

# Astronomie Gamma historique & développements récents



MAGIC,  
La Palma

# Rayons Cosmiques, histoire

1910 :  
Th Wulf  
mesure l'ionisation de l'air  
en fonction de l'altitude:  
Elle ne décroît pas aussi vite  
que prévu.

6 ions/cm<sup>3</sup>

Th Wulf :

3.5 ions/cm<sup>3</sup>

300 mètres : flux/15  
→ 0.4 ions/cm<sup>3</sup> attendus

80 mètres : flux/2





# Rayons Cosmiques, histoire

**1912 : Victor Hess** mène une expérience en ballon pour mesurer les radiations selon l'altitude, suite à la mesure en 1910 de Th Wulf sur la tour Eiffel .

Les observations de Wulf se confirment :

les radiations diminuent plus lentement que prévu jusqu'à 700m, où elles se stabilisent,

puis elles augmentent à partir de 1500 m pour atteindre un facteur 2 par rapport au sol, à 5000 m.

Hess reçoit le prix Nobel en 1946 pour cette découverte .



*« la seule manière d'interpréter mes résultats expérimentaux fut d'admettre l'existence d'un rayonnement très pénétrant, d'une nature encore inconnue, venant principalement d'en haut, et étant très probablement d'origine extraterrestre »*

V. Hess

Il y a donc le rayonnement de fond dû à la radio-activité terrestre  
+ un rayonnement cosmique

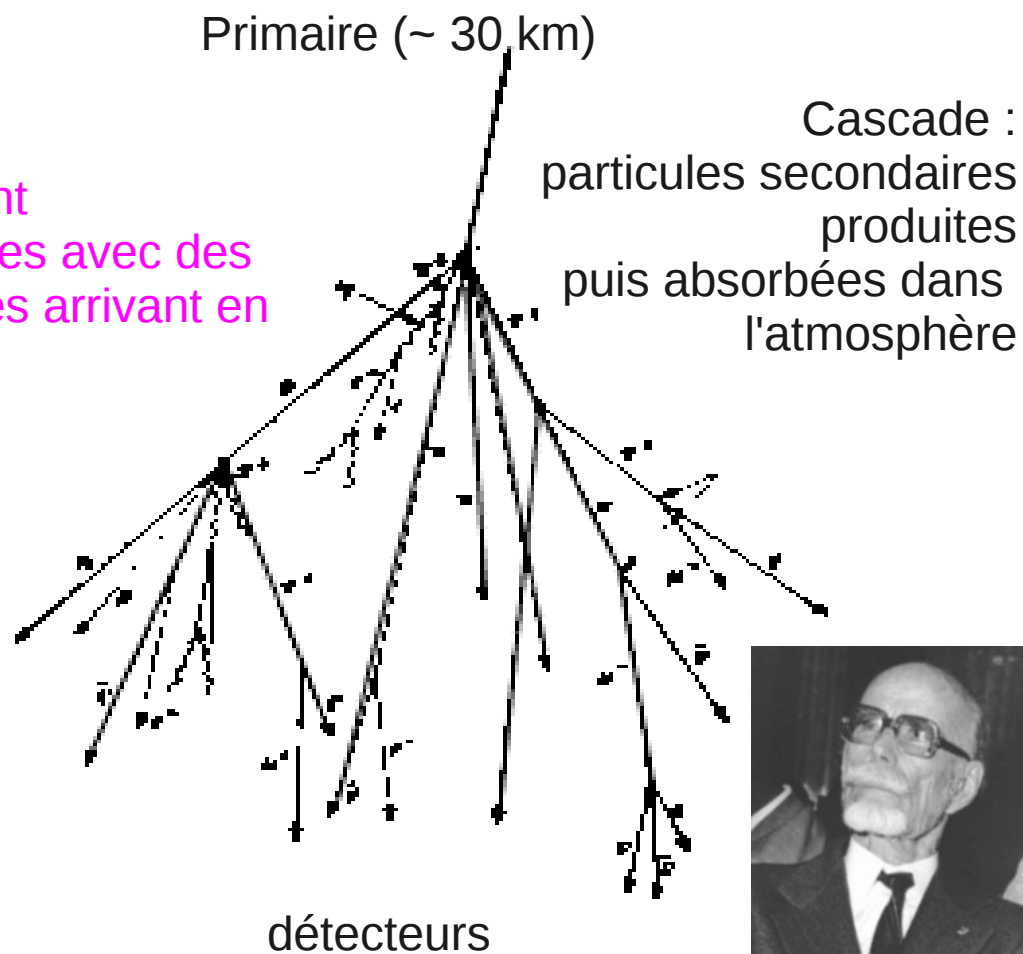
# Détection des Rayons Cosmiques

Fin des années 1930, Pierre Auger montre, avec des compteurs Geiger, que les particules des rayons cosmiques sont corrélées en temps : elles proviennent en fait d'un même ensemble de particules, initié par une "particule primaire" interagissant au niveau de la haute atmosphère, et produisant une cascade de particules par interactions successives des particules filles.

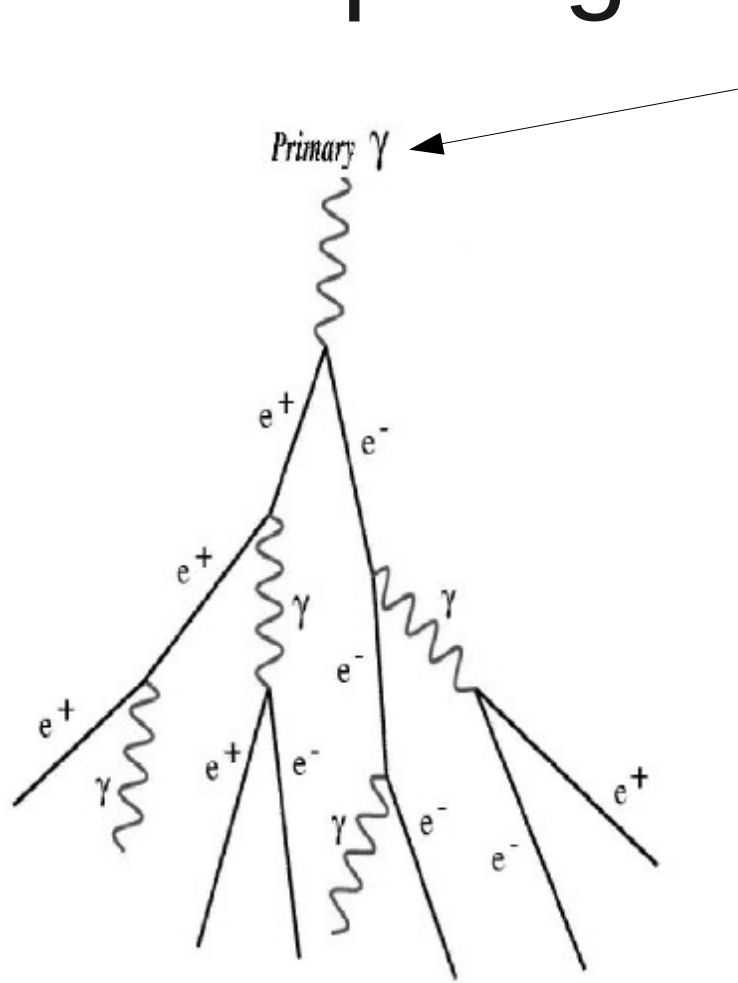
P Auger : des compteurs, même éloignés, mesurent des signaux en coïncidence, incompatibles avec des signaux fortuits => cascades de particules arrivant en même temps au niveau du sol.

Plusieurs expériences :  
distance de 200 m entre compteurs (Paris),  
puis plusieurs centaines de mètres, en Suisse,  
à 3500 m d'altitude (Jungfraujoch).

Aujourd'hui : expérience Auger en Argentine  
3000 km<sup>2</sup>



# Topologie des cascades



photon

Primary  $\gamma$

$e^+$

$e^-$

$e^+$

$e^+$

$e^-$

$\gamma$

$e^-$

$\gamma$

$e^-$

$e^+$

$e^-$

$e^-$

proton

30 km

5 km

Ici, énergie de la particule primaire=100 TeV

Rouge : électrons, photons  
vert : muons (jaune = rouge + vert)  
hadrons : bleu

*Simulations (Univ Leeds) avec  
le programme CORSIKA (Karlsruhe)*

# Proportion des particules primaires, Energie

99% noyaux {  
Protons 89%  
Noyaux hélium 10 %  
Noyaux plus lourds 1%

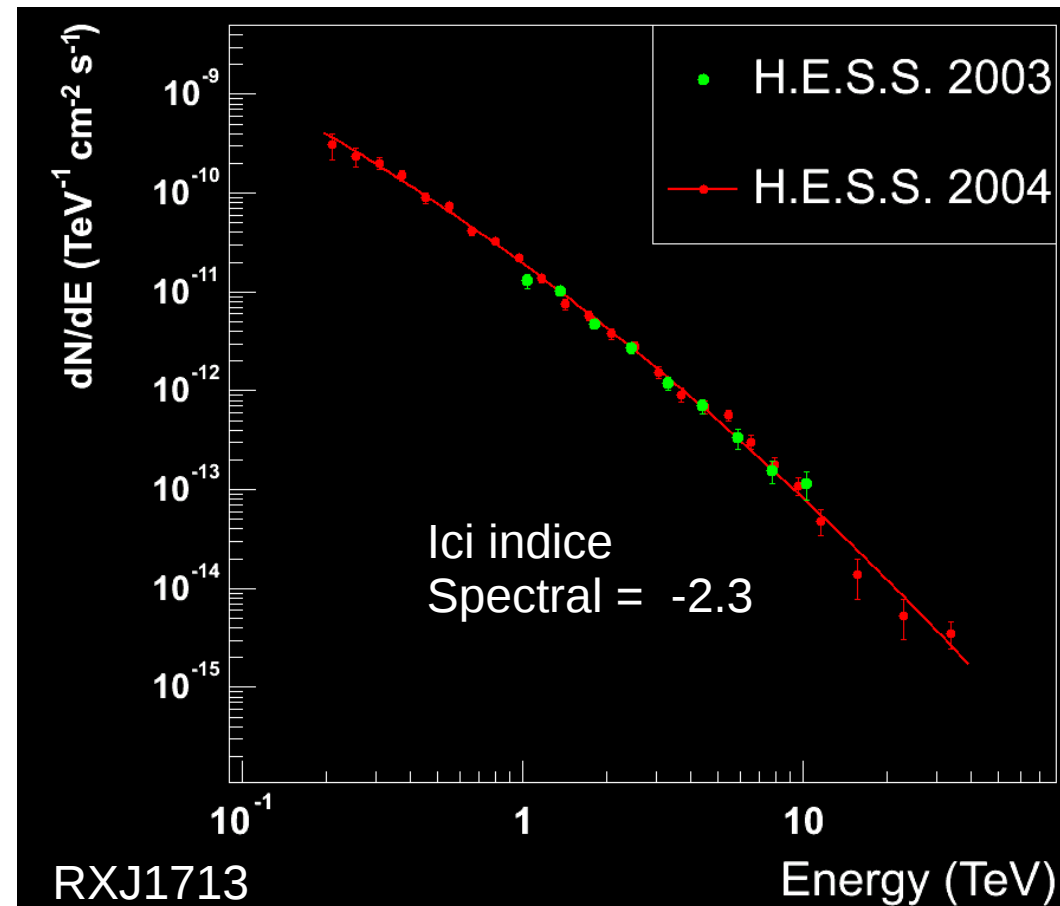
1% électrons

0.1%  $\gamma$  notre sujet

De plus, décroissance du nombre  
avec l'énergie, en loi de puissance:

**Flux proportionnel à  $E^{-\alpha}$**

$\alpha$  de l'ordre de 2-3

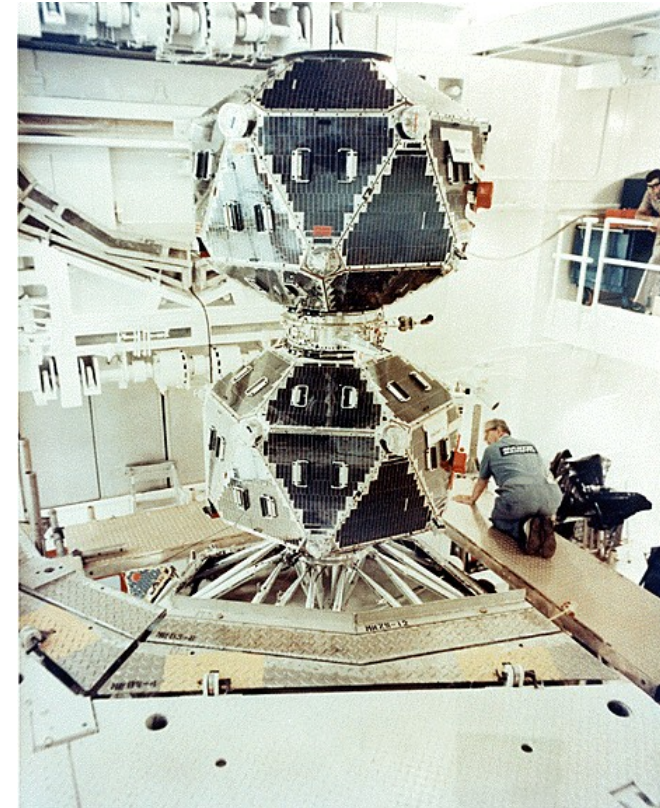
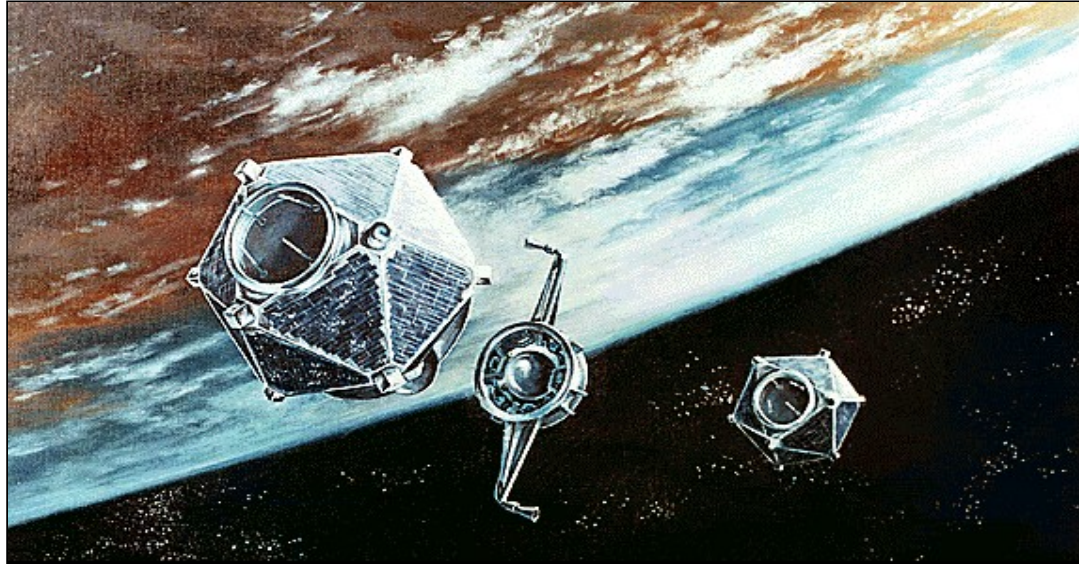




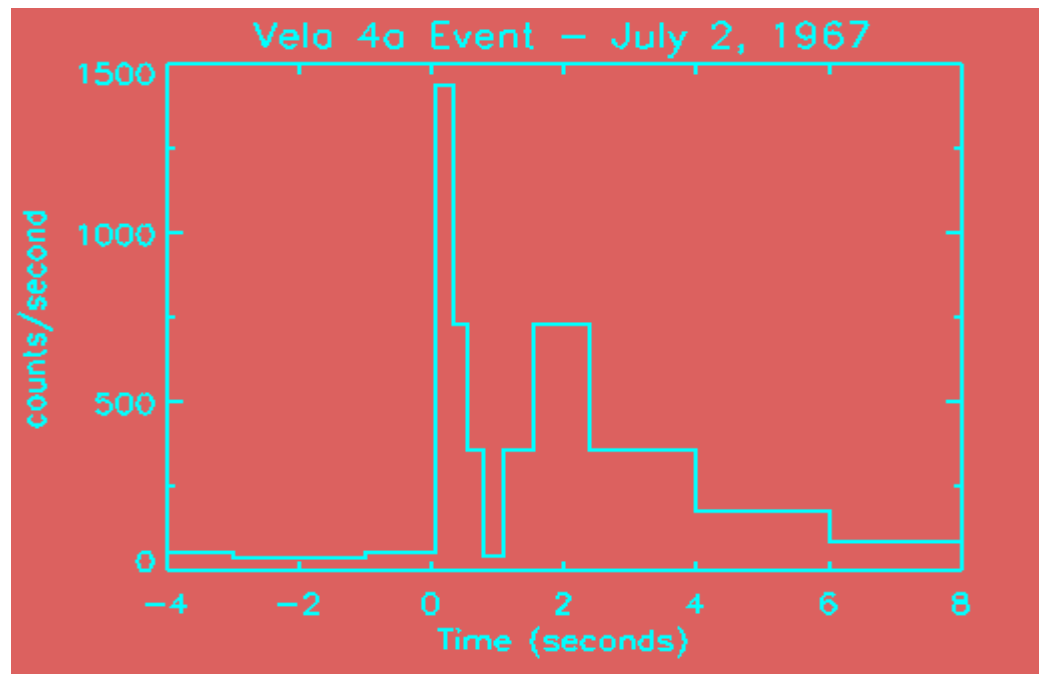
# Première détection: VELA

3 paires de satellites lancées en 1963-1964-1965  
But : surveiller l'émission gamma d'essais nucléaires

Dans l'espace

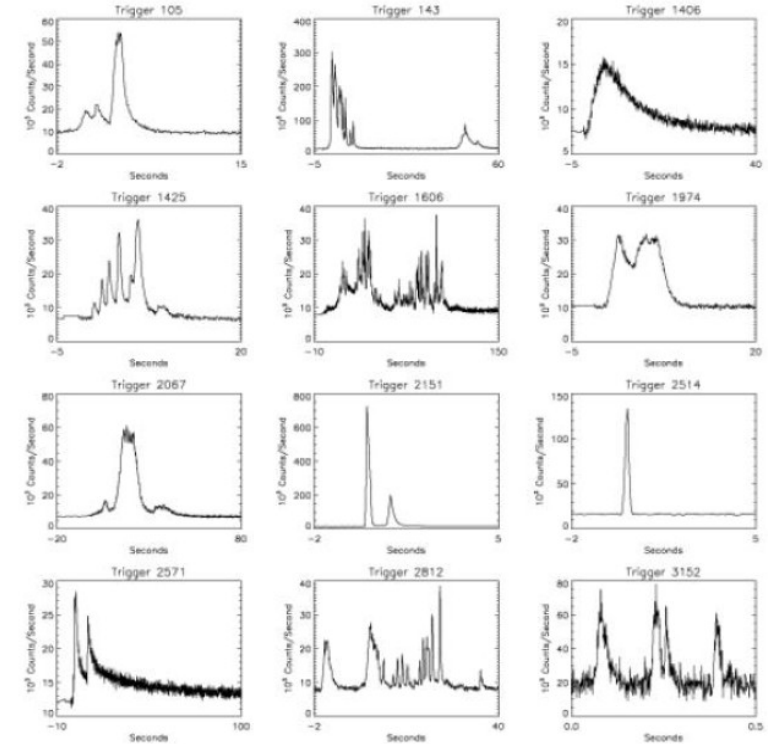
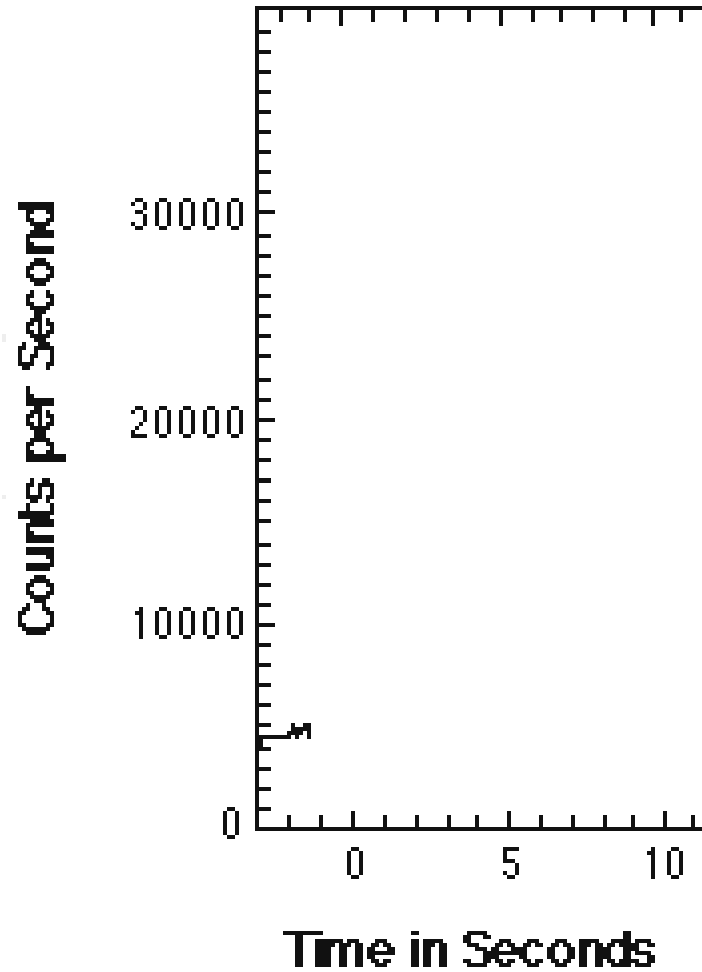
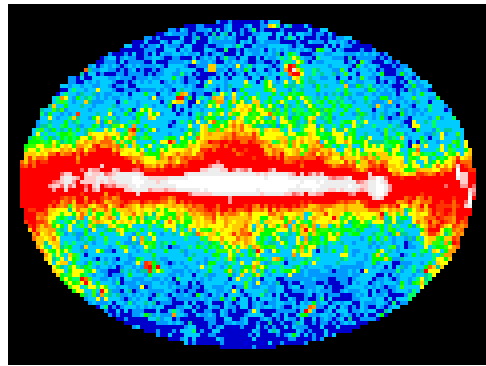


En 1967 :  
détection de gammas  
issus du cosmos:  
"sursauts" gamma  
(Gamma  
Ray Bursts)



**BASSE énergie:**  
**0(MeV)**  
**jusque**  
**0(10 MeV)**

# Structure temporelle d'un sursaut gamma



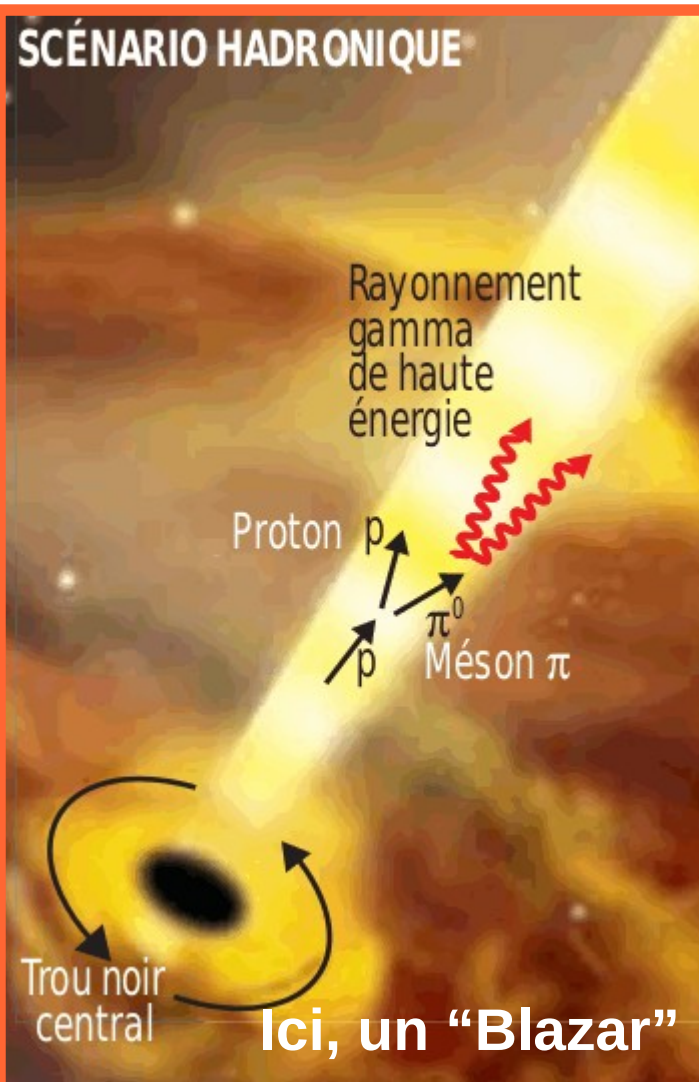
Comptage des gamma  
↑  
temps →

Distribution isotrope dans le ciel => extra-galactiques.



# Emmission de rayonnements gamma : le principe de base

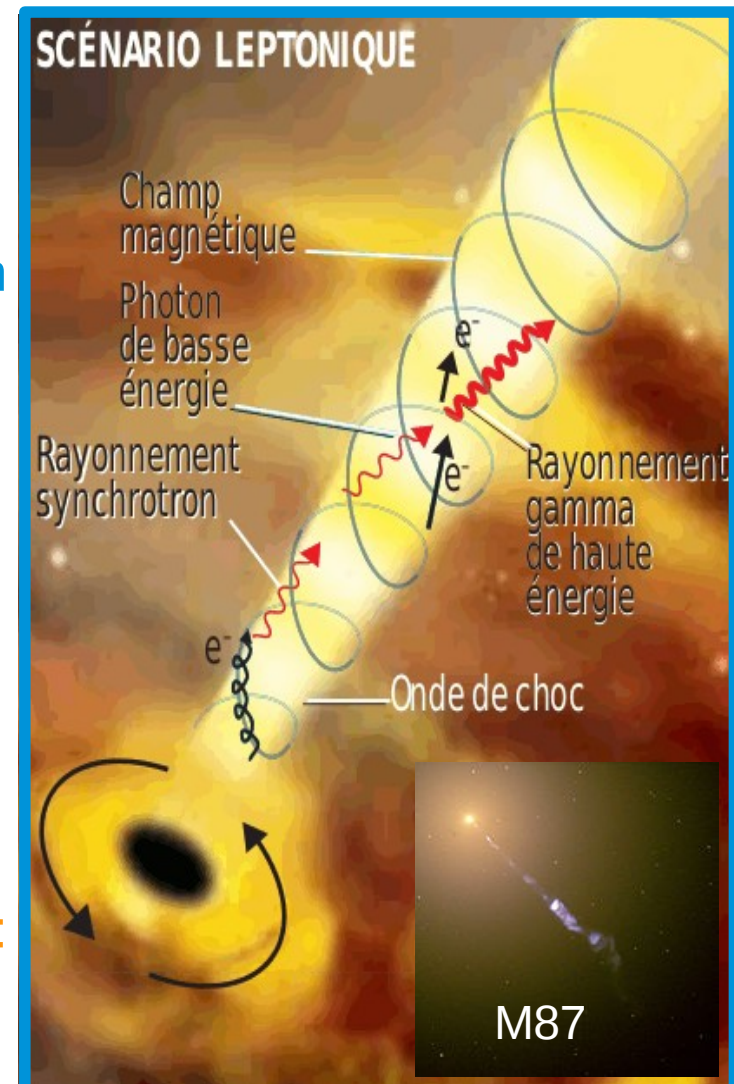
Accélération de particules chargées dans les objets astrophysique (électrons, protons ...) : phénomènes d'accélération dans des ondes de choc ou zones turbulentes.



Puis production de  $\gamma$  par différents scénarios:

**électrons** : rayonnement Synchrotron (RX et E inférieures) + effet Compton inverse (gamma): un  $e^-$  entre en collision avec un photon de basse énergie (parfois du rayonnement synchrotron) et lui donne une énergie jusqu'au domaine du TeV

**protons** : collisions avec d'autres protons (gaz d'hydrogène ambiant) : production de  $\pi^0$  qui se désintègrent en 2  $\gamma$ .



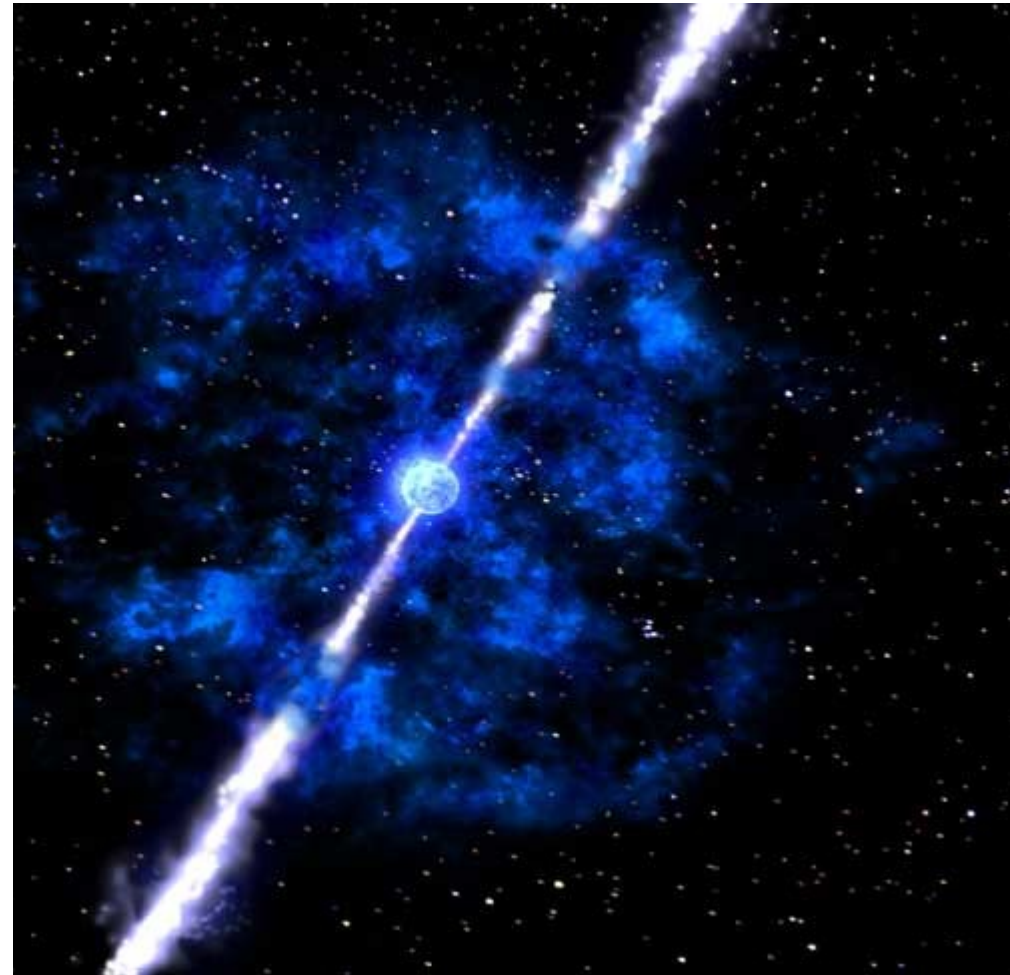
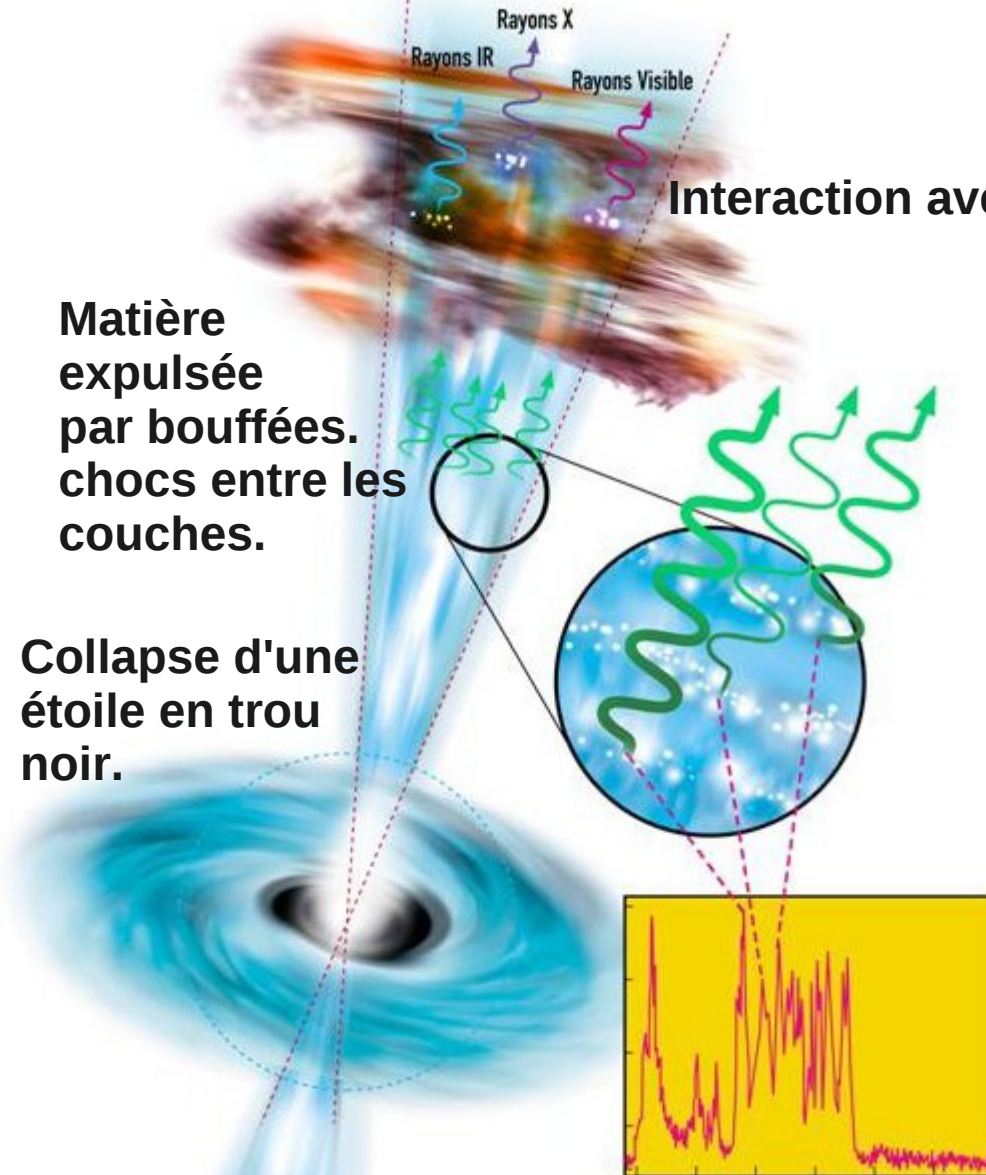
# Emetteurs de Gamma : Gamma Ray Bursts (sursauts gamma)

**EXTRA-GALACTIQUE**

Interaction avec le milieu interstellaire

Matière expulsée par bouffées. chocs entre les couches.

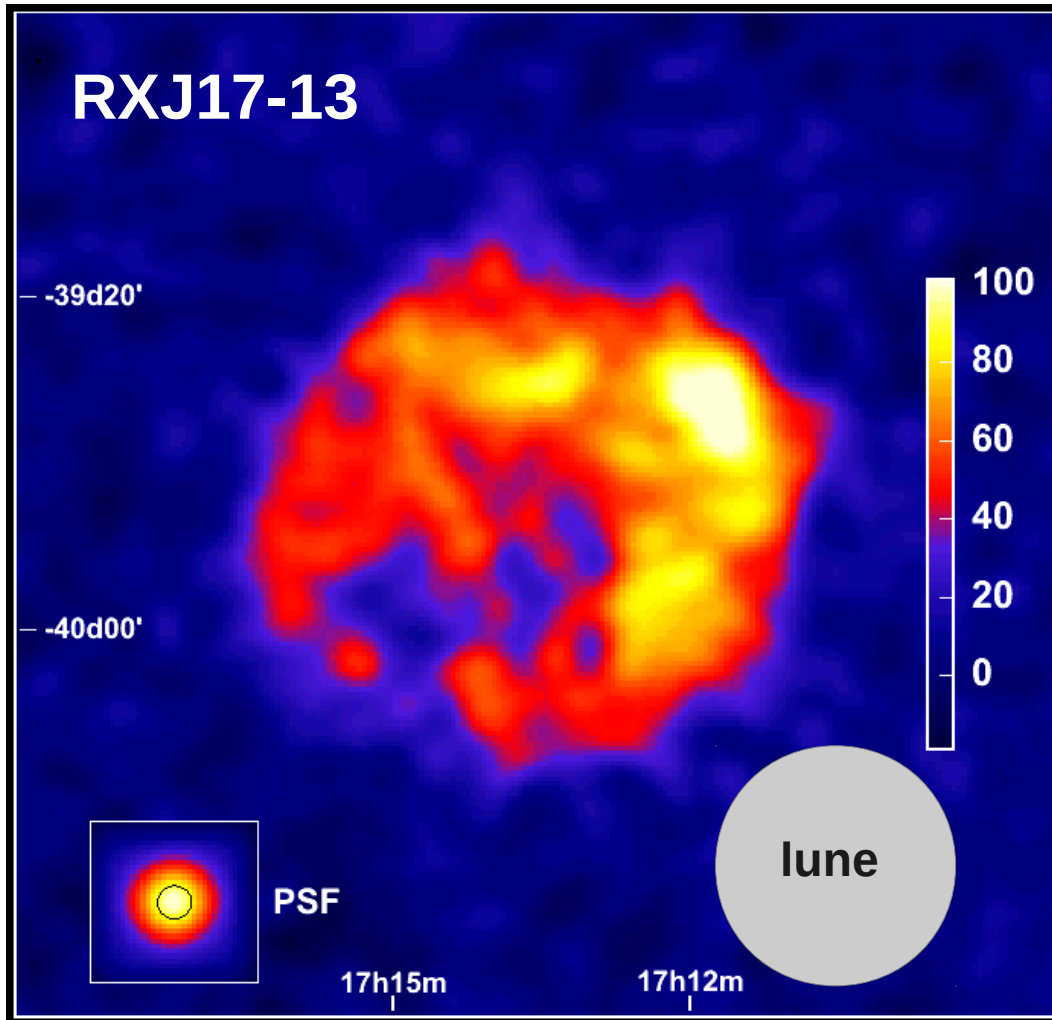
Effondrement d'une étoile en trou noir.



Pas d'observation concluante au sol

# Emetteurs de Gamma : Vestiges de Supernovae

## GALACTIQUE



Propagation dans le milieu interstellaire de l'onde de choc sphérique causée par l'explosion d'une supernova: formation d'une coquille rayonnant des  $\gamma$  suite à l'accélération des particules et processus de production gamma.



# Emetteurs de Gamma : Noyaux actifs de galaxies

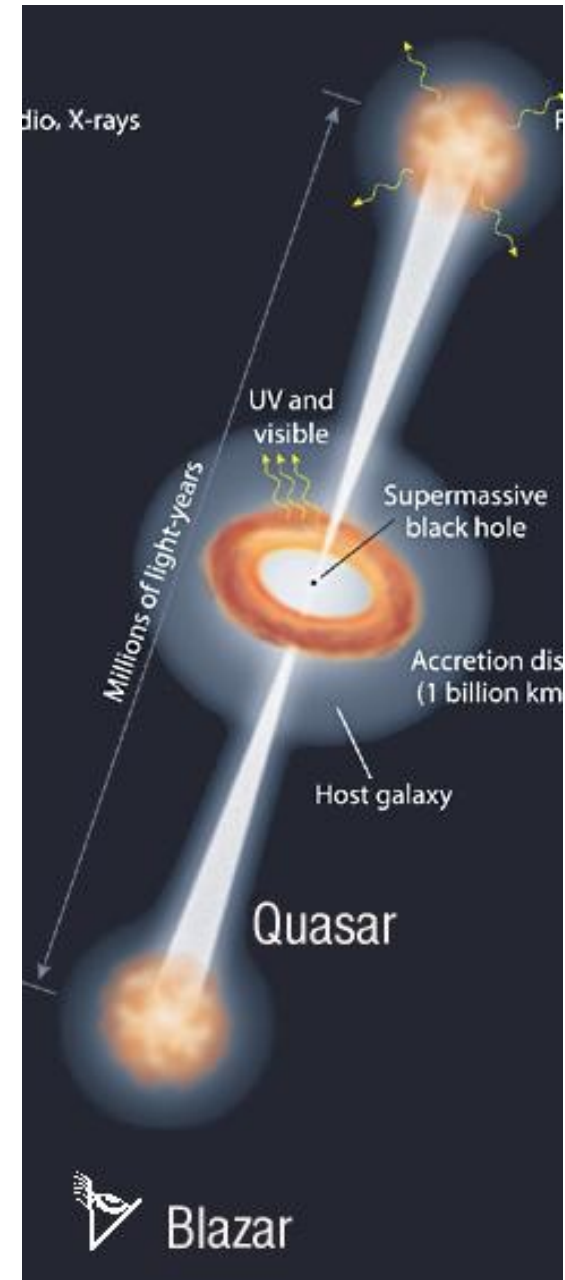


Galaxies elliptiques

Trou noir central >  
100 millions de masses  
solaires.

Accrétion de matière  
dans un disque

Ejection de “jets”,  
sièges d'accélération  
de particules chargées  
et production de  $\gamma$

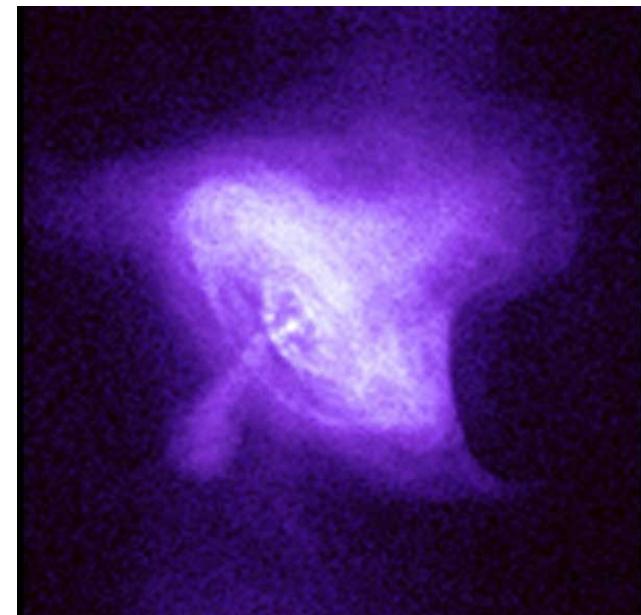
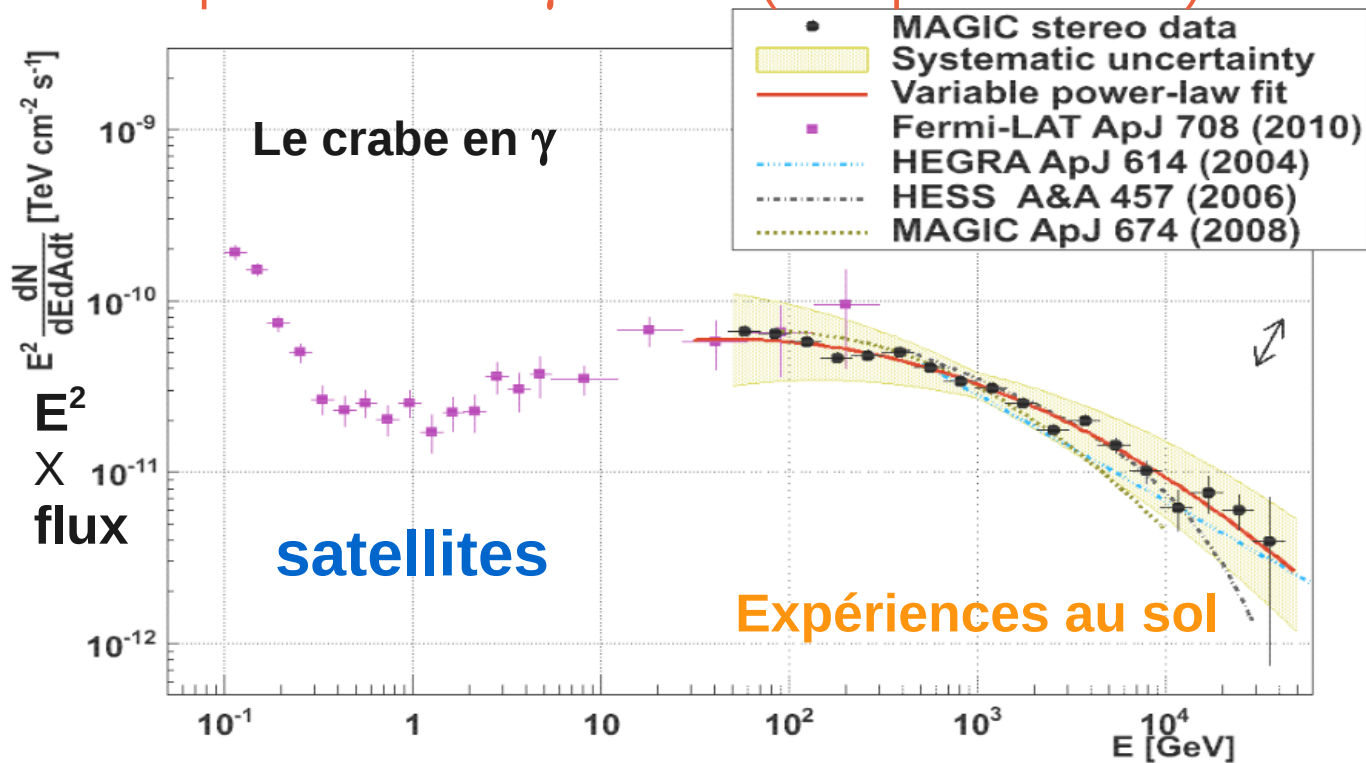


# Emetteurs de Gamma :

## La référence : La Nébuleuse du Crabe

**Nébuleuse à vent de pulsar**

Reste d'une explosion de supernova observée en 1054, visible de jour durant 6 semaines. Une étoile à neutrons en est issue : 20 km de diamètre, 30 tours/seconde. Les champs électriques et magnétiques associés accélèrent les particules (électrons, positon: "vent du pulsar") qui entrent en collision avec la nébuleuse environnante. Les images en rayons X montrent les zones d'accélération (rayonnement synchrotron): "plérion". Les particules sont réaccélérées dans les chocs avec le gaz, permettant ensuite la production de  $\gamma$  du TeV (Compton Inverse)

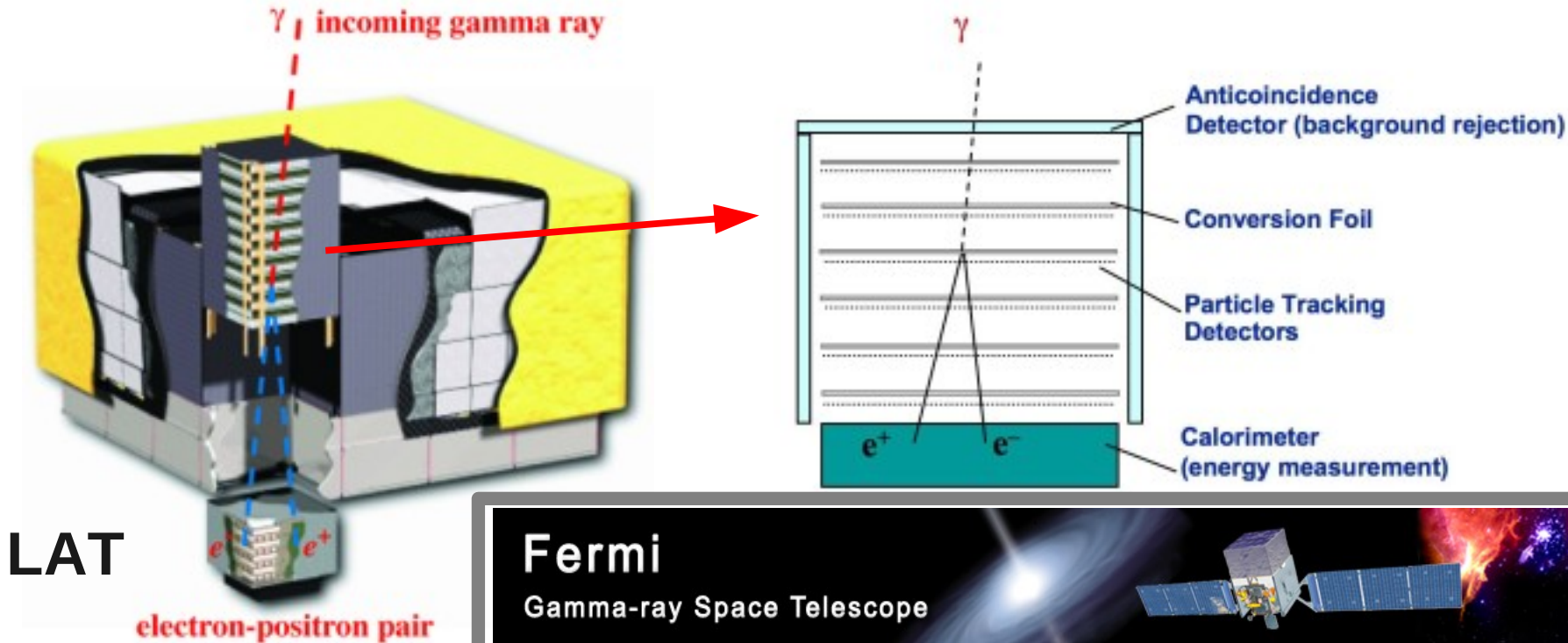


**Le crabe en X**

# Détection de rayonnement Gamma cosmiques: le problème de l'énergie

Problème : le nombre de photons  $\gamma$  décroît avec l'énergie.

A "basse énergie" ( jusque  $\sim 300$  GeV max, mais plutôt 10 GeV) : **satellites**



**Fermi**

Gamma-ray Space Telescope

LAT 20 MeV - 300 GeV + GBM : 8 keV - 40 MeV.

A plus haute énergie : flux faible, qui requiert une grande surface de collection: 10000 m<sup>2</sup> (ou beaucoup de patience).

D'où l'idée d'utiliser la Terre comme cible : les gerbes des photons gamma contiennent des particules chargées (électrons, positons) qui induisent de la lumière Cherenkov => détection de cette lumière par de grands appareillages au sol : " imageurs".



“Haute” énergie:  
les détecteurs  
à effet  
Cherenkov

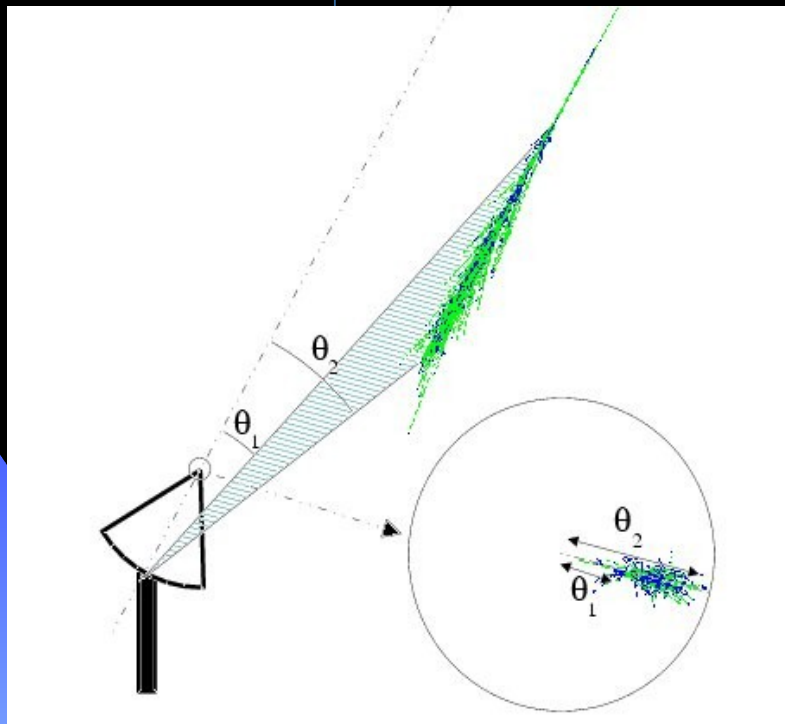
Lumière Cherenkov

Gerbe  
 $e^+, e^-$

$\gamma$

~ 10 km

~ 1°

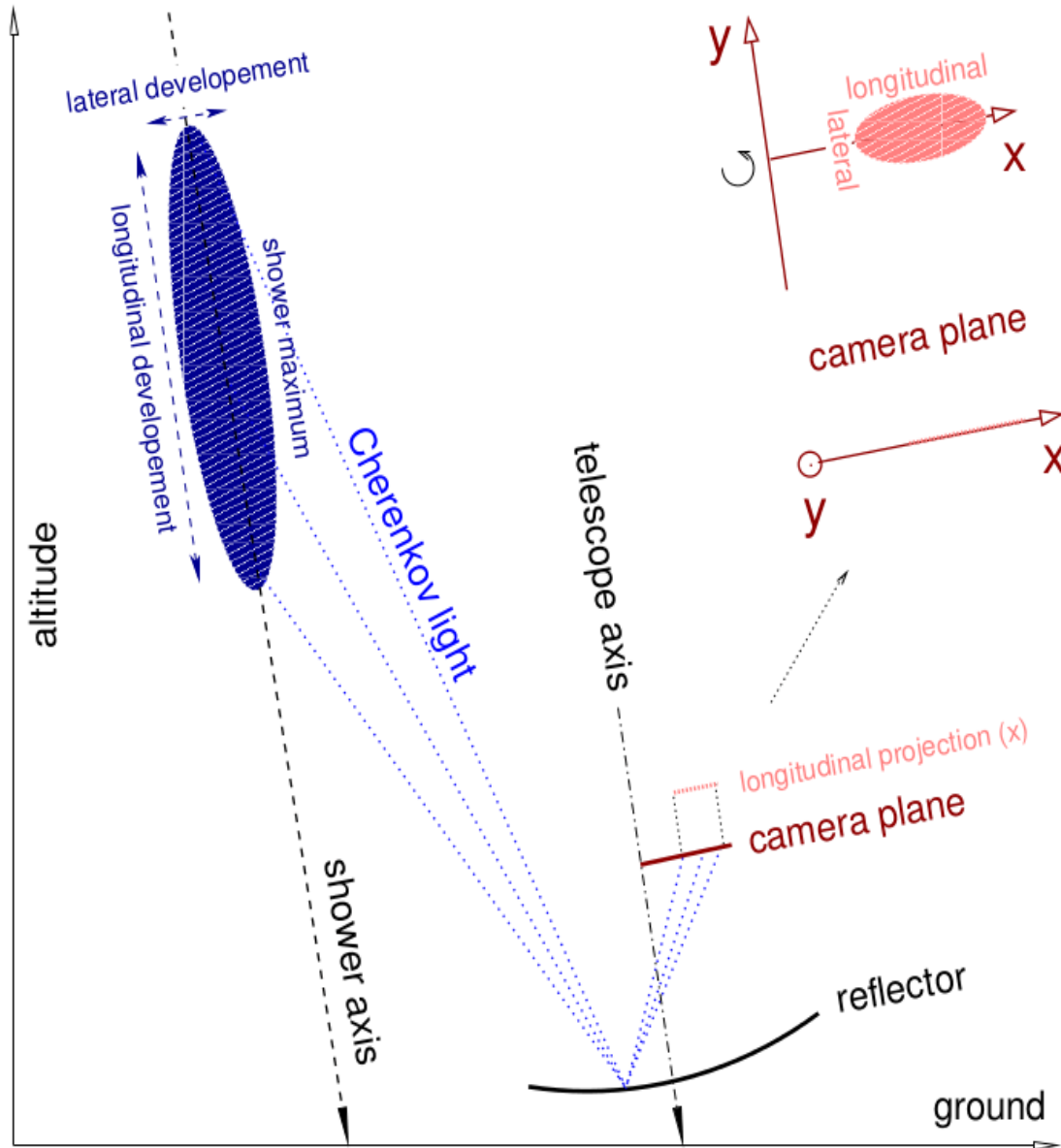


~ 120 m

Champ de vue  
de 3° à 5°

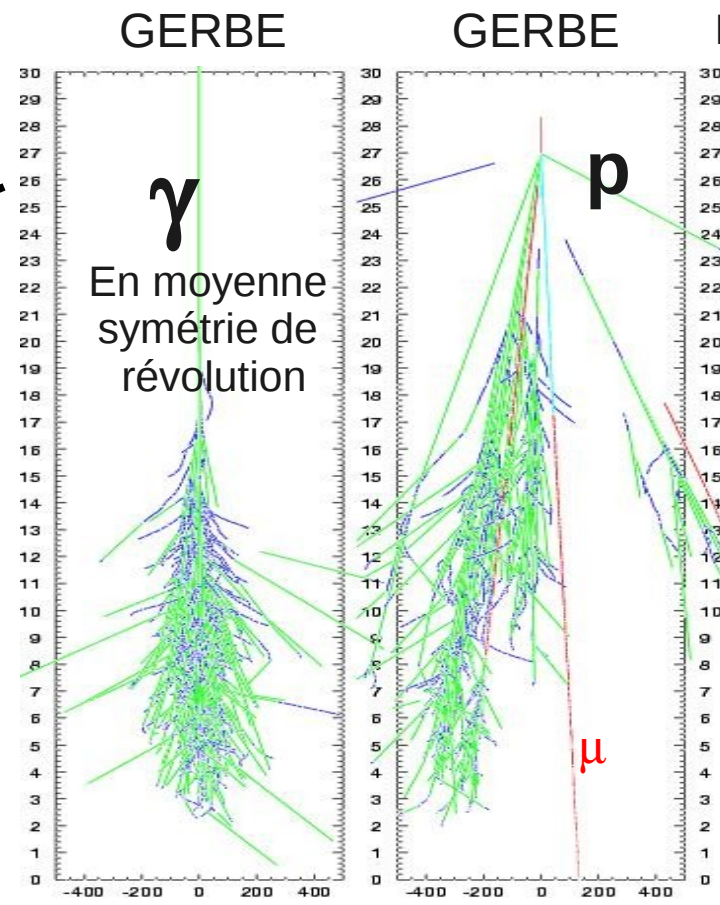
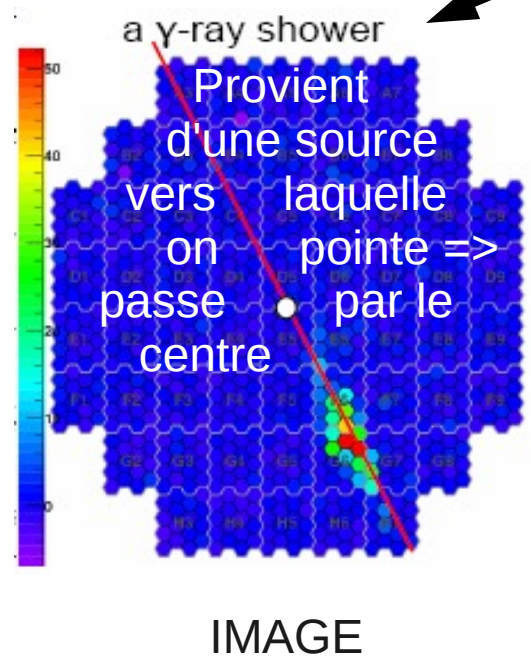
$E=100 \text{ GeV} : \sim 1 \text{ photon Cerenkov/m}^2$   
=> grande surface de miroir

# Principe Optique

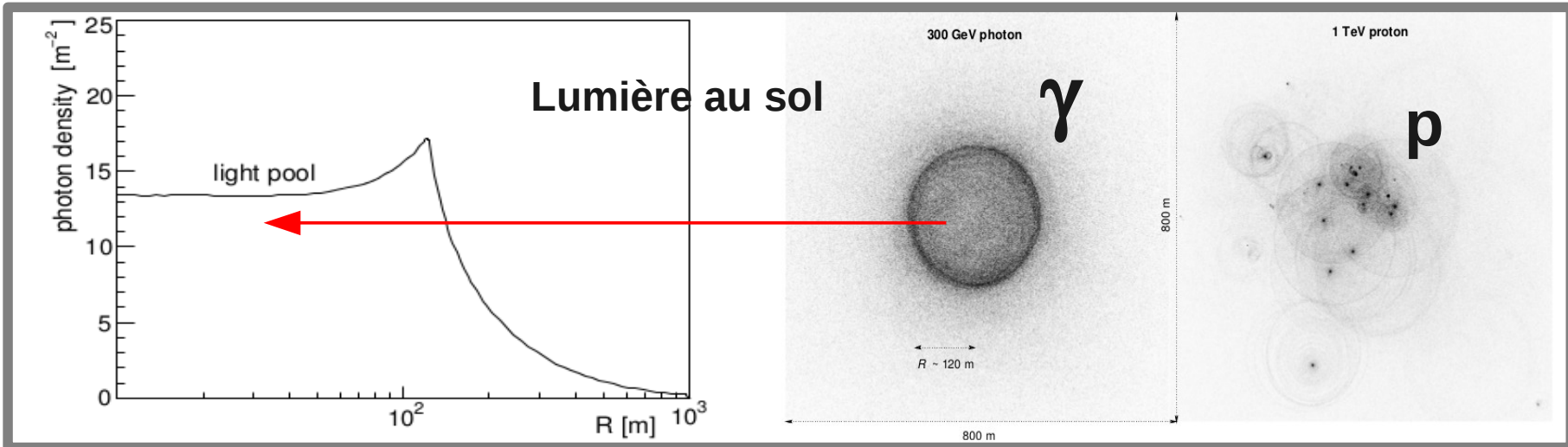
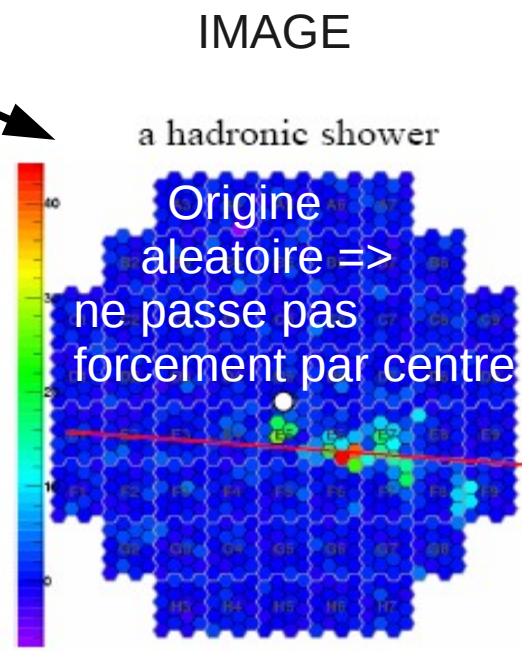


# Caractéristique des images

Flash 5-8 ns

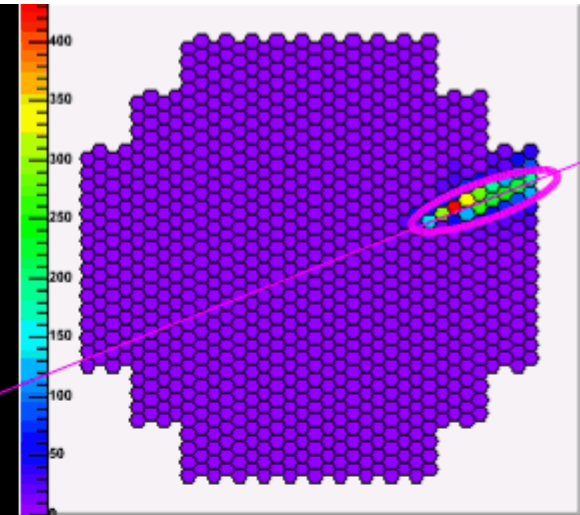
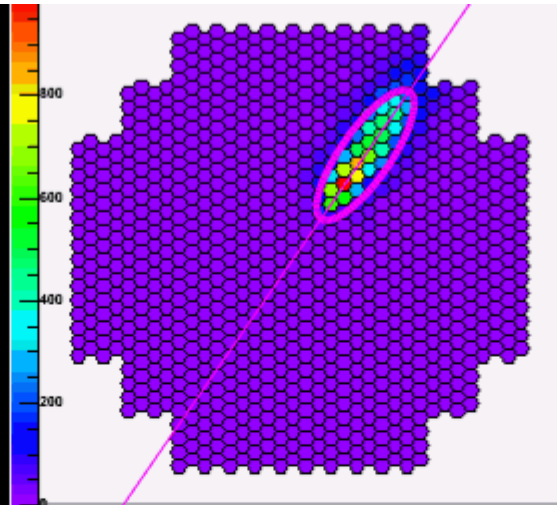
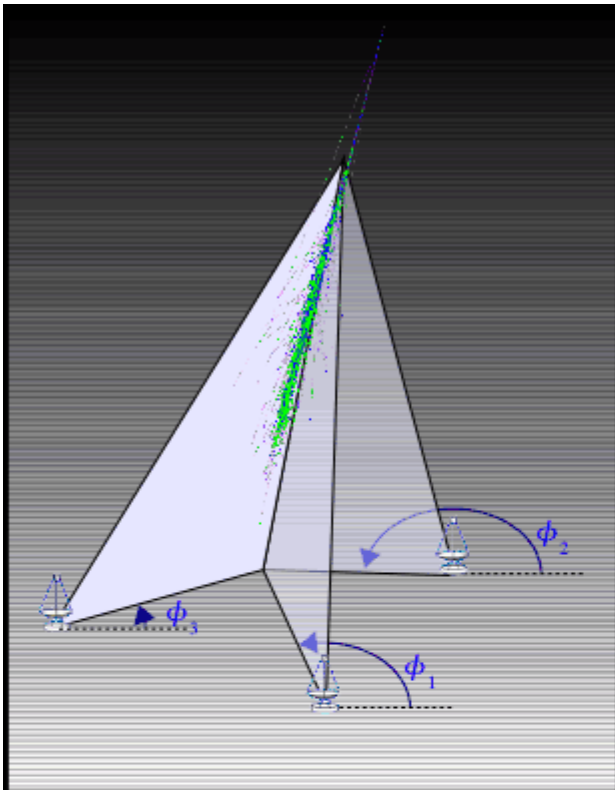


Pas de symétrie de révolution  
Plus étendue latéralement

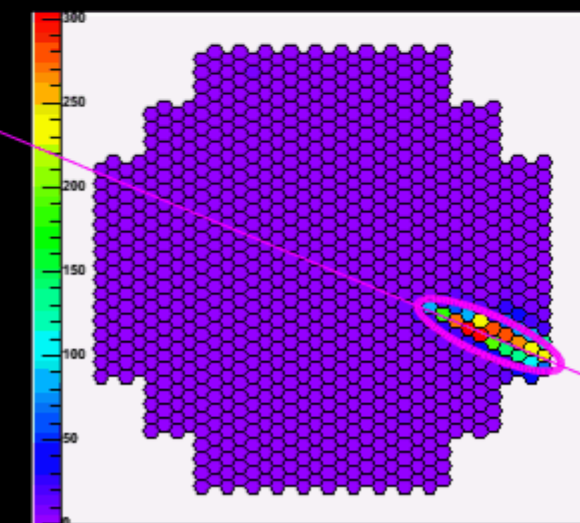
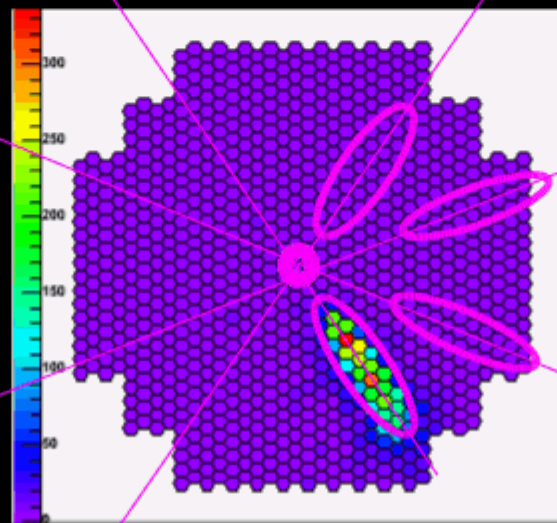




# Plusieurs télescopes : stéréoscopie



Détermination de la direction d'arrivée par photon:  
 $0.14^\circ$  en mono  $\rightarrow$   $0.06^\circ$  en stéréo



# Quelques chiffres

**1937** : Découverte du phénomène de l'émission Cherenkov par Cherenkov.

**1950** : Cherenkov atmosphérique observé mais impossible à exploiter.

**1989** : observation du Crabe et d'AGNs par un télescope au sol imageant la lumière Cherenkov:

**Whipple (Arizona)**

**2003** : mise en fonction de HESS (4 imageurs) : passage de quelques sources identifiées à une trentaine en 2 ans.

**Maintenant** : Magic (2T), HESS (4T) , VERITAS (4T) , Cangaroo (4T). Une centaine de sources.

**Futur** : CTA (Cherenkov telescope array, ~60T) : 1000 sources.

# Détecteurs de gamma au sol

1986-1994 : Mark (7m), Australie



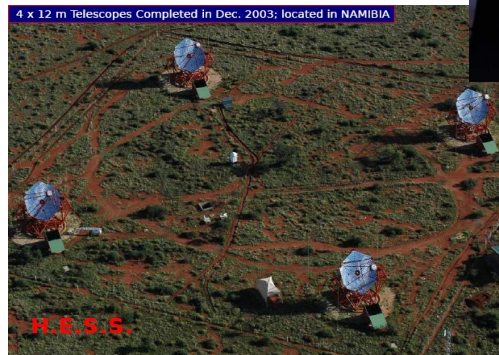
1989 : Crabe puis 2 AGNs (1992, 1995) vus par **Whipple** (1T, Arizona, 10m)

1992-1998 (fin en 2002) : HEGRA (La Palma) 5T 3.9m

1996 : CAT (1T 5m), France site de Themis



2003 HESS (4T 12m, Namibie)



2003 puis 2009 MAGIC (1 puis 2 T 17m, La Palma)



2004 Cangaroo (4T 10m, Australie)

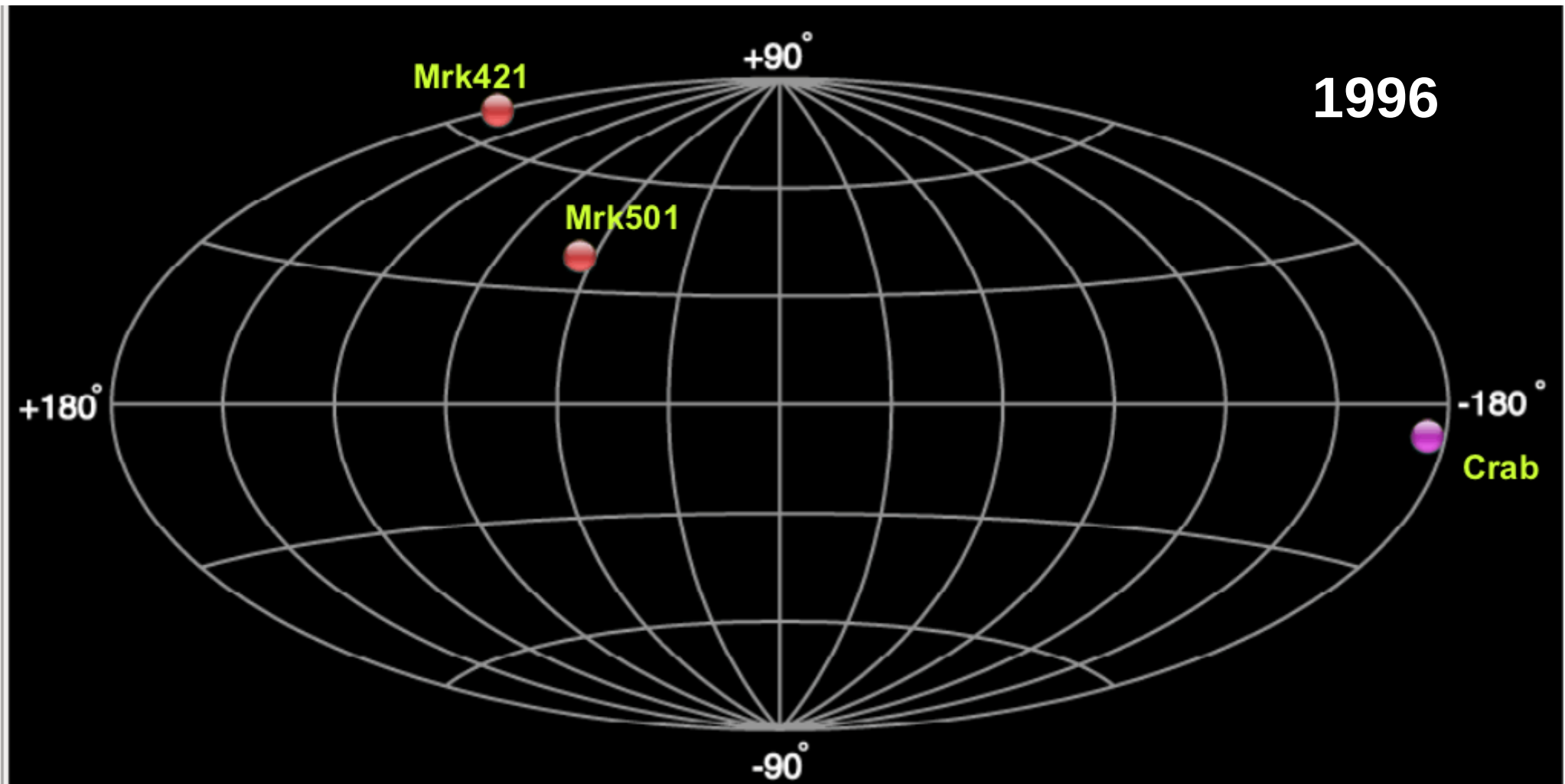
2007 VERITAS (4T 12m, Arizona)





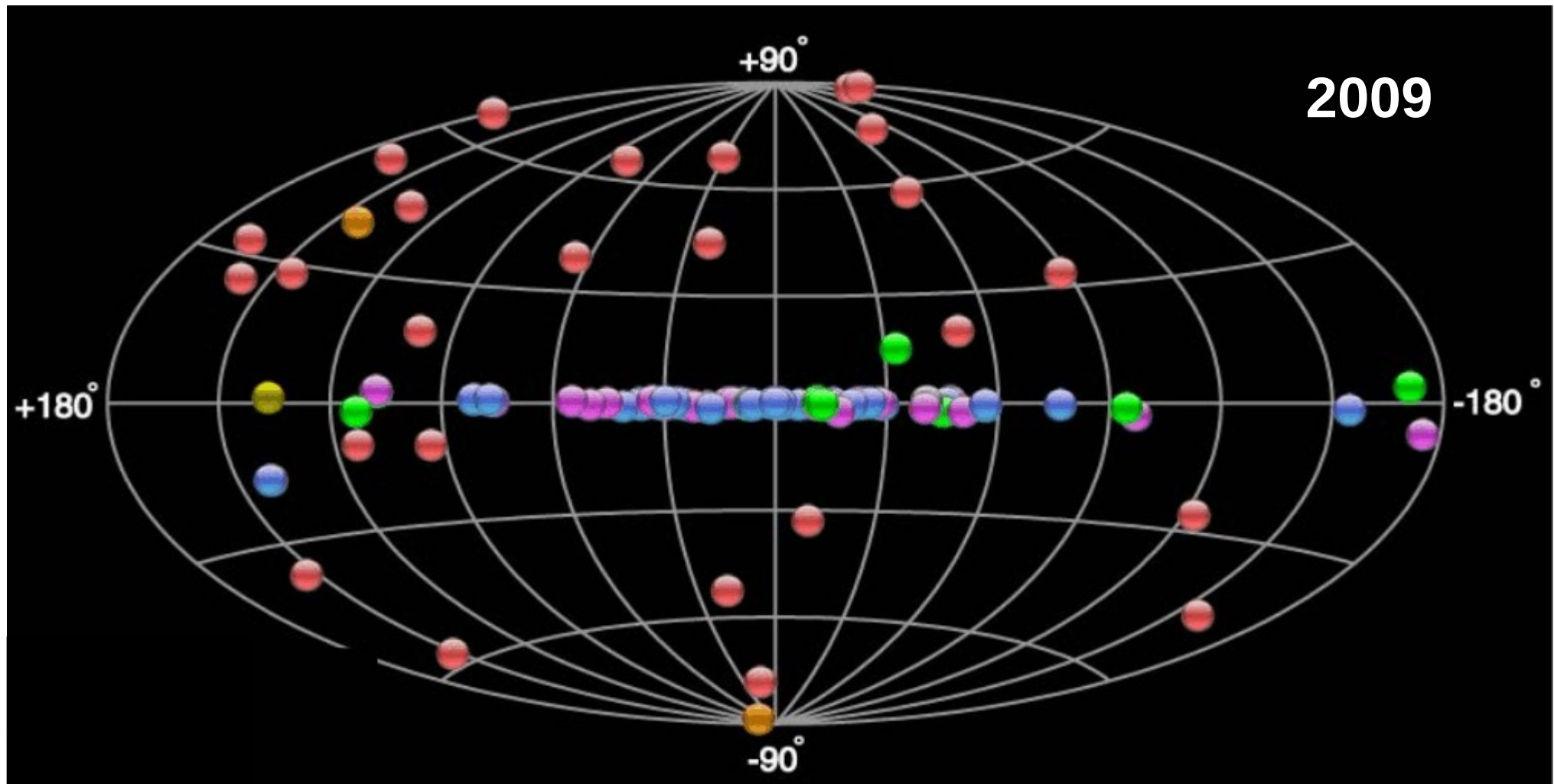
# Détecteurs de gamma au sol

## Evolution du nombre des sources



# Détecteurs de gamma au sol

## Evolution du nombre des sources

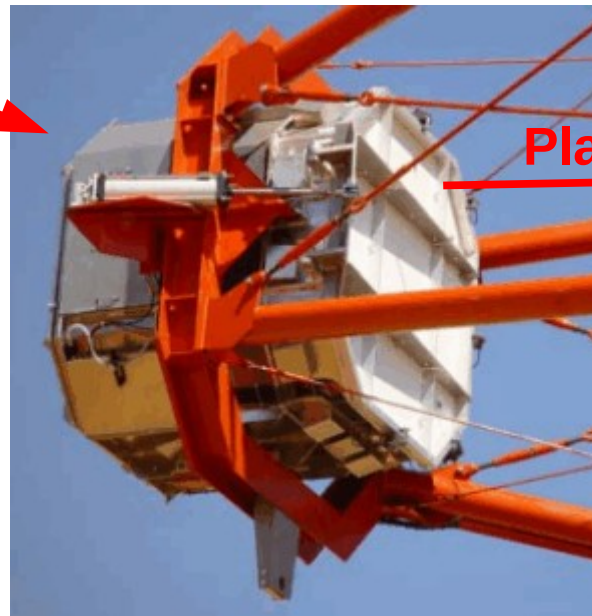


# Détecteurs de gamma au sol : le présent : exemple de HESS

- 4 télescopes de 12m au coins d'un carré de 120m. Focale 15m
- 960 détecteurs de lumière sensibles au photon unique (photomultiplicateur) pour chaque caméra (au lieu de 37 pour Whipple, 600 pour CAT).  $0.16^\circ$ .
- Résolution angulaire  $\sim 0.07^\circ$  avec 4T (pointage absolu  $30''$  arc =  $0.008^\circ$ )
- Champ de vision  $5^\circ$
- Réjection des gerbes hadroniques à 99.9%
- Crabe en 30s (au lieu de 20h en 1989)
- 30 sources les 2 premières années (7 sources étaient connues avant HESS).
- Aujourd'hui : 67 sources dans le catalogue HESS

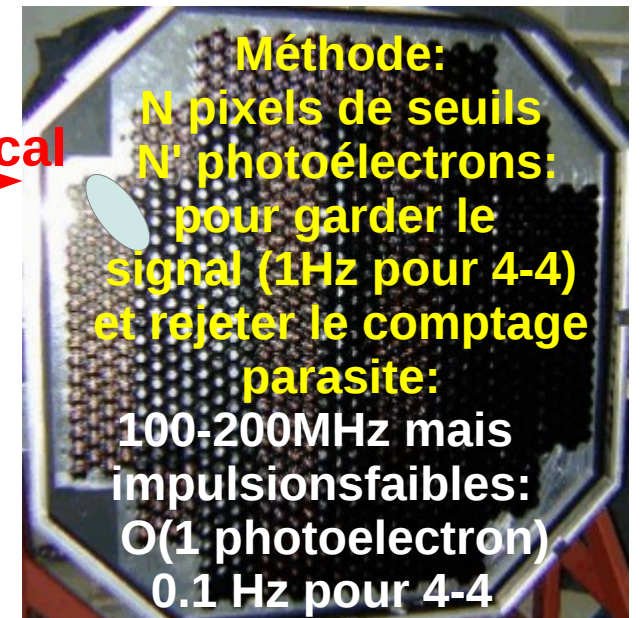


caméra



Plan focal

photomultiplicateurs





# Détecteurs de gamma au sol : le présent : exemple de HESS

**En ce moment...**

Un 5ième  
Télescope, 28m de diamètre:  
Seuil baissé à 20 GeV.

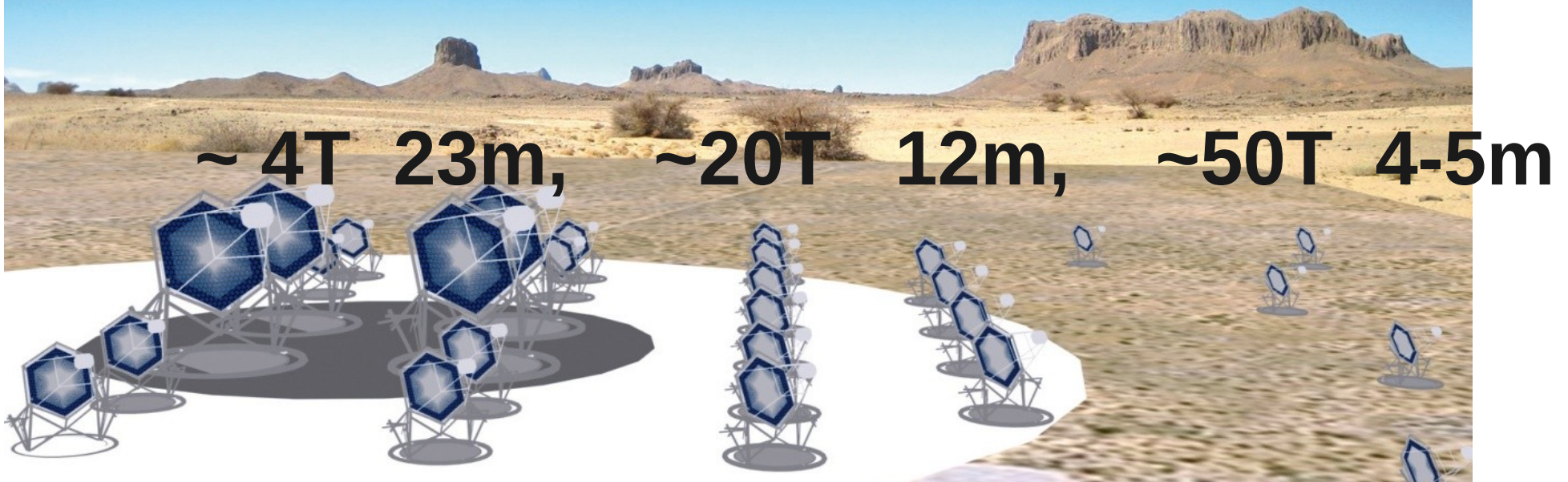
A partir de 50 GeV,  
Fonctionnement  
En "stéréo"  
avec les 4 de 12m



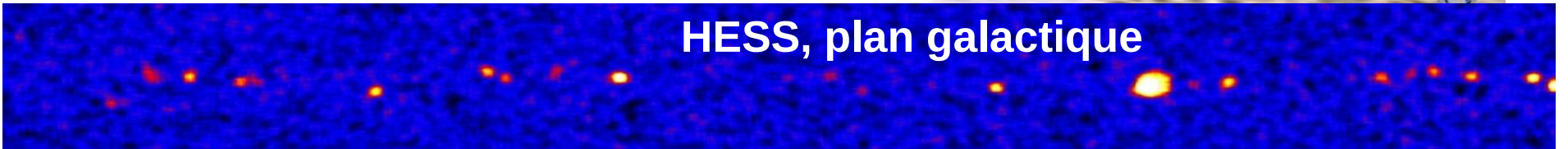
Par rapport à HESS : sensibilité x 10.  
1000 sources attendues.

# Le Futur : CTA

Cerenkov Telescope Array



HESS, plan galactique

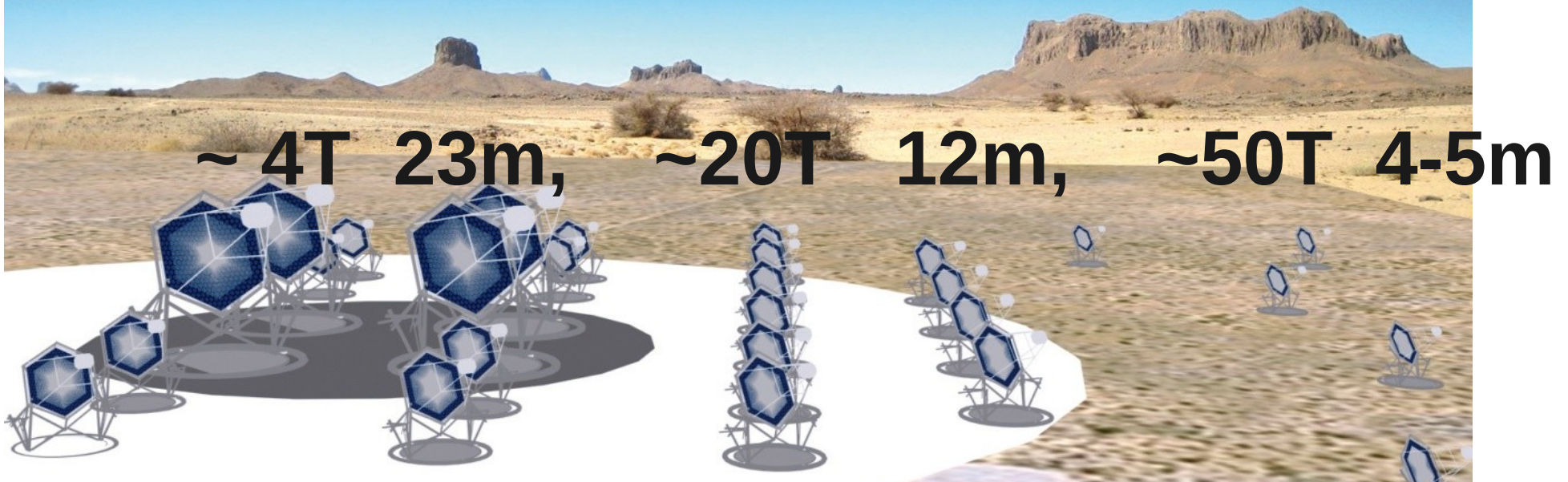




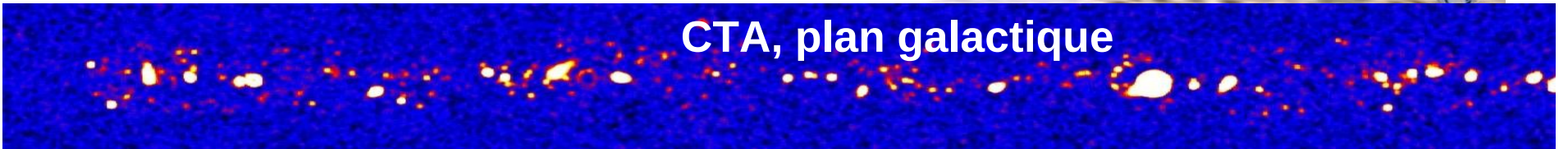
Par rapport à HESS : sensibilité x 10.  
1000 sources attendues.

# Le Futur : CTA

Cerenkov Telescope Array



CTA, plan galactique





# Le futur : CTA. Ou ?

Sites potentiels, de ~1800m à 3600m

Un réseau au Nord, un réseau au sud



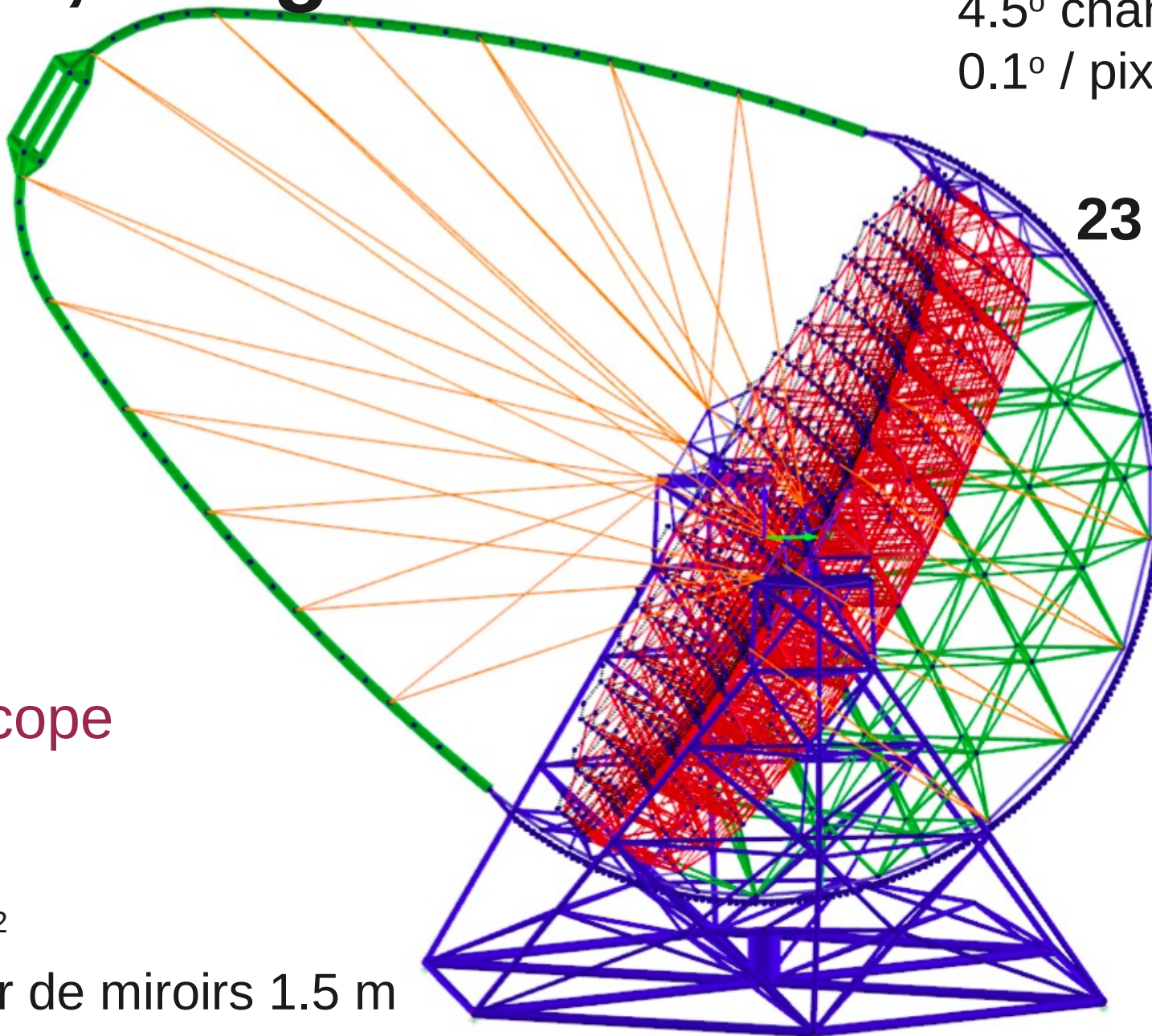
# CTA, les grands

27.8 m focale  
4.5° champ de vue  
0.1° / pixel

23 m

Large  
Size  
Telescope

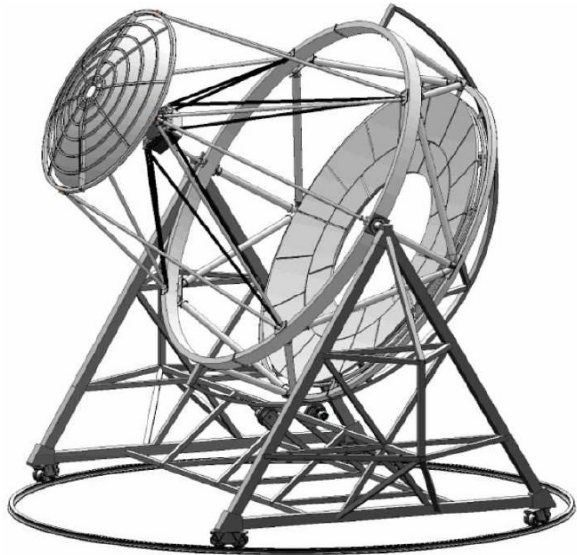
400 m<sup>2</sup>  
Damier de miroirs 1.5 m





# CTA, les moyens

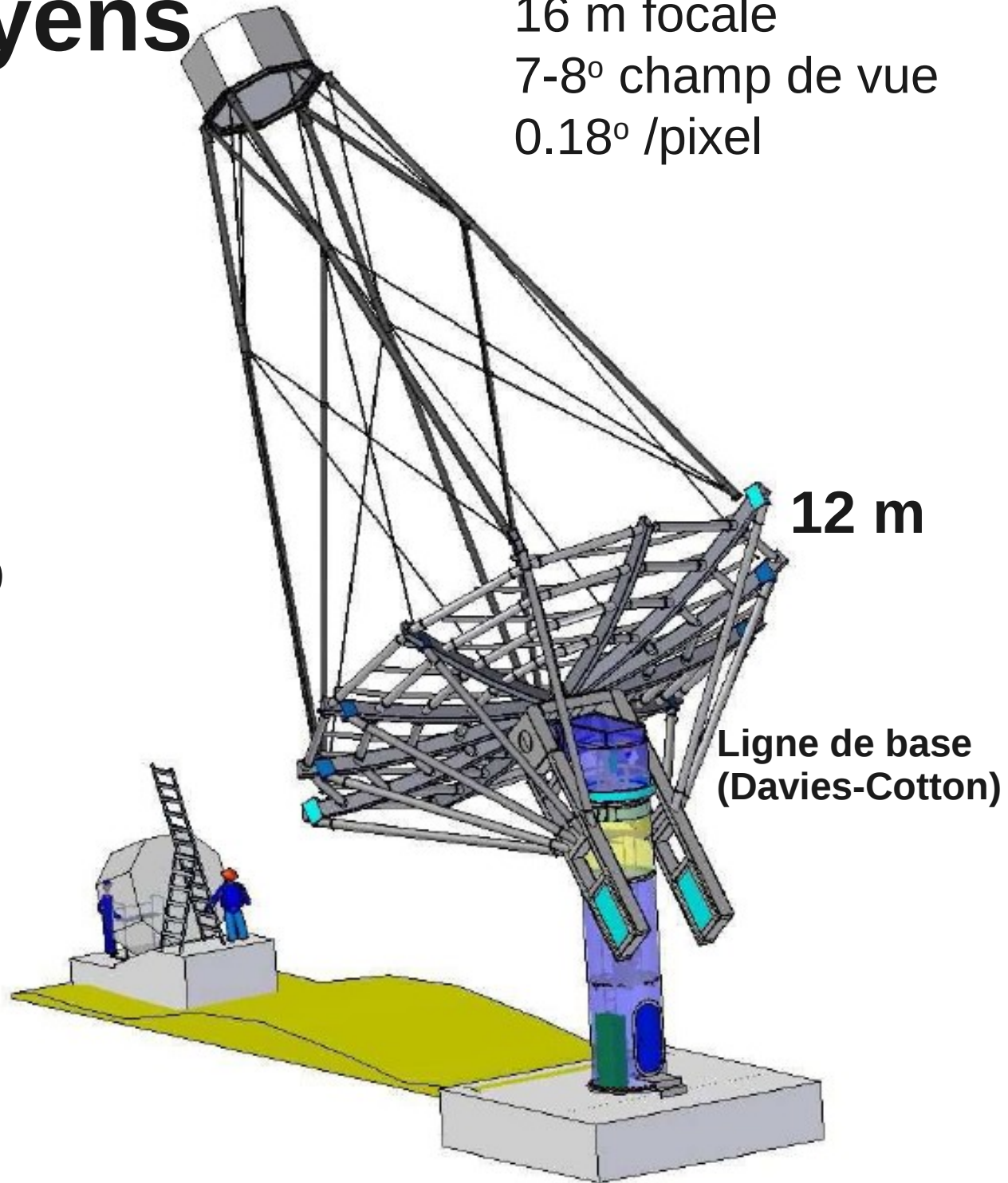
16 m focale  
7-8° champ de vue  
0.18° /pixel



*Option US (Schwarzschild-Couder)*

**Medium  
Size  
Telescope**

100 m<sup>2</sup>  
damier de miroirs 1.2 m



**12 m**

**Ligne de base  
(Davies-Cotton)**

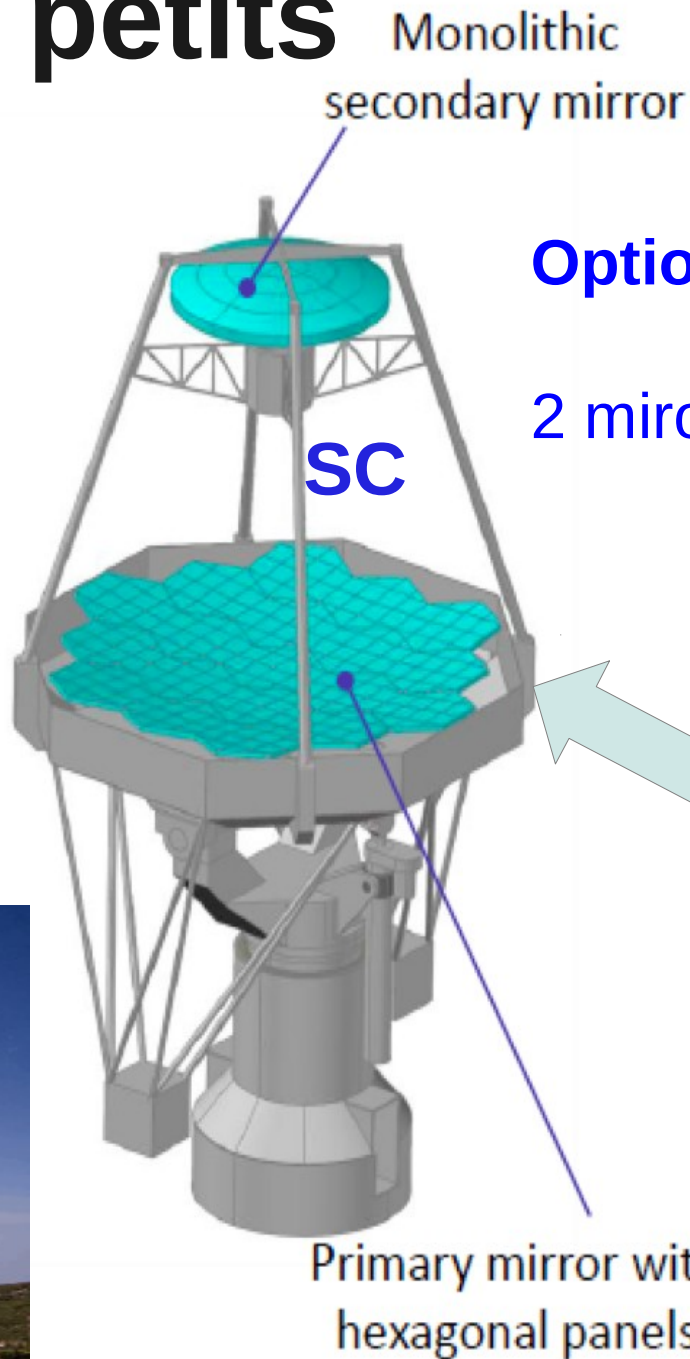


# CTA, les petits

**SC=**  
Schwarzschild  
-Couder  
(2 miroirs)

**DC=**  
Davies-Cotton  
(1 miroir)

**Small  
Size  
Telescope**

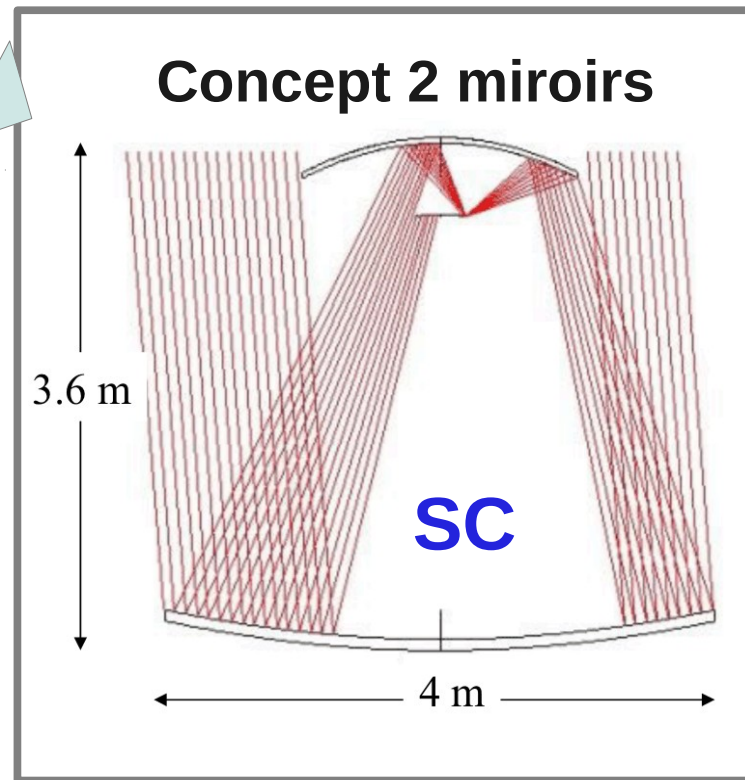


10° champ de vue

**Options étudiées :**

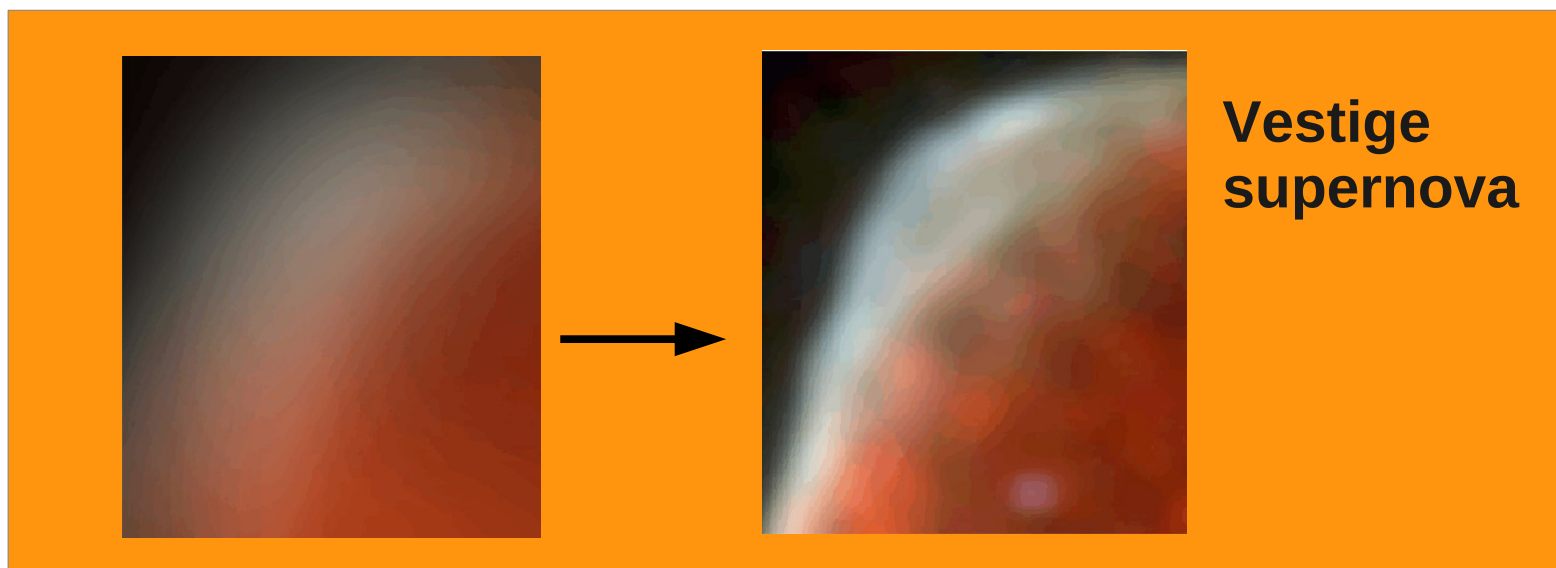
2 miroirs (SC) ou un miroir (DC)

diamètre **4m-5m**



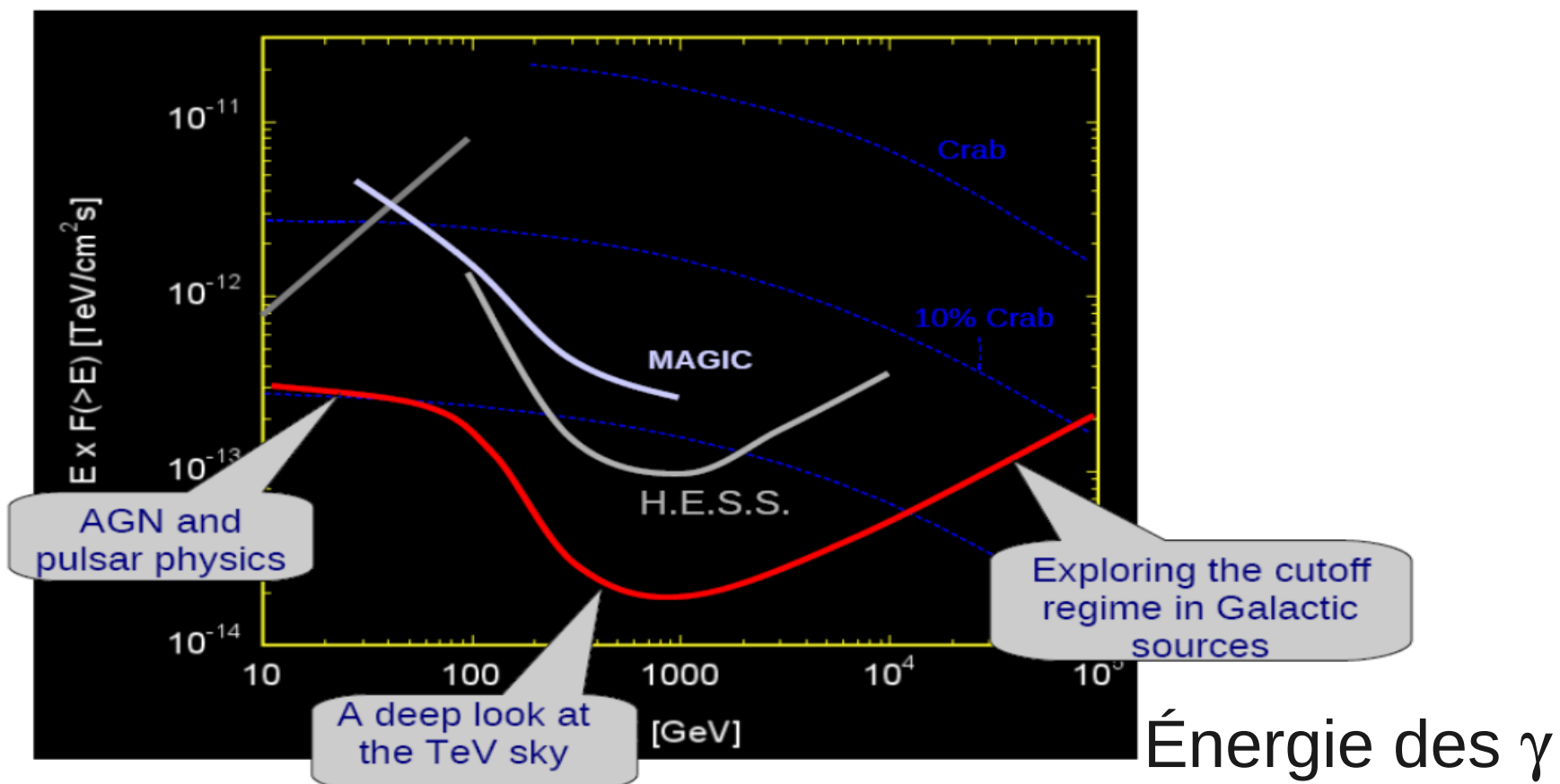
DC 4m: 0.28° / pixel ,Focale 5.6m

Le futur :  
CTA,  
performances



Résolution angulaire améliorée (x5) :  $0.1^\circ$  à  $0.02^\circ$

sensibilité



# Le futur : CTA. Quand ?

- Début installation 2014
- Premières données 2016/17
- Réseau complet en 2018



# Conclusion

- L'idée d'une astronomie gamma au sol a germé dans les années 60.
- Elle a été concrétisée dans les années 90.
- Elle sera un standard (observatoire avec données publiques) en 2020.
- Les hautes énergies qu'elle concerne complètent les satellites (avec recouvrement).
- Grâce aux détecteurs gamma (+ autres longueurs d'onde: X) spatiaux et terrestres, les mécanismes des sources se précisent