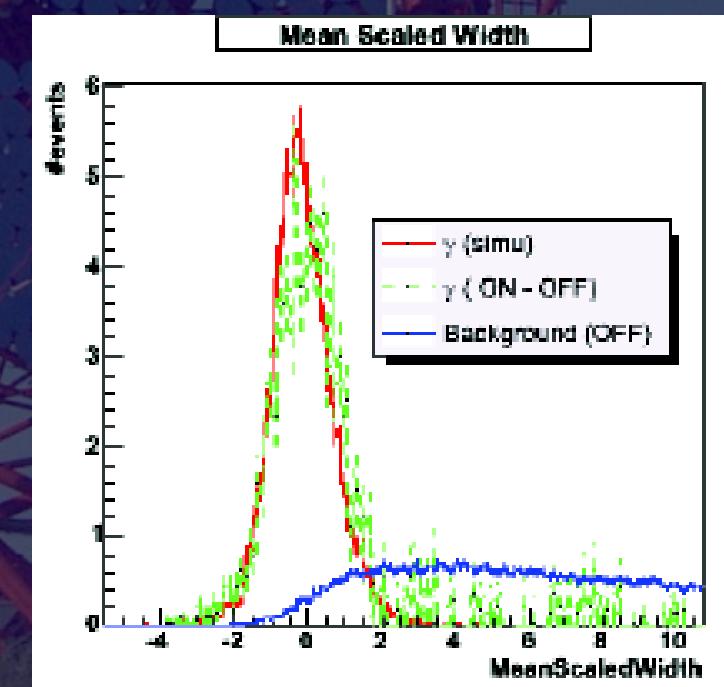
- Paramètre réduit (HEGRA)
 - Moyenne et dispersion du paramètre P tabulées en fonction de l'amplitude de l'image et du paramètre d'impact reconstruit

$$S_w = \frac{(w - \langle w \rangle)}{\sigma_w}$$

- Paramètre réduit moyen : moyenne sur les télescopes

$$MSW = \sum_{tels} S_w / \sqrt{n_{tel}}$$

→ Prise en compte des fluctuations gerbe à gerbe

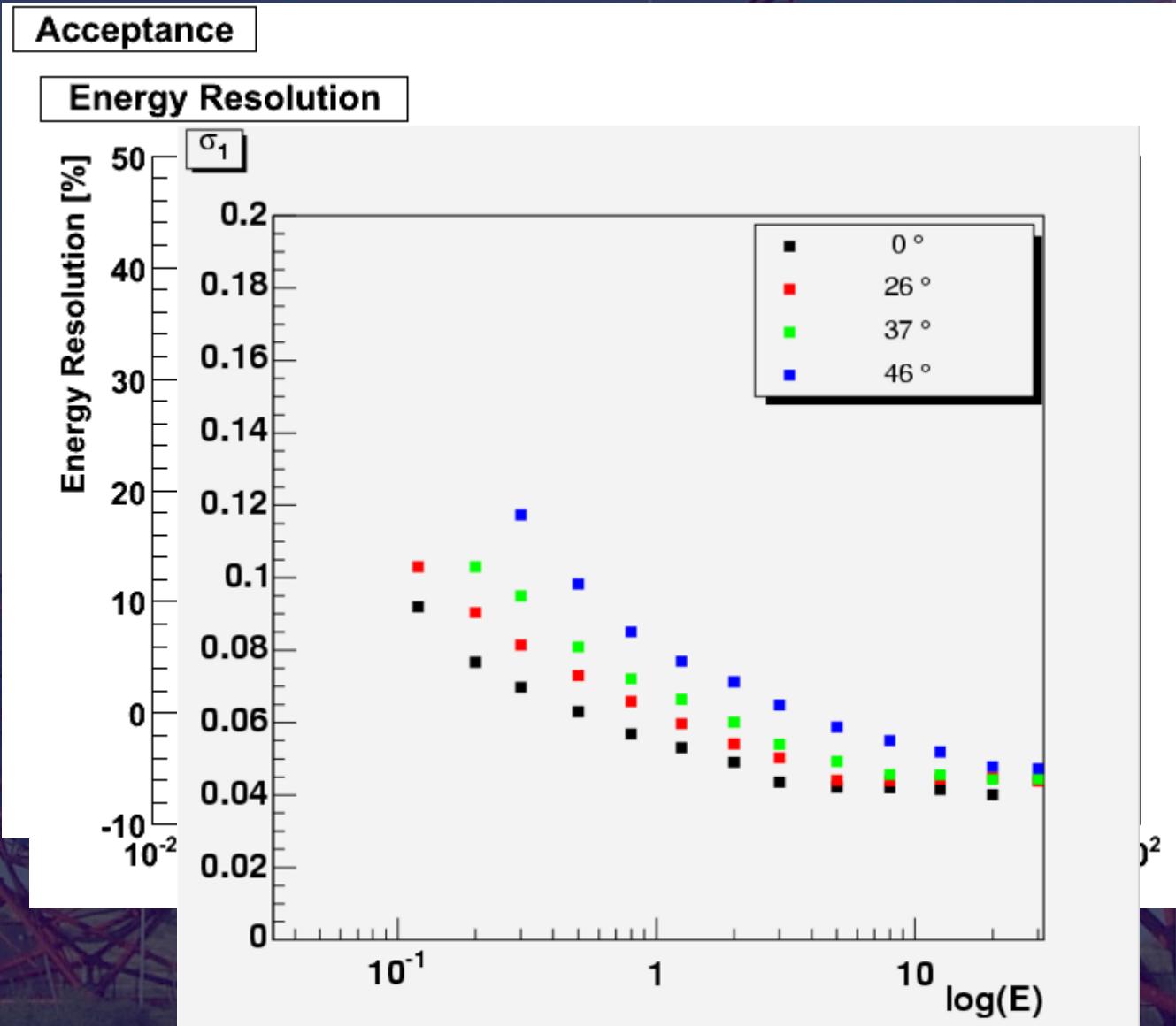


Reconstruction direction/énergie

- Direction
 - Reconstruction géométrique
- Energie
 - Tabulée en fonction du paramètre d'impact et de l'amplitude de l'image → une valeur par télescope
 - Moyenne de chaque télescope



Performances de l'analyse de Hillas



Modèle semi-analytique d'image (CAT, 1996)

Paramètres : énergie, paramètre d'impact, angle zénithal, altitude de 1ère interaction

- Modèle : développement des gerbes électromagnétiques

- évolution du nombre de particules chargées e^+e^-
- distribution en énergie des e^+e^-
- distribution angulaire des e^+e^-
- distribution spatiale des e^+e^-



Développement temporel de l'image dans le plan focal

- Prise en compte des paramètres du détecteur

- efficacité de collection de lumière
- système de déclenchement, fenêtre de lecture
- résolution angulaire



Image dans la caméra : amplitude de chaque pixel

Modèle semi-analytique d'image

- **Ajustement des images-modèles sur les images réelles**

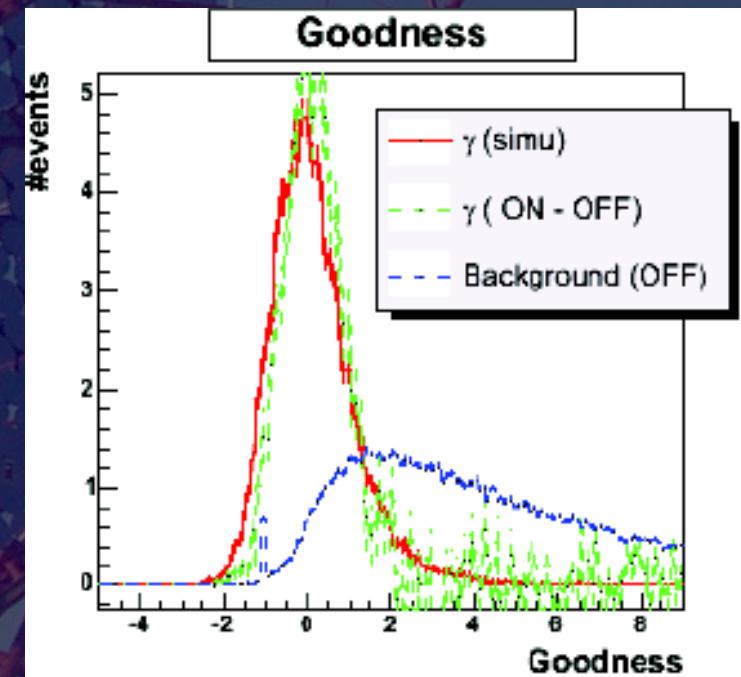
- Maximum de vraisemblance
- Distribution poissonienne du nombre de photo-électrons
- Bruit du ciel de chaque pixel pris en compte

- **Paramètre discriminant γ -hadrons**

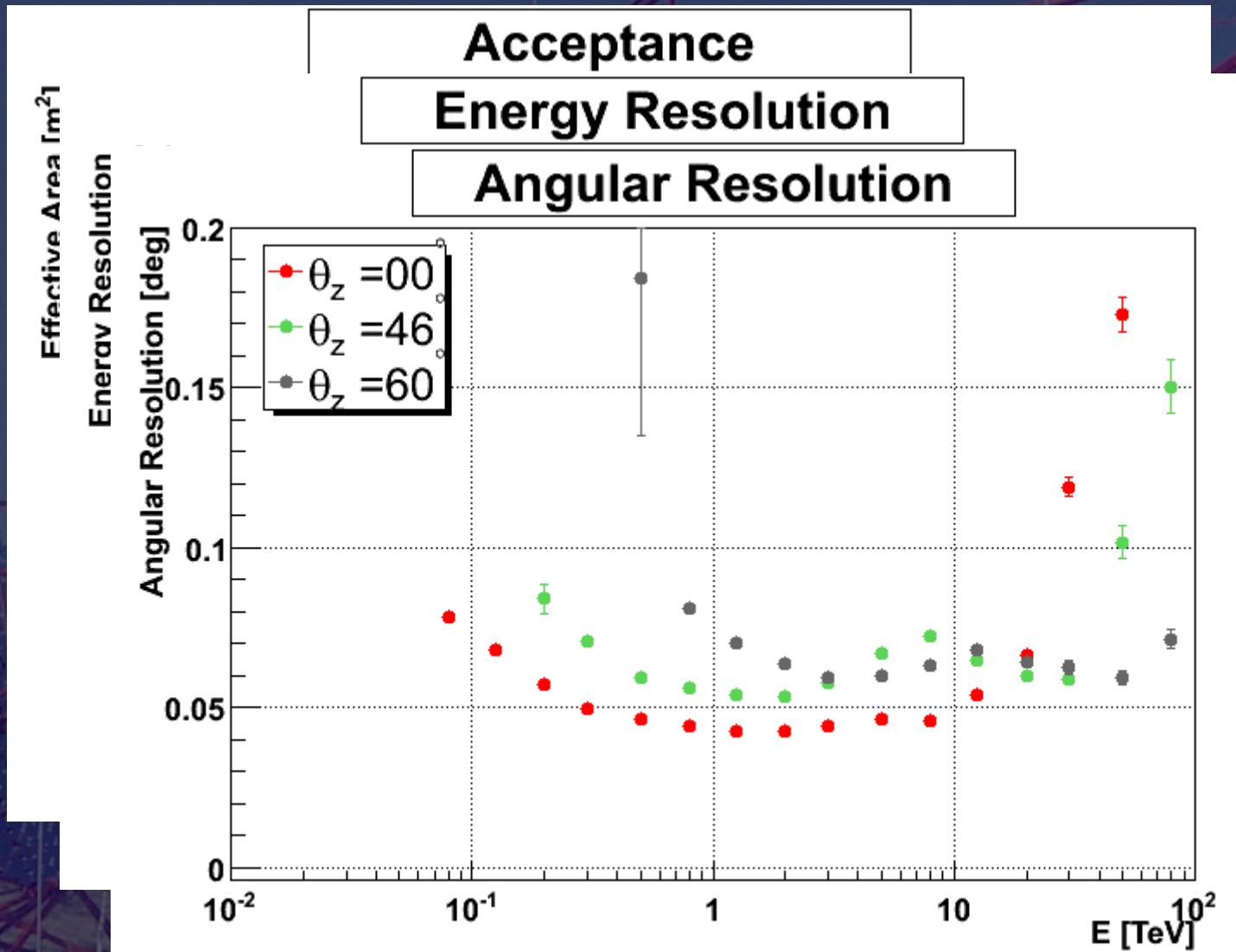
- Qualité de l'ajustement

- **Paramètre réduit**

- Prise en compte de fluctuations de gerbe



Performances de l'analyse modèle



Eléments de comparaison

- Méthode de Hillas

- meilleur pouvoir de réjection
- plus rapide

- Modèle semi-analytique

- meilleure efficacité à basse énergie
- NSB pris en compte
- meilleure acceptance hors-axe
- *information temporelle utilisable*

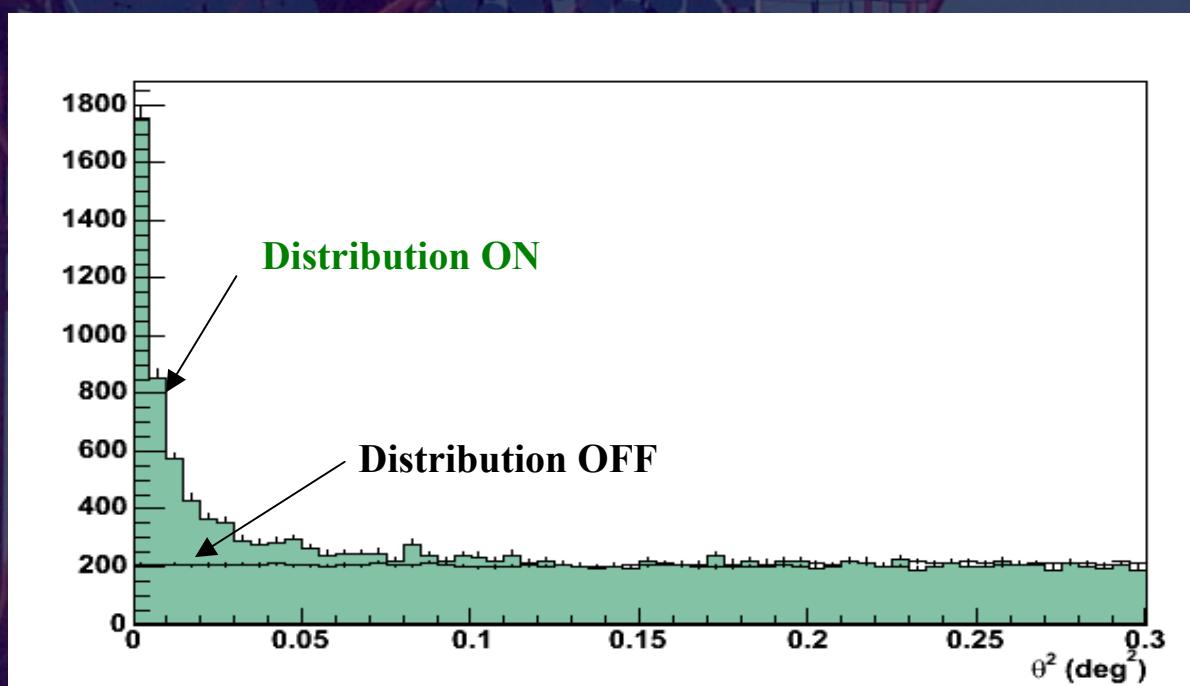
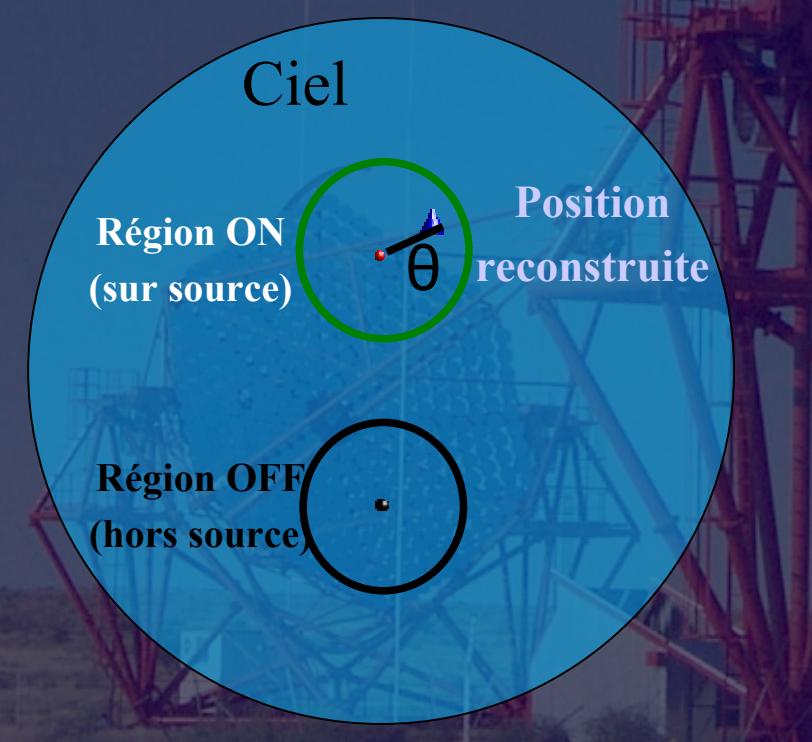
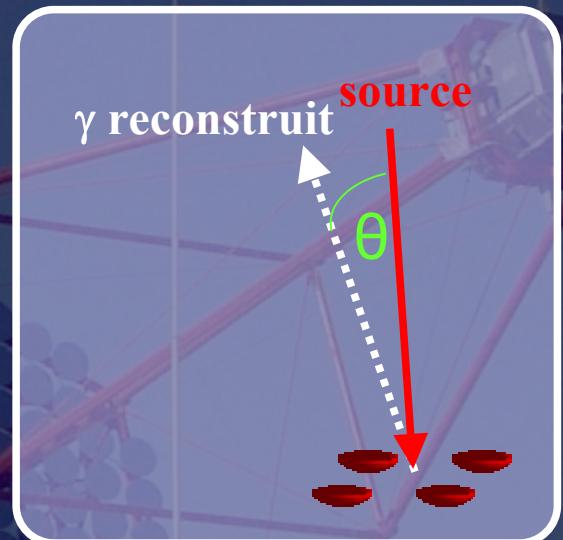
→ Développement d'analyses combinées en cours

Après sélection :

- ~ 1 gamma/minute
- ~ 1 « gamma-like » du fond / minute

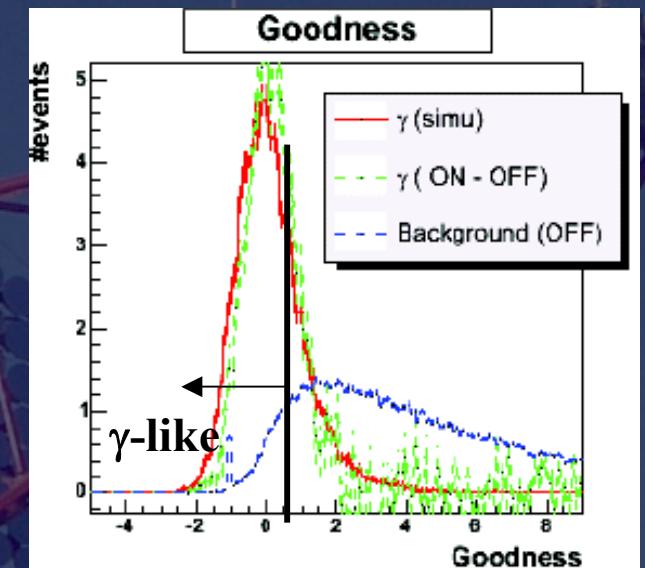
Définition de θ , estimation du fond

- θ : distance angulaire entre la source et la position reconstruite du γ
- Régions de contrôle du fond hadronique
 - 3 méthodes couramment utilisées

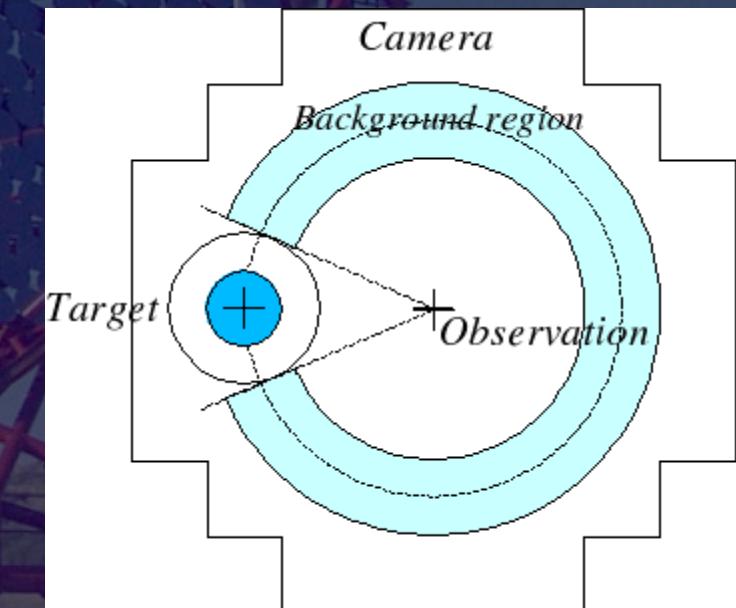
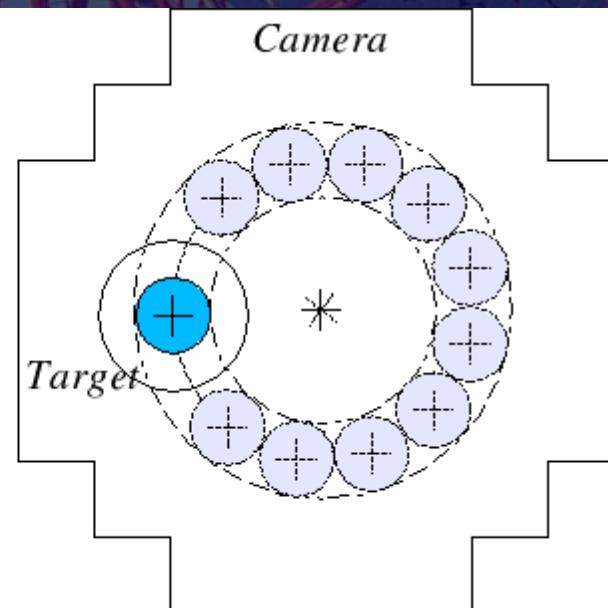
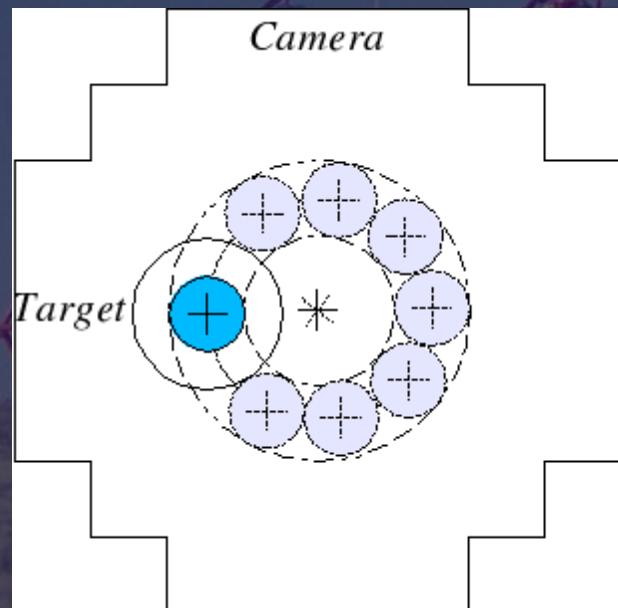


Fond estimé dans des régions OFF

Sélection des événements « gamma-like »
dans la région ON et des régions OFF

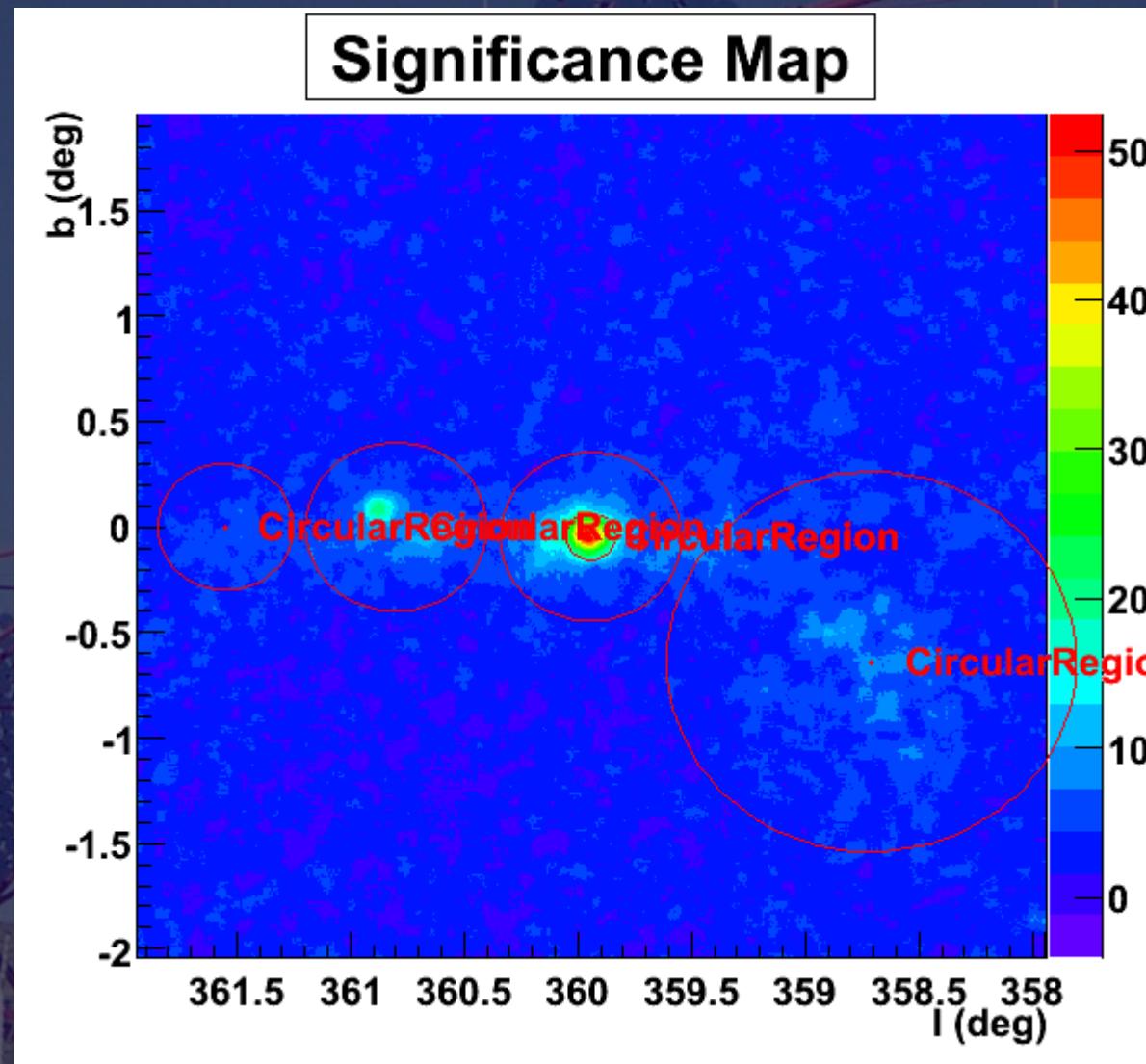


« Multiple OFF »



Régions exclues pour l'estimation du fond

- Exclusion des régions contenant des sources de γ



Objectifs de l'analyse

- Sélection des images de gerbes électromagnétiques
 - Réjection des images de gerbes hadroniques

- Reconstruction des γ
 - direction
 - énergie

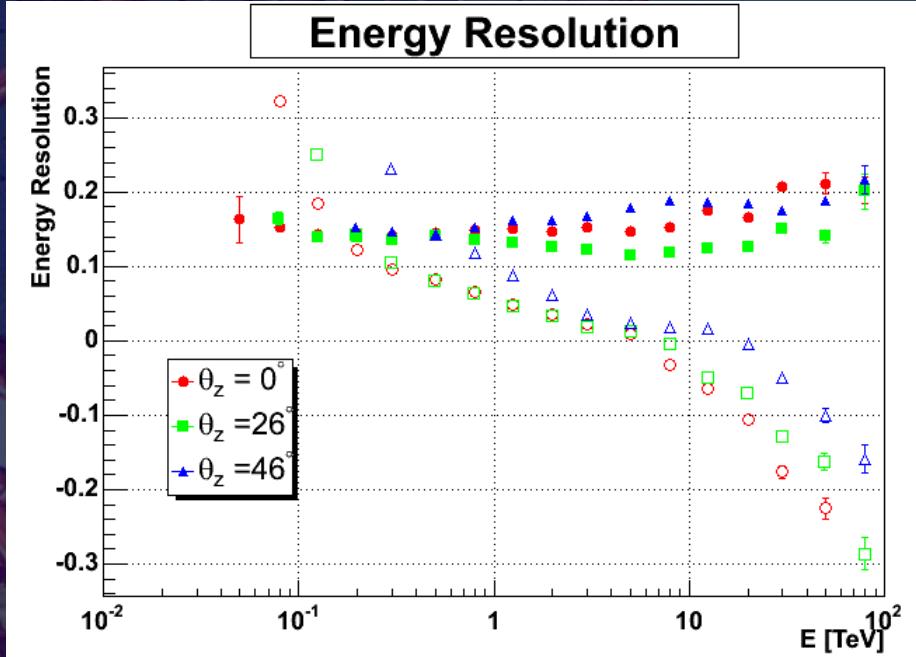
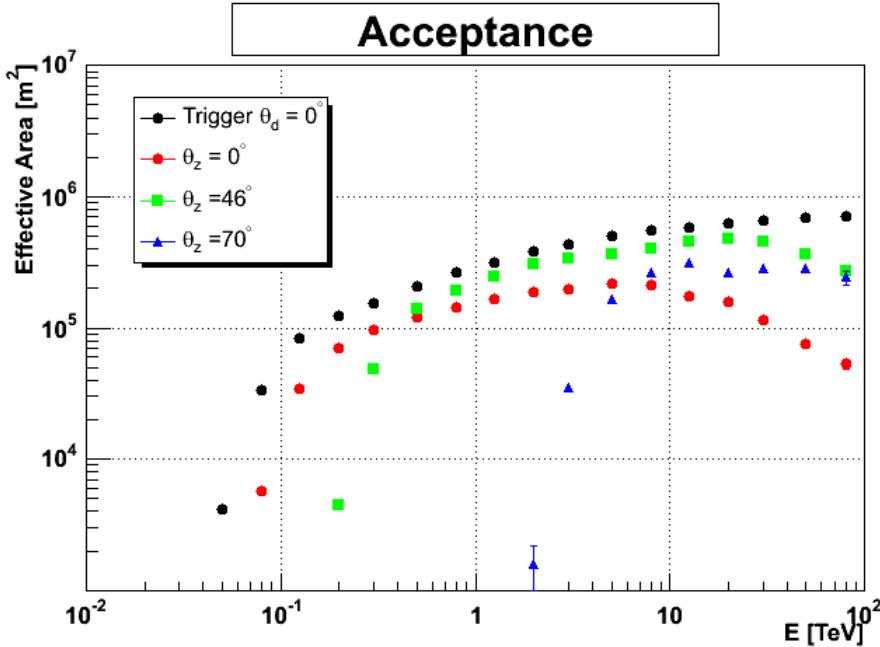
- Résultats
 - position
 - morphologie
 - spectre

Reconstructions spectrale et morphologique

Réponse du détecteur

Surface de collection
Résolution en énergie

Résolution angulaire

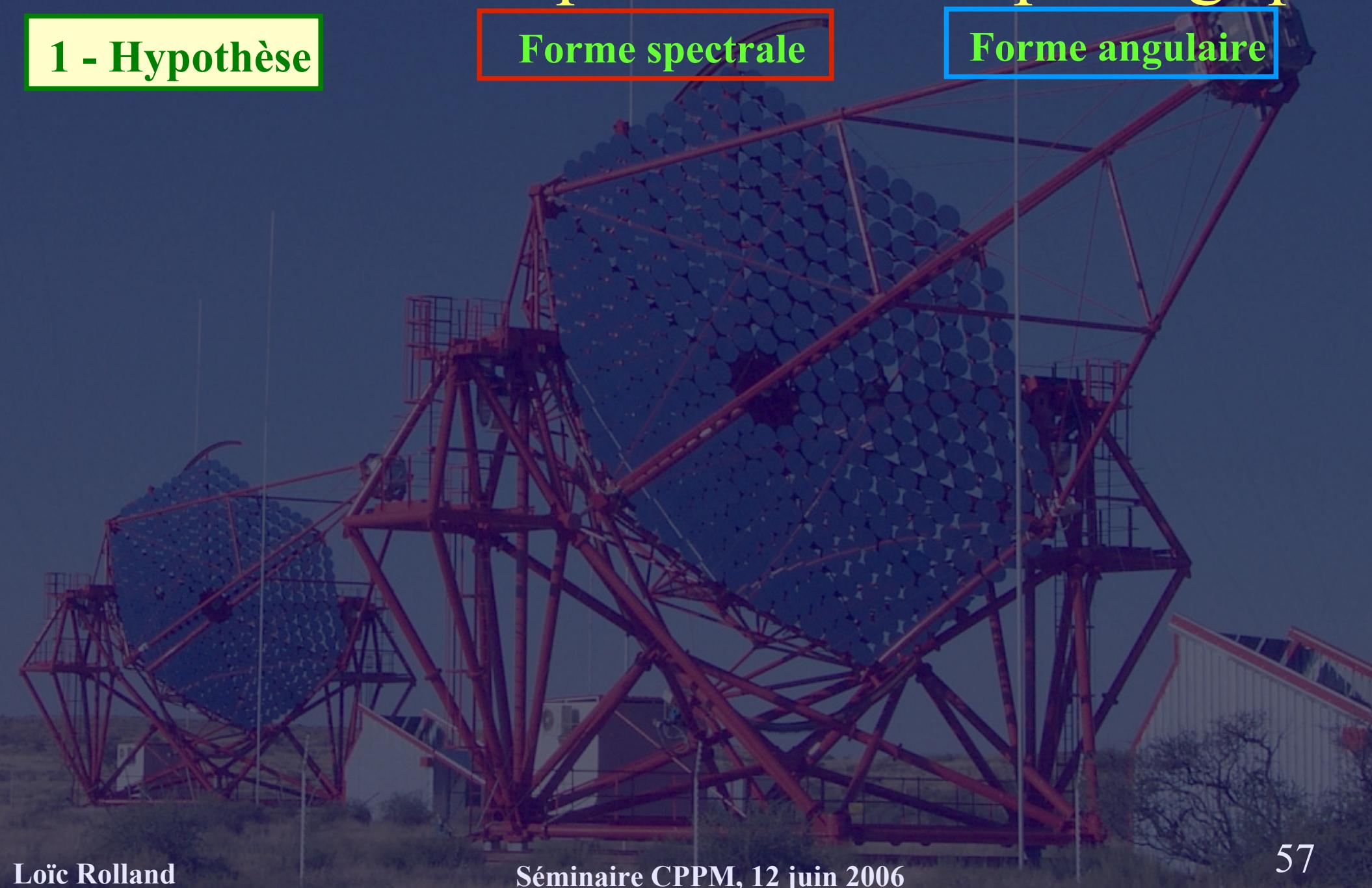


Reconstructions spectrale et morphologique

1 - Hypothèse

Forme spectrale

Forme angulaire



Reconstructions spectrale et morphologique

1 - Hypothèse

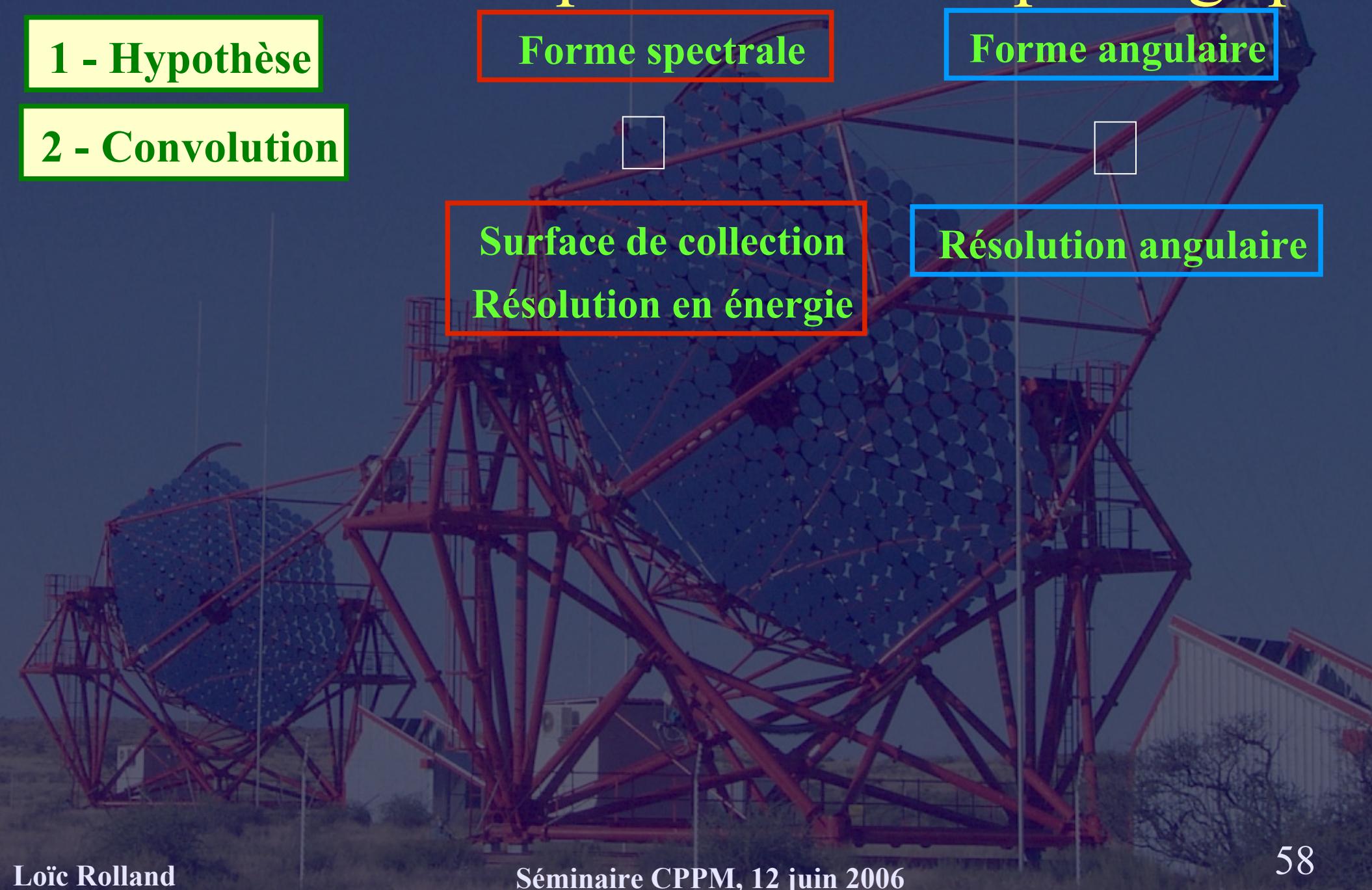
2 - Convolution

Forme spectrale

Forme angulaire

Surface de collection
Résolution en énergie

Résolution angulaire



Reconstructions spectrale et morphologique

1 - Hypothèse

2 - Convolution

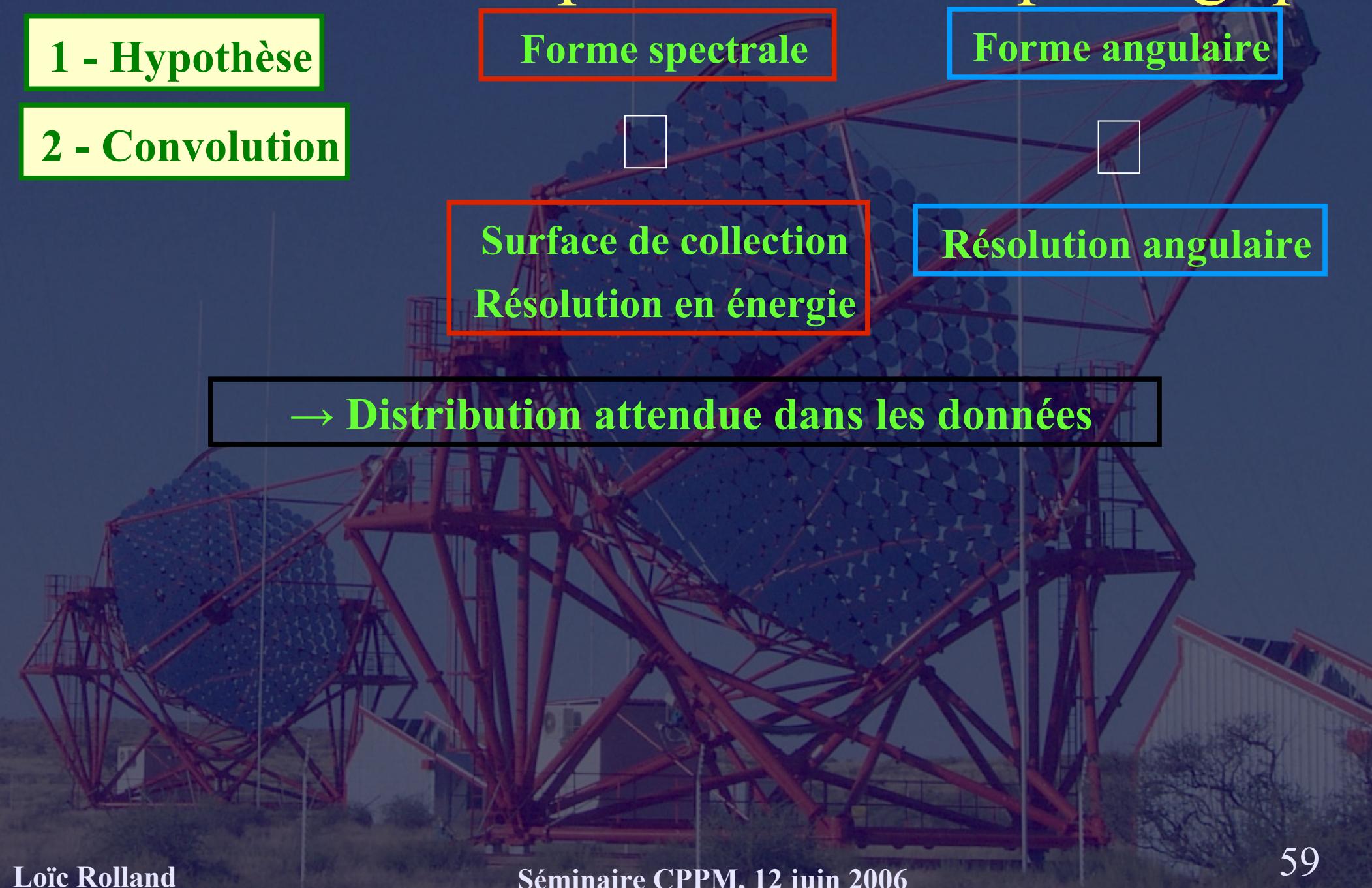
Forme spectrale

Forme angulaire

Surface de collection
Résolution en énergie

Résolution angulaire

→ Distribution attendue dans les données



Reconstructions spectrale et morphologique

1 - Hypothèse

2 - Convolution

Forme spectrale

Forme angulaire

Surface de collection
Résolution en énergie

Résolution angulaire

→ Distribution attendue dans les données

3 - Ajustement par maximum de vraisemblance

Problématiques des sources étendues

- Résolution angulaire dépend du spectre de la source
- Résolution en énergie/acceptance dépendent de la morphologie de la source
- Variations spectrales dans les sources étendues

→ **Vers un ajustement combiné spectre/morphologie**

Conclusion sur les méthodes d'analyse

Sélection/Reconstruction
méthode de Hillas
2 méthodes par modèles

Caractéristiques des sources
spectre
morphologie

↓
Comparaison/vérification des résultats
Estimation des systématiques

Vers une combinaison
des méthodes

Vers un ajustement combiné
spectre/morphologie