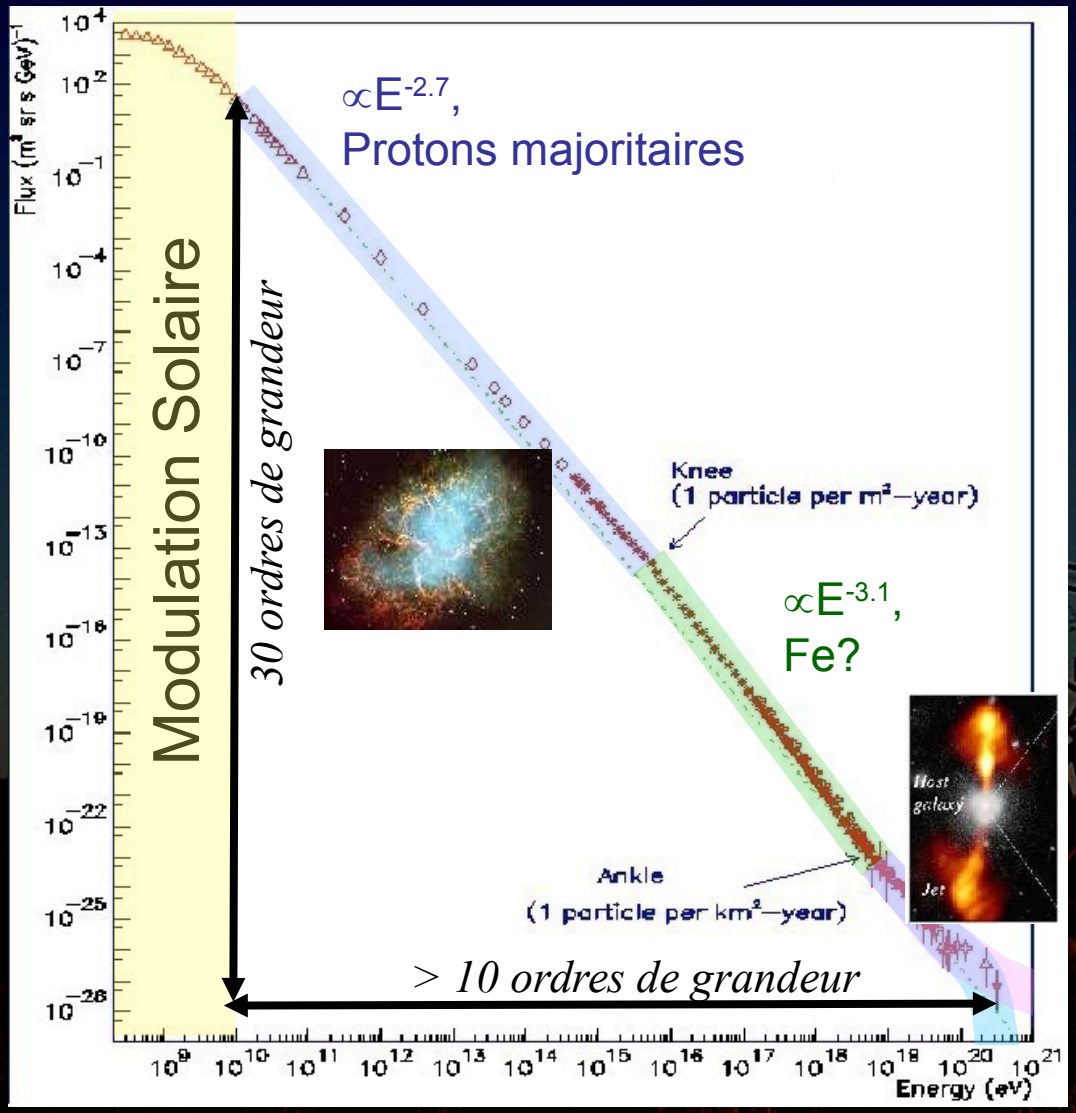
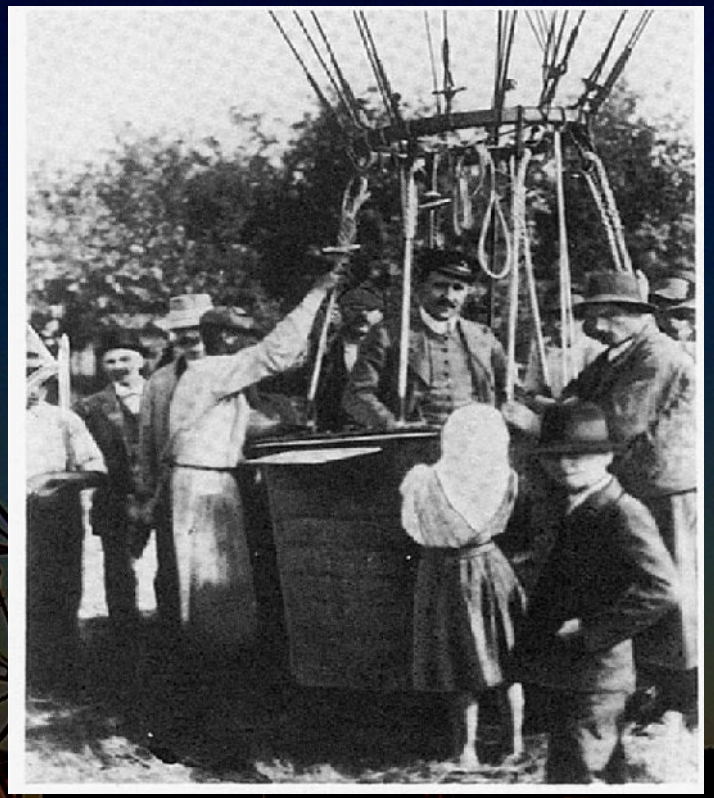
Imagerie Cherenkov atmosphérique : un regard sur l'univers de très haute énergie

Mathieu de Naurois
LLR IN2P3-CNRS-Ecole Polytechnique

Le contexte, la technique

Le mystère des rayons cosmiques

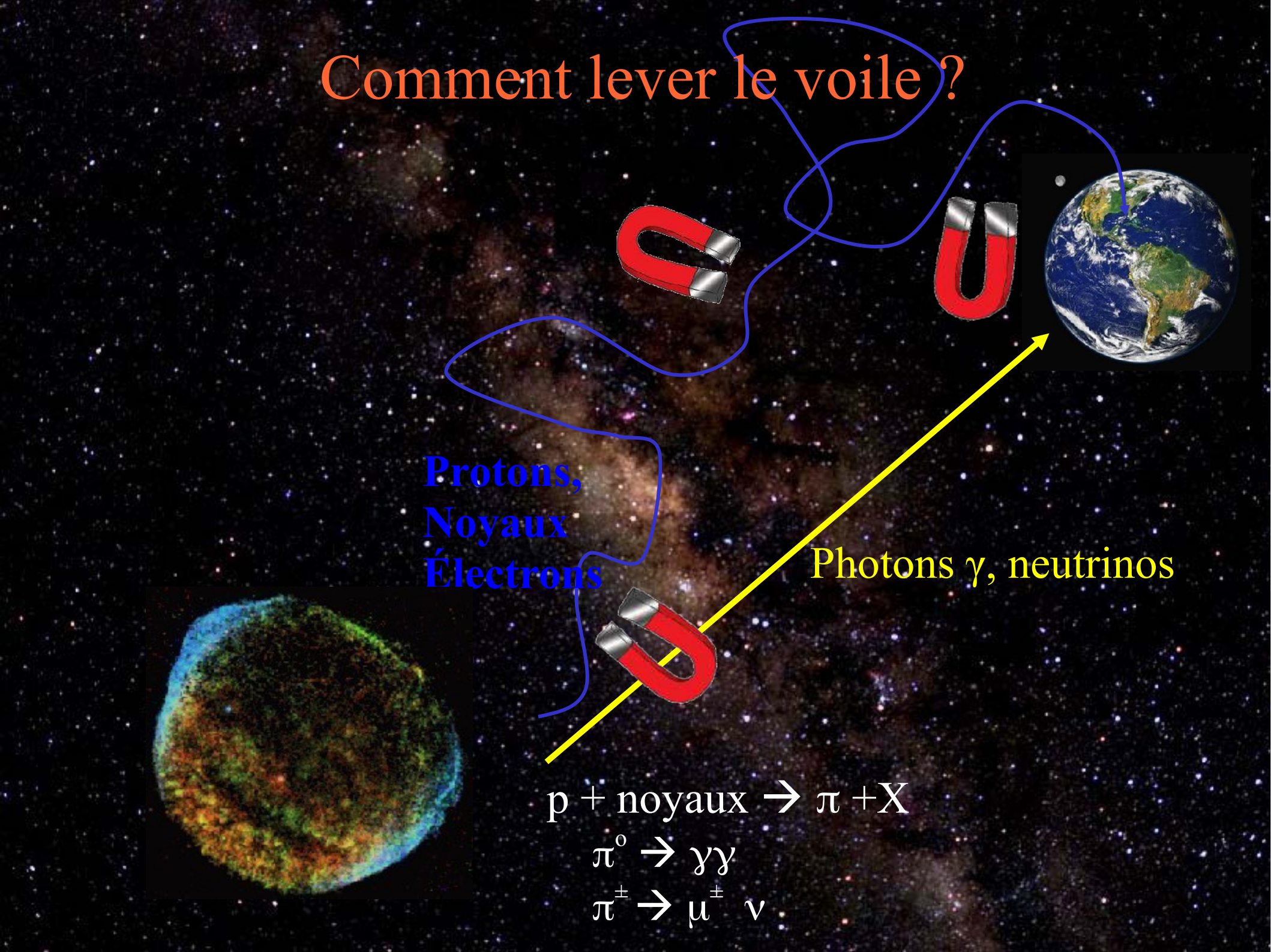




Découverte
Vol en Ballon
Victor Hess, 1912

- Découverts en 1912 (Victor HESS)
- 10 ordres de grandeurs en énergie, 30 en flux
- Origine encore inconnue (galactique < 10^{15} eV, extragalactique au dessus ?)

Comment lever le voile ?



Protons,
Noyaux
Électrons

Photons γ, neutrinos

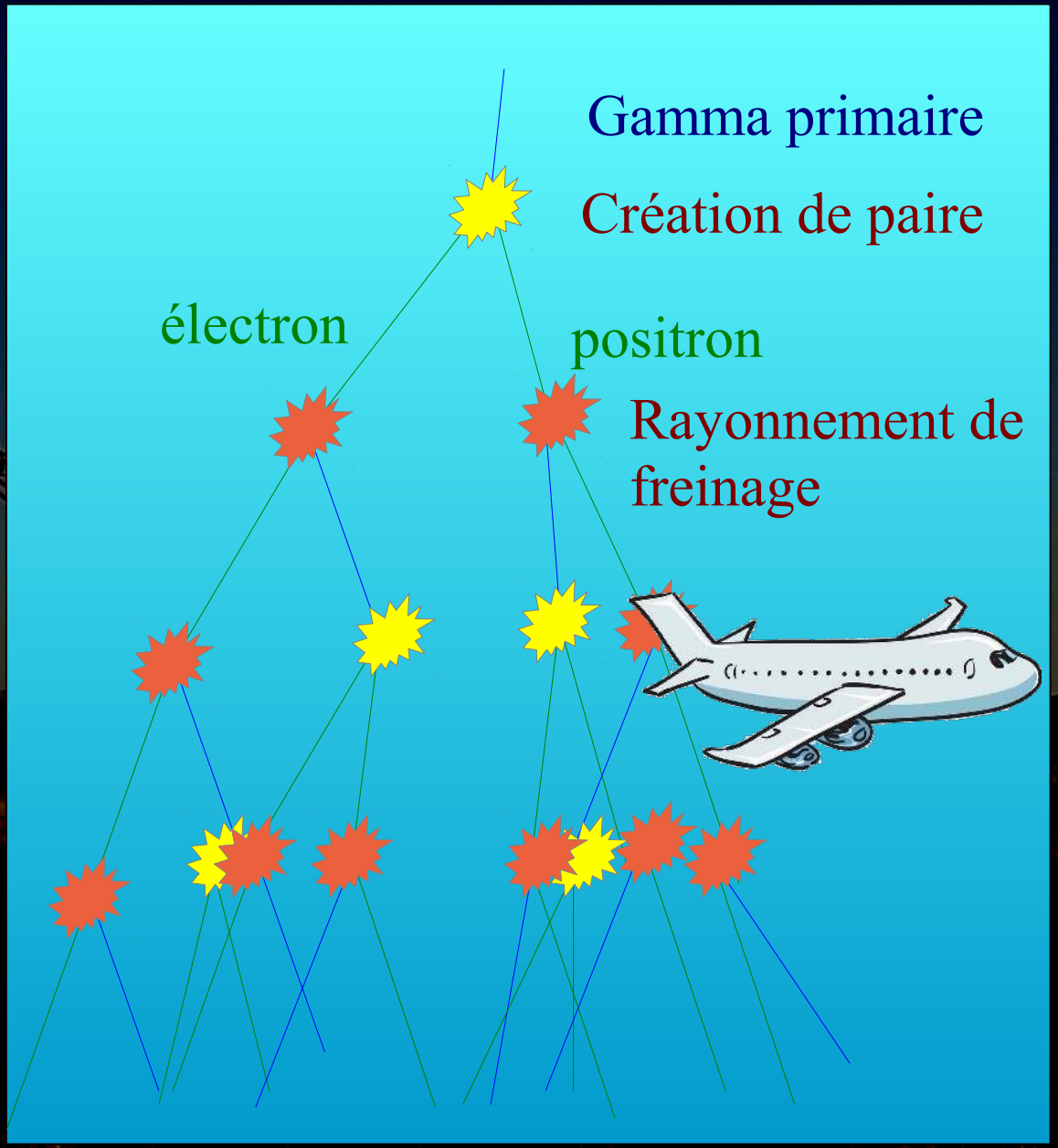
$p + \text{noyaux} \rightarrow \pi + X$

$\pi^{o} \rightarrow \gamma\gamma$

$\pi^{\pm} \rightarrow \mu^{\pm}\ \nu$

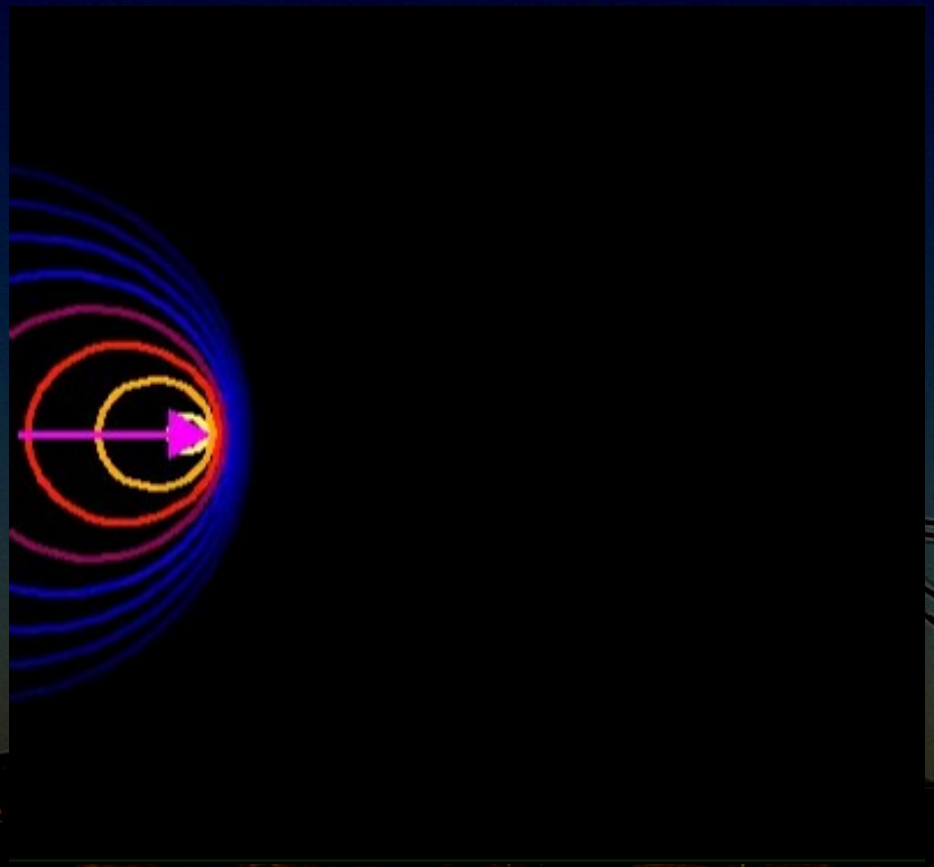
Cascades atmosphériques

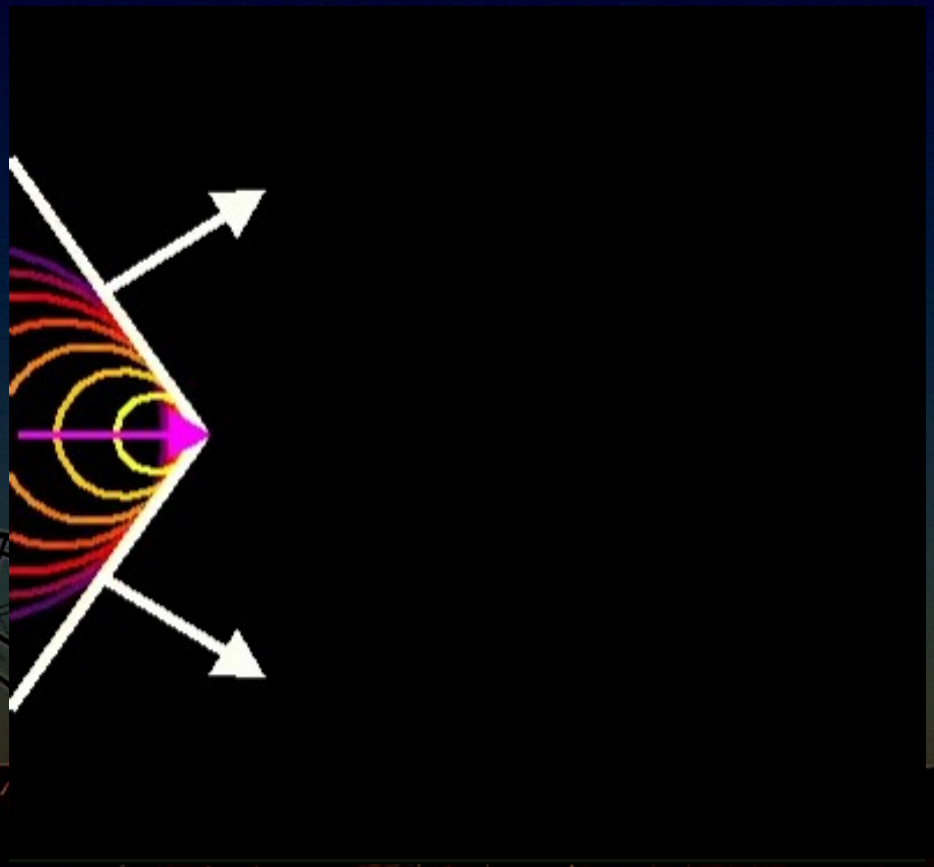
- Interaction du photon primaire avec un noyau de l'atmosphère
- Succession de créations de paire et de rayonnement de freinage
- L'énergie est ainsi peu à peu redistribuée en un grand nombre de particules et absorbée dans l'atmosphère
- Les cascades issues de protons (et de noyaux) comportent en sus des fragments nucléaires et des particules pénétrantes (muons, ...)



Cascades atmosphériques

Émission Cherenkov



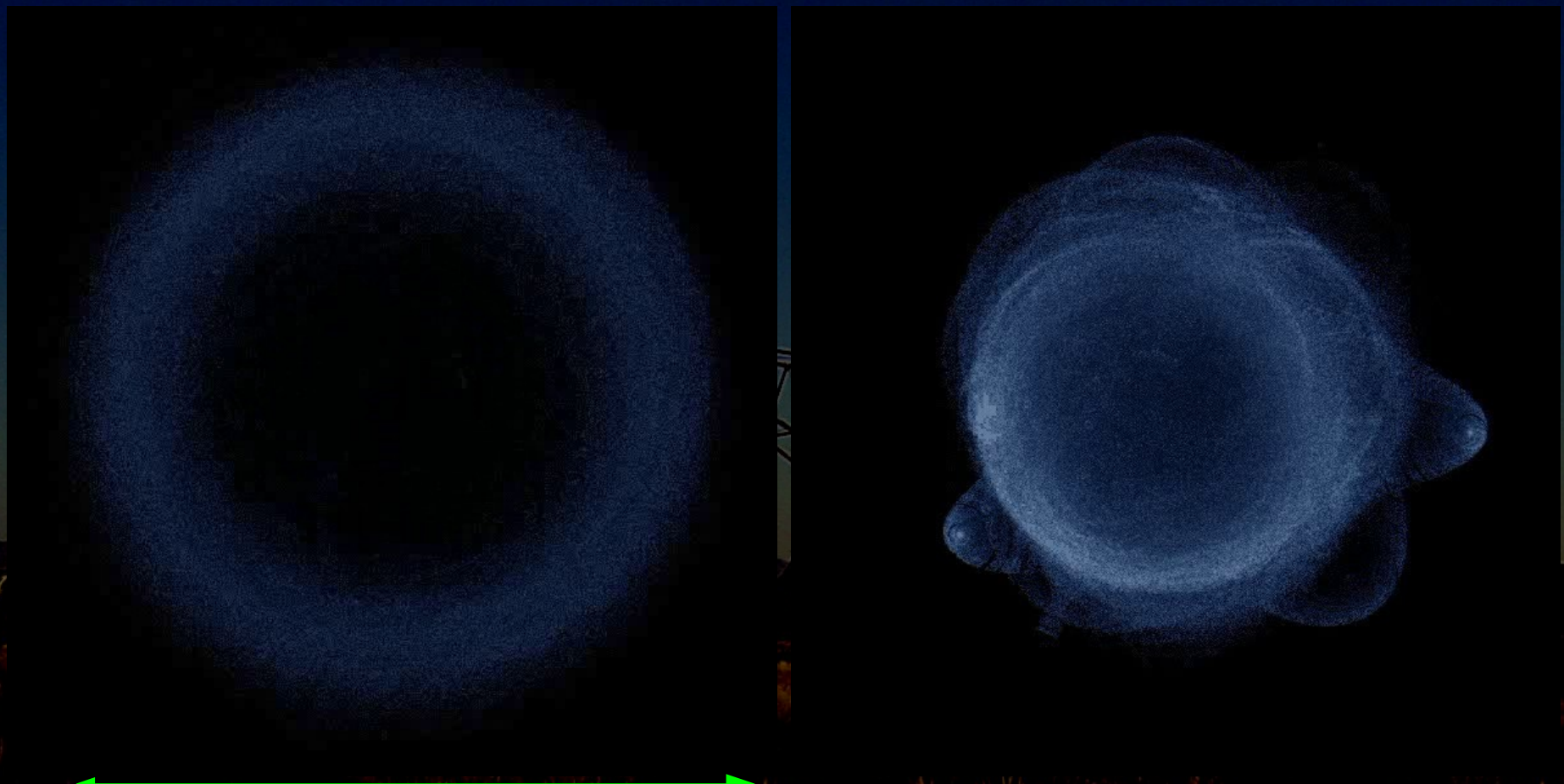


- Lorsque la lumière est ralentie dans le milieu, l'onde est comprimée à l'avant
- Lorsque la particule va plus vite que la lumière (dans le milieu), les ondes sont en phase sur un front, et un bang lumineux se produit

Émission Cherenkov des cascades

γ, 100 GeV

Protons, 500 GeV



300m

Simulations: K. Berlöhr

- Émission très ténue et très brève (qqs milliardièmes de secondes)
- Cascades de protons plus fluctuantes (permet une différentiation)

Techniques expérimentales

TIBET

Eau ou scintillateur

Primaire (γ,hadron)

Cascade Atmosphérique

Détecteur de Hadrons

μ

MILAGRO

Primaire (γ,hadron)

Cascade Atmosphérique

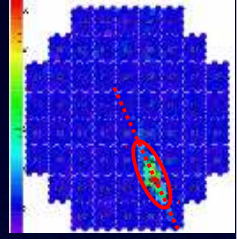
Émission Cherenkov

Télescope Cherenkov

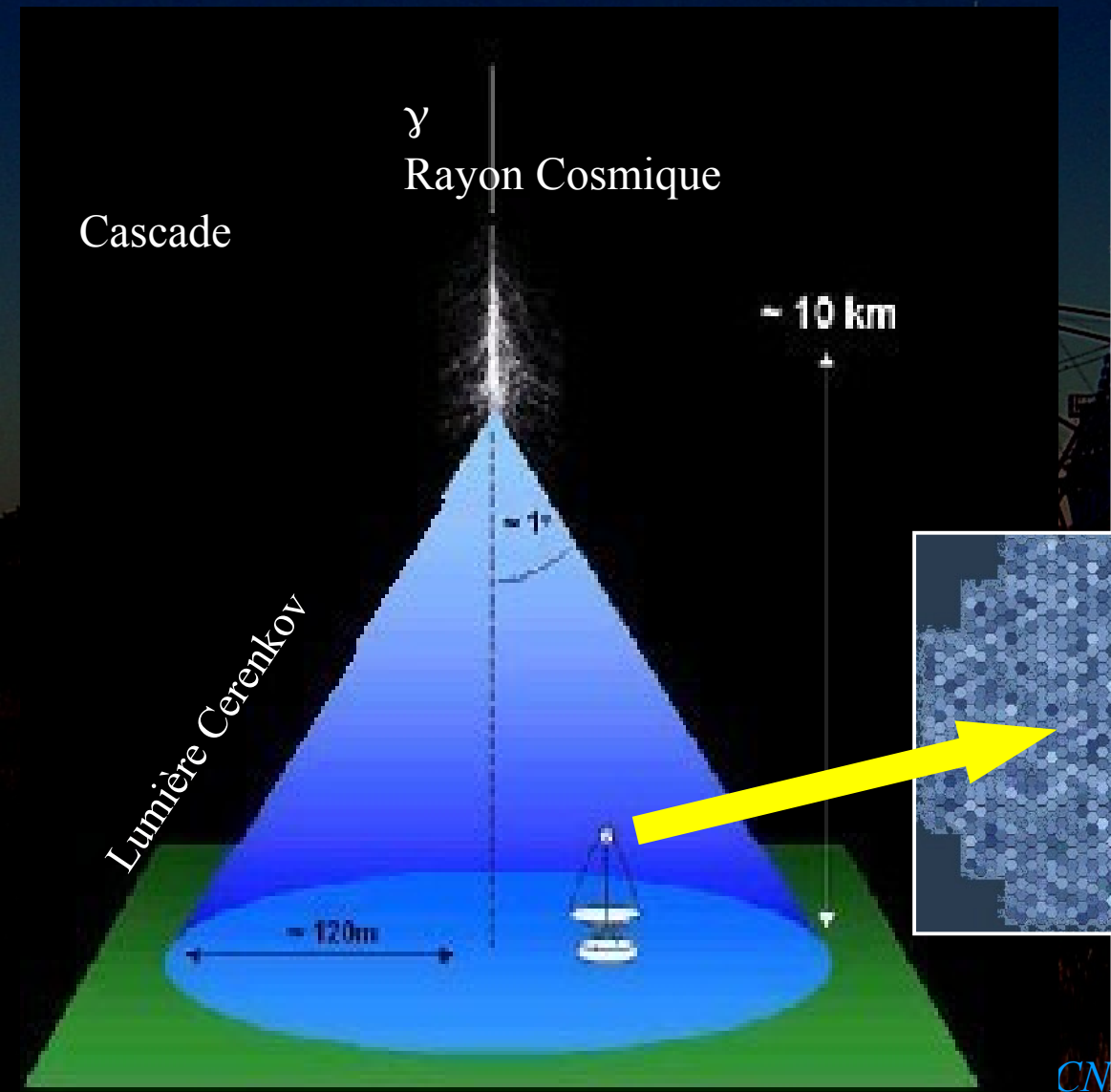
HESS, VERITAS, MAGIC, CANGAROO

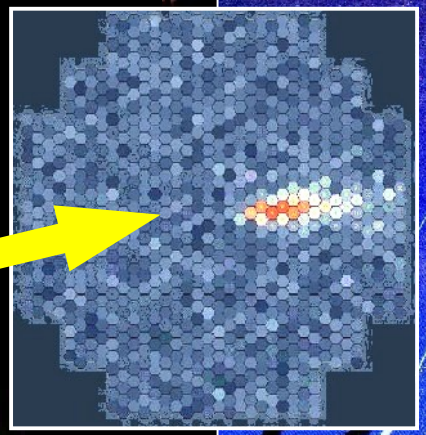
STACEE, CELESTE, SOLAR II, GRAAL

Technique Cherenkov Atmosphérique

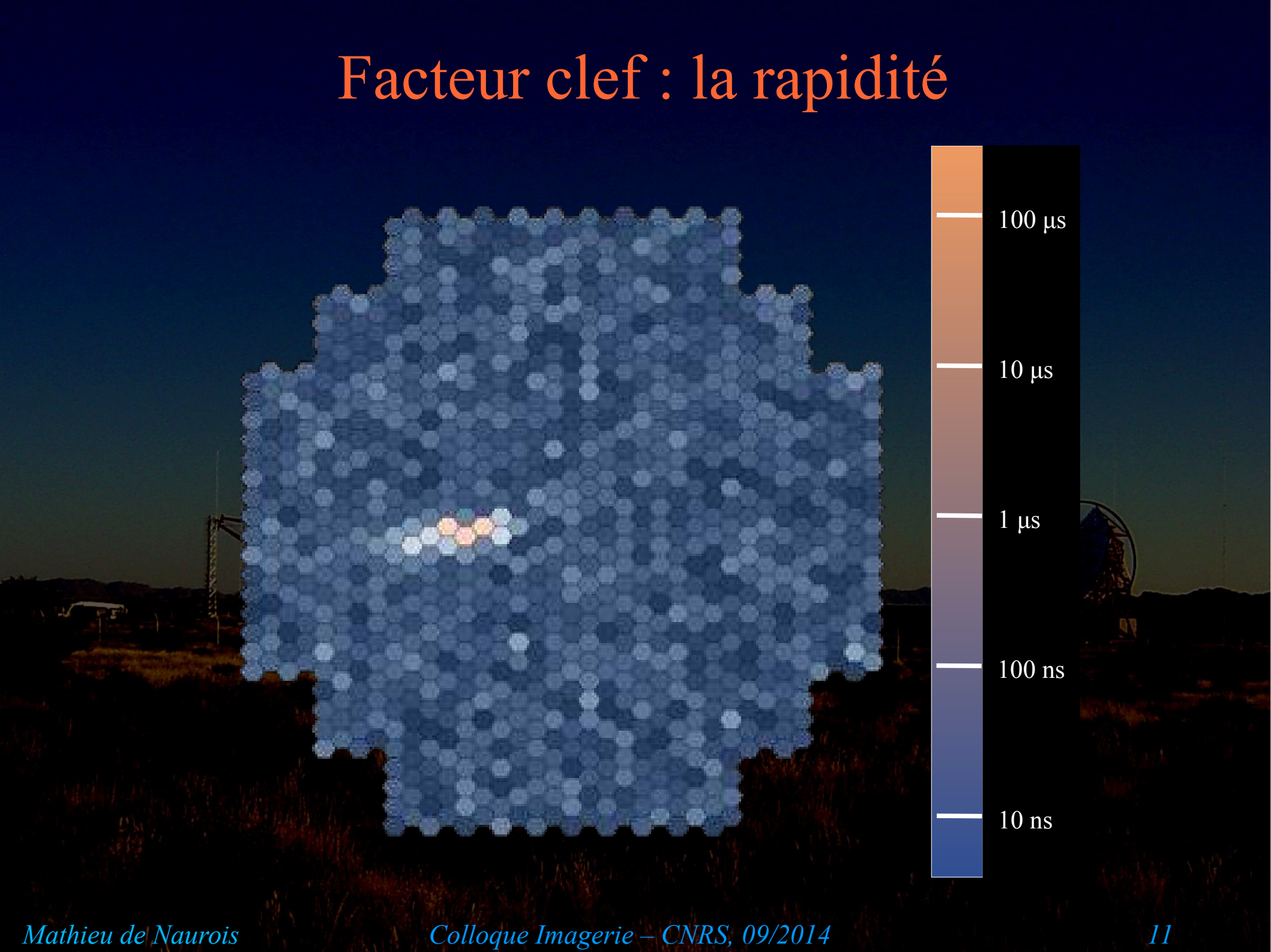


Sky & Telescope

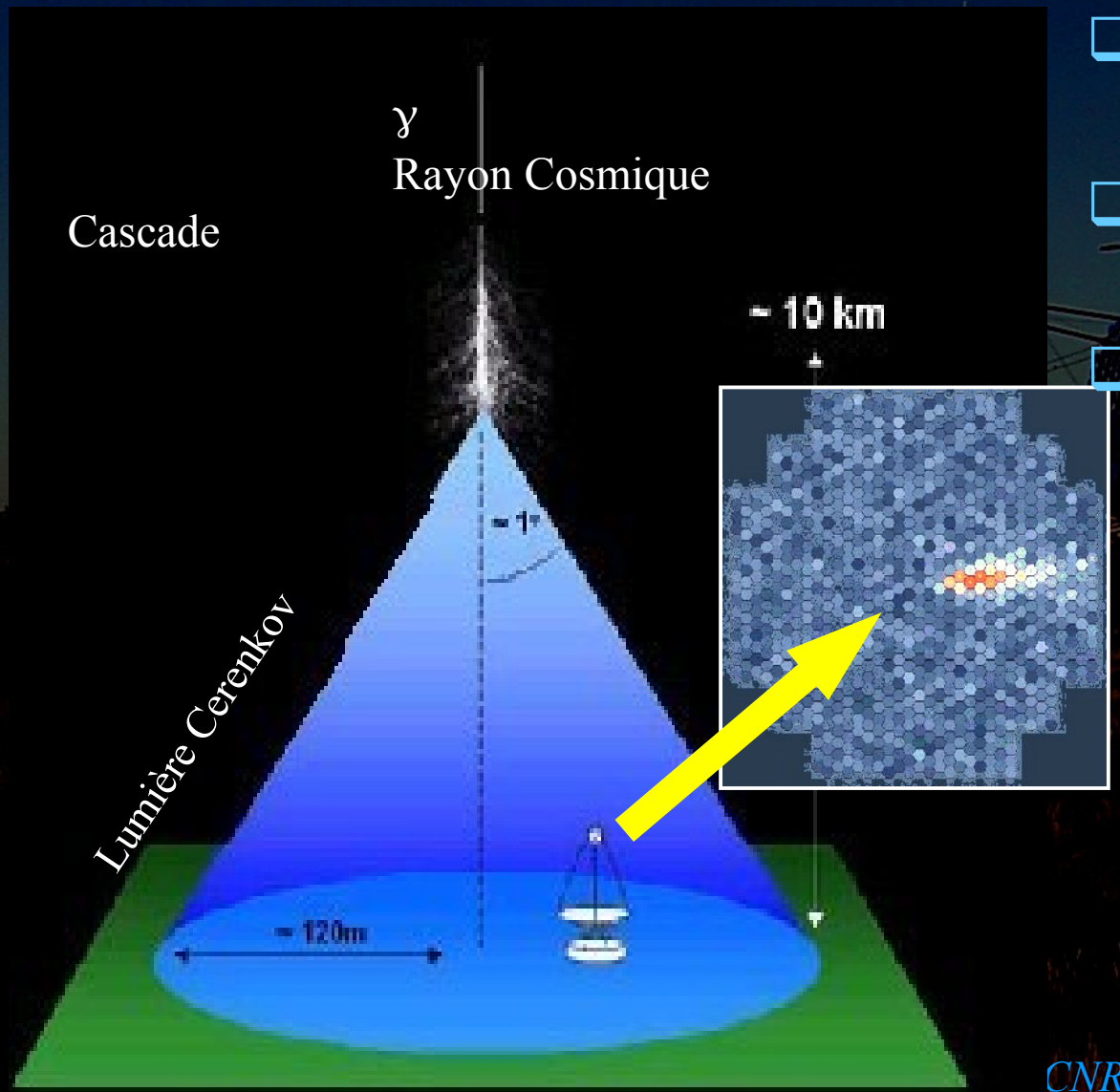




Facteur clef : la rapidité

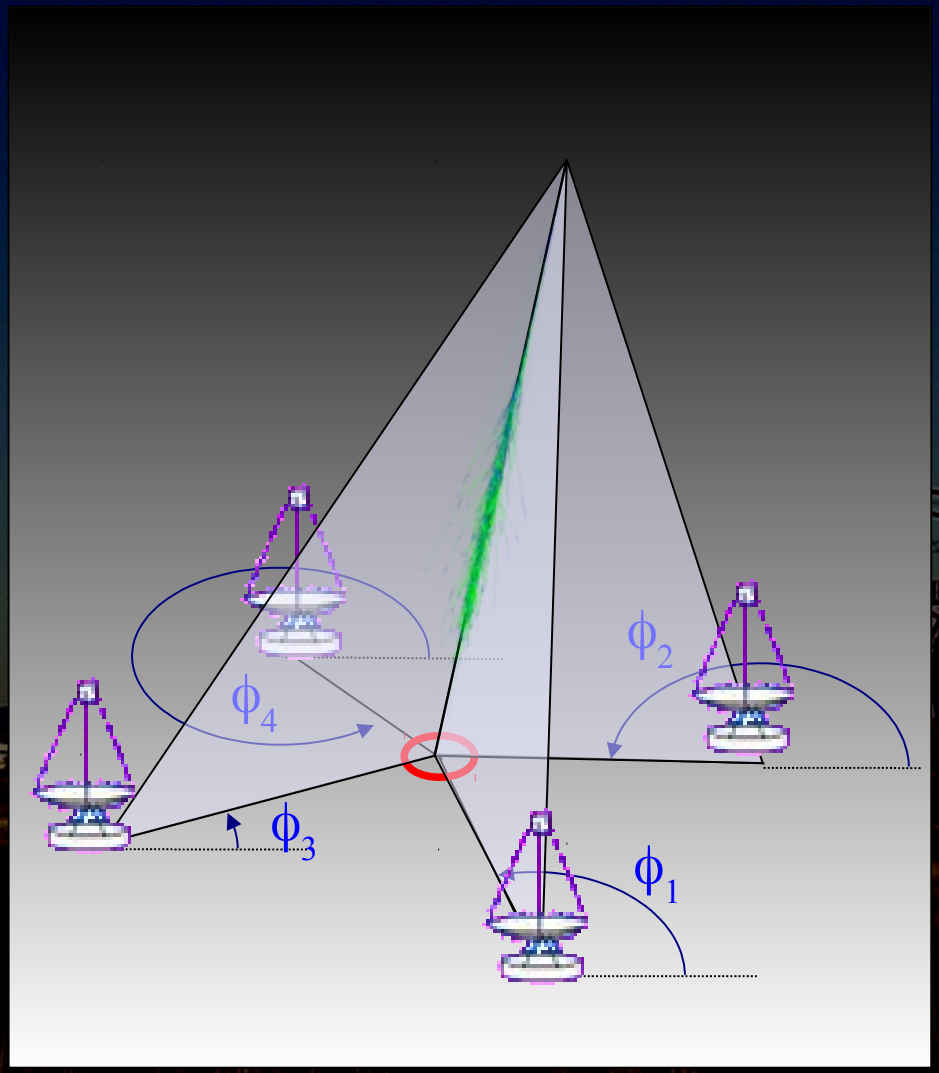


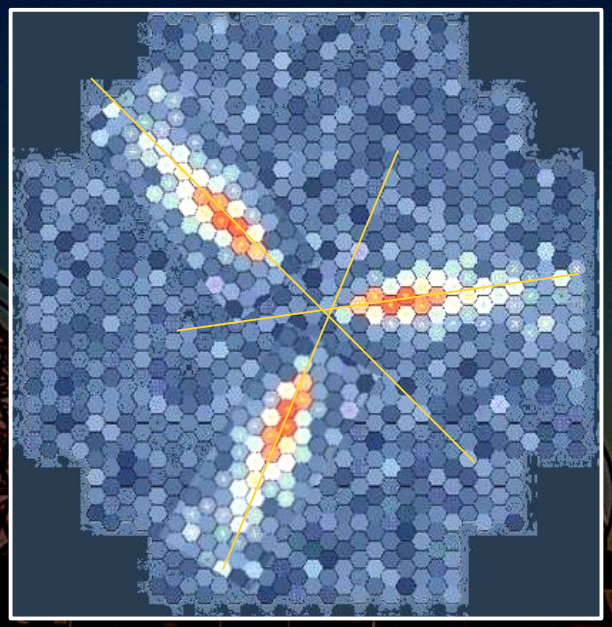
Technique Cherenkov Atmosphérique



- Crabe > 1 TeV : ~ 1 γ/siècle/m^2
- Surfaces de détection très importante: > 10^5 m^2
- Technique Cherenkov Atmosphérique adaptée
- Mais bruit de fond hadronique important:
  - Quelques γ par minute pour les sources les plus intenses
  - 400 Hz de fond (rayons cosmiques)

Vision stéréoscopique

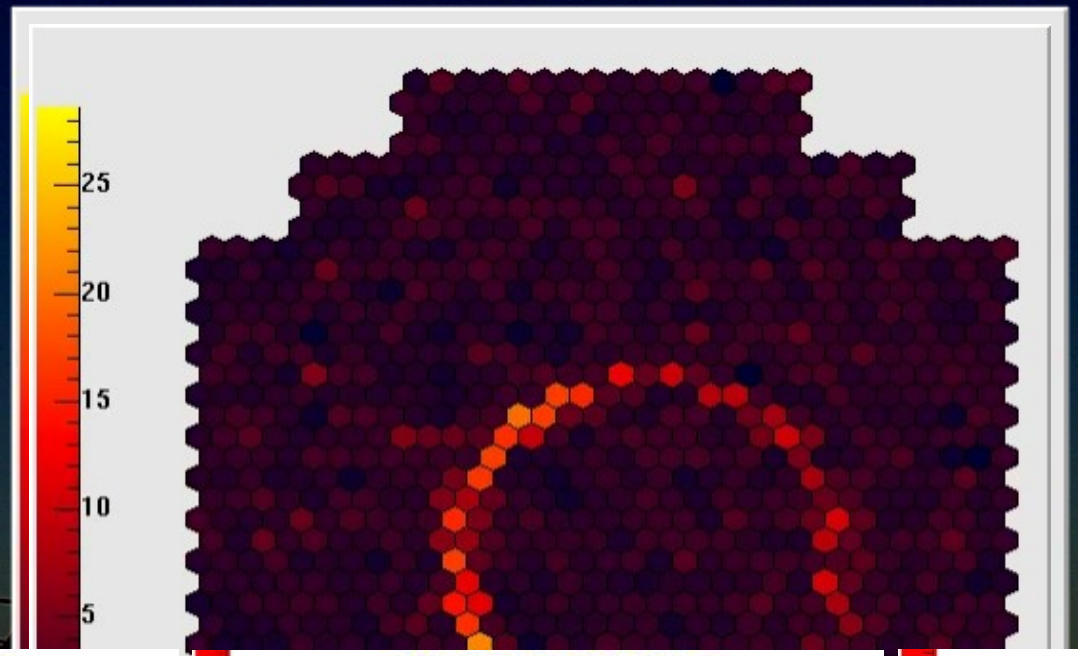


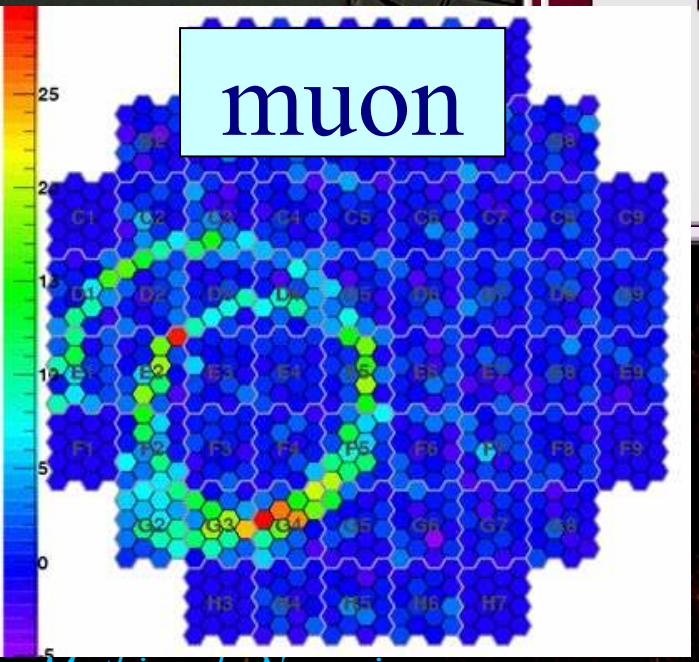


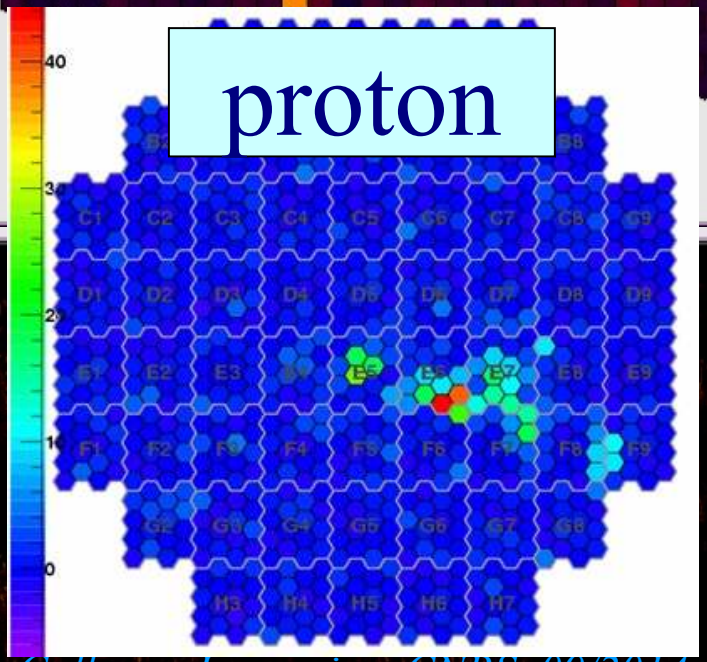
Images de 3 télescopes superposées

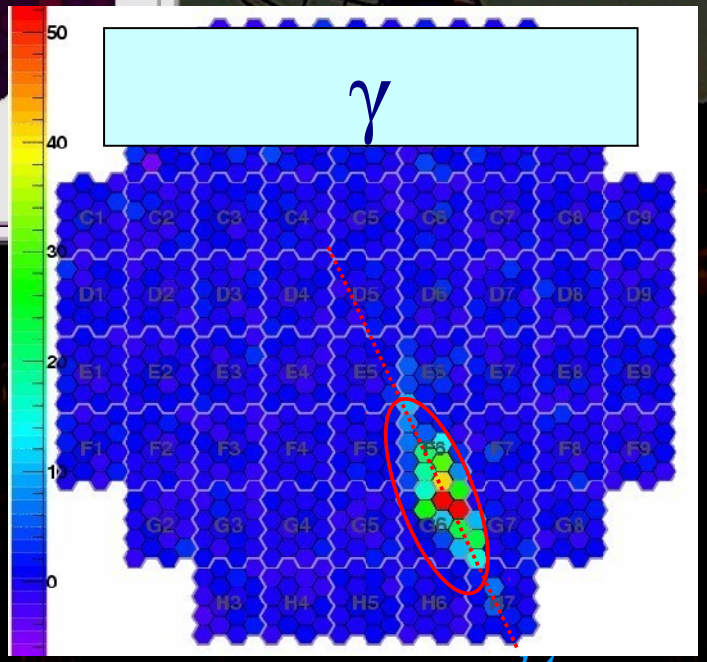
- La vision stéréoscopique permet une identification aisée de la direction et de l'impact de la cascade.

Événements



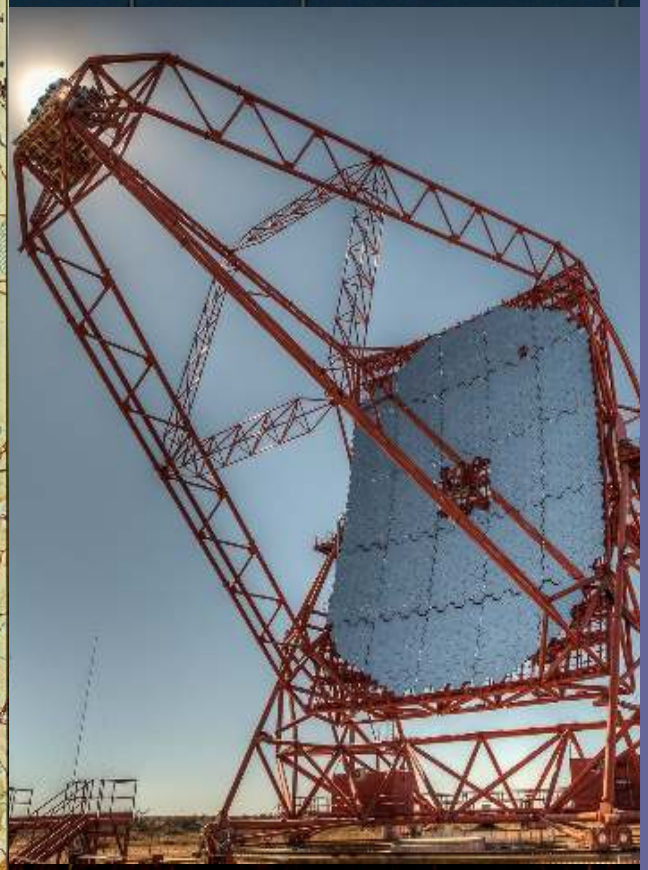






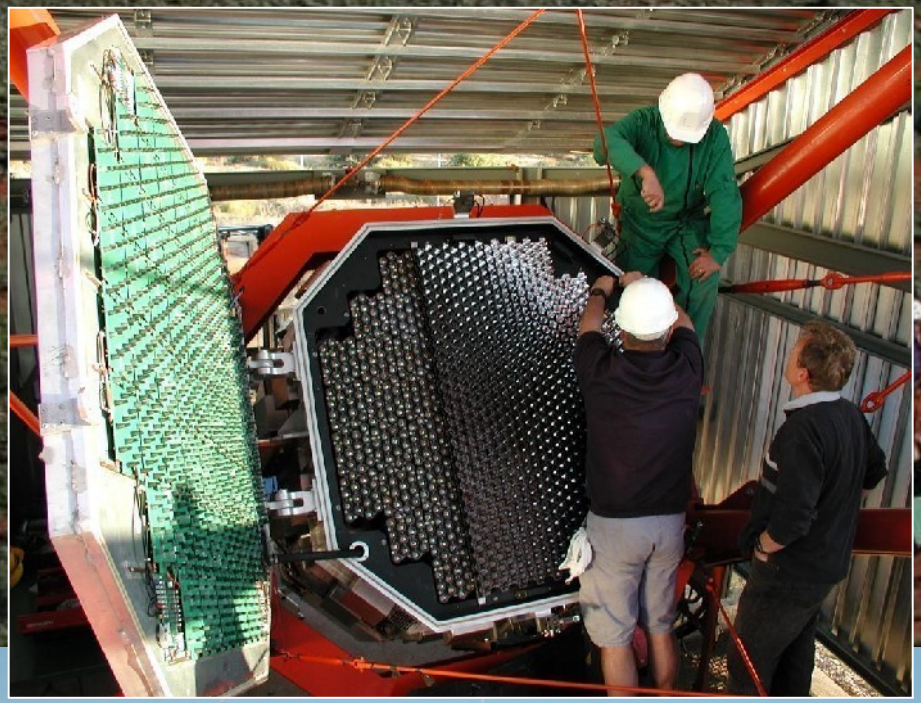
High Energy Stereoscopic System

- Consortium international, mené par Allemagne + France
- Site: 23°16" S, 16°30" E, 1800 m asl, 100 km de Windhoek (Namibie)
  - très bonne qualité optique du ciel
  - hémisphère peu observé, grande partie du plan galactique observable

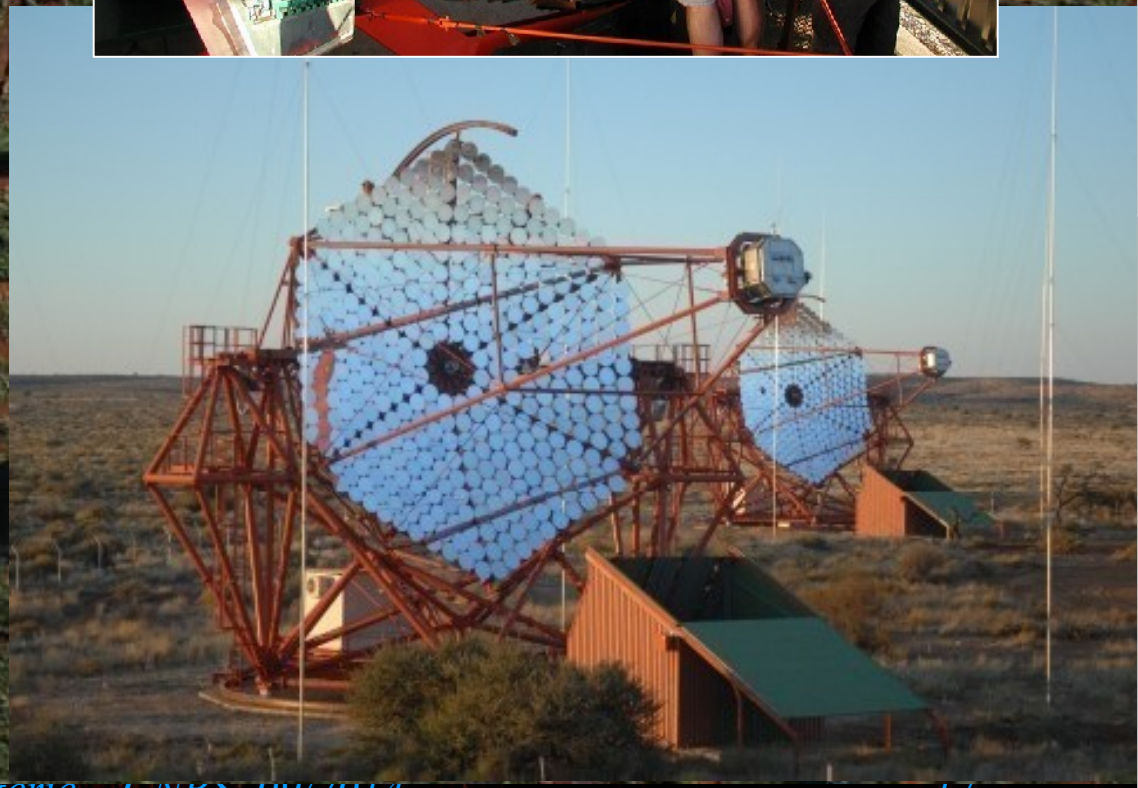


MPI Kernphysik, Heidelberg
Humboldt Univ. Berlin
Ruhr-Univ. Bochum
Univ. Hamburg
Landessternwarte Heidelberg
Ecole Polytechnique, Palaiseau
APC Paris
LPNHE Univ. Paris VI-VII
CEA Saclay
CESR Toulouse
CENGB Bordeaux
LUPM Montpellier
LAOG Grenoble
LAPP Annecy
Observatoire de Paris
Durham Univ.
Dublin Inst. for Adv. Studies
Charles Univ., Prag
Yerewan Physics Inst.
North-West Univ., Potchefstroom
Univ. of Namibia, Windhoek

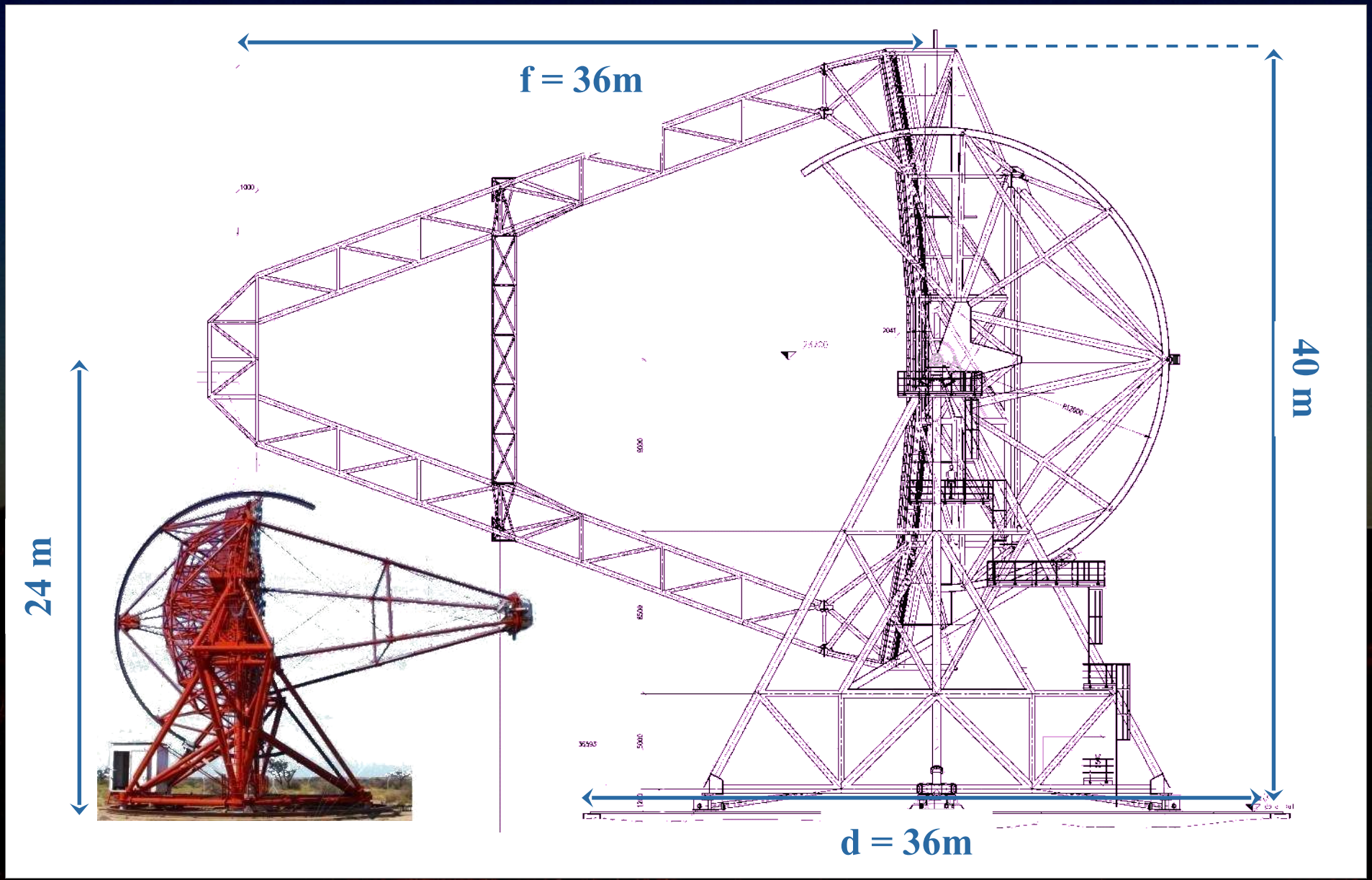
H.E.S.S. I en Namibie



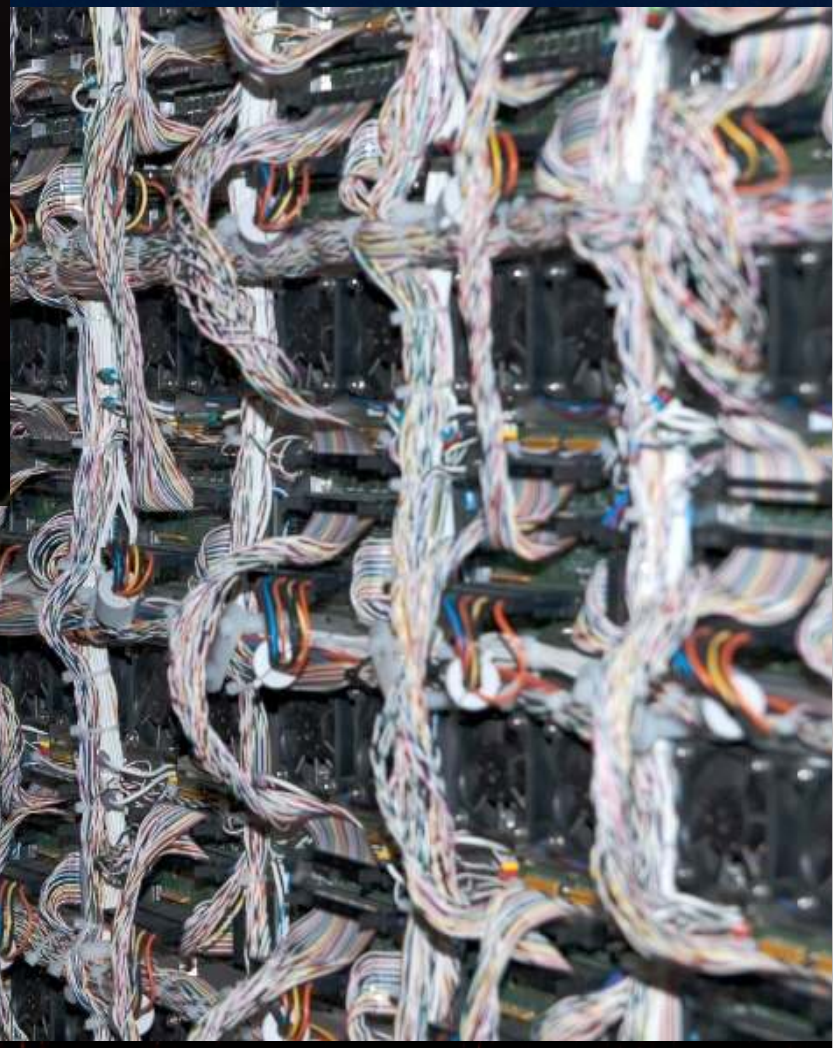
- HESS-I :
- 4 télescopes (en carré de 120 m)
  - Réflecteur de 12 m de diamètre, 15 m de focale
- Des caméras extrêmement rapides:
  - 960 pixels (PMT)
  - Échantillonnage à 1 GS/s
  - ~ 1 tonne
- Système complet depuis le 10/12/2003

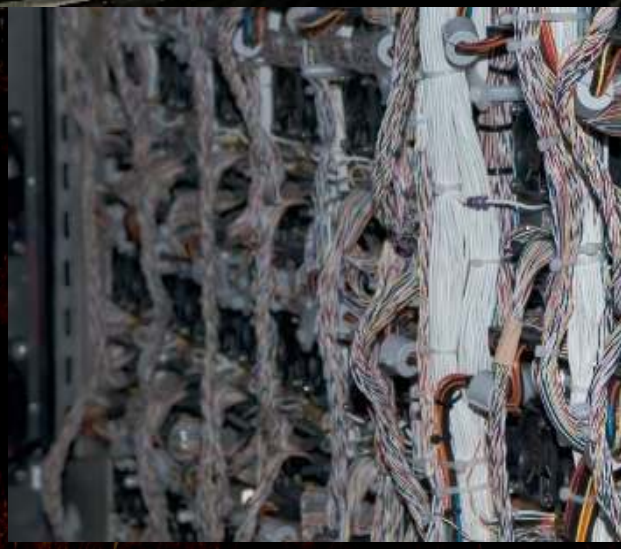


HESS-II : le plus grand télescope Cherenkov jamais construit



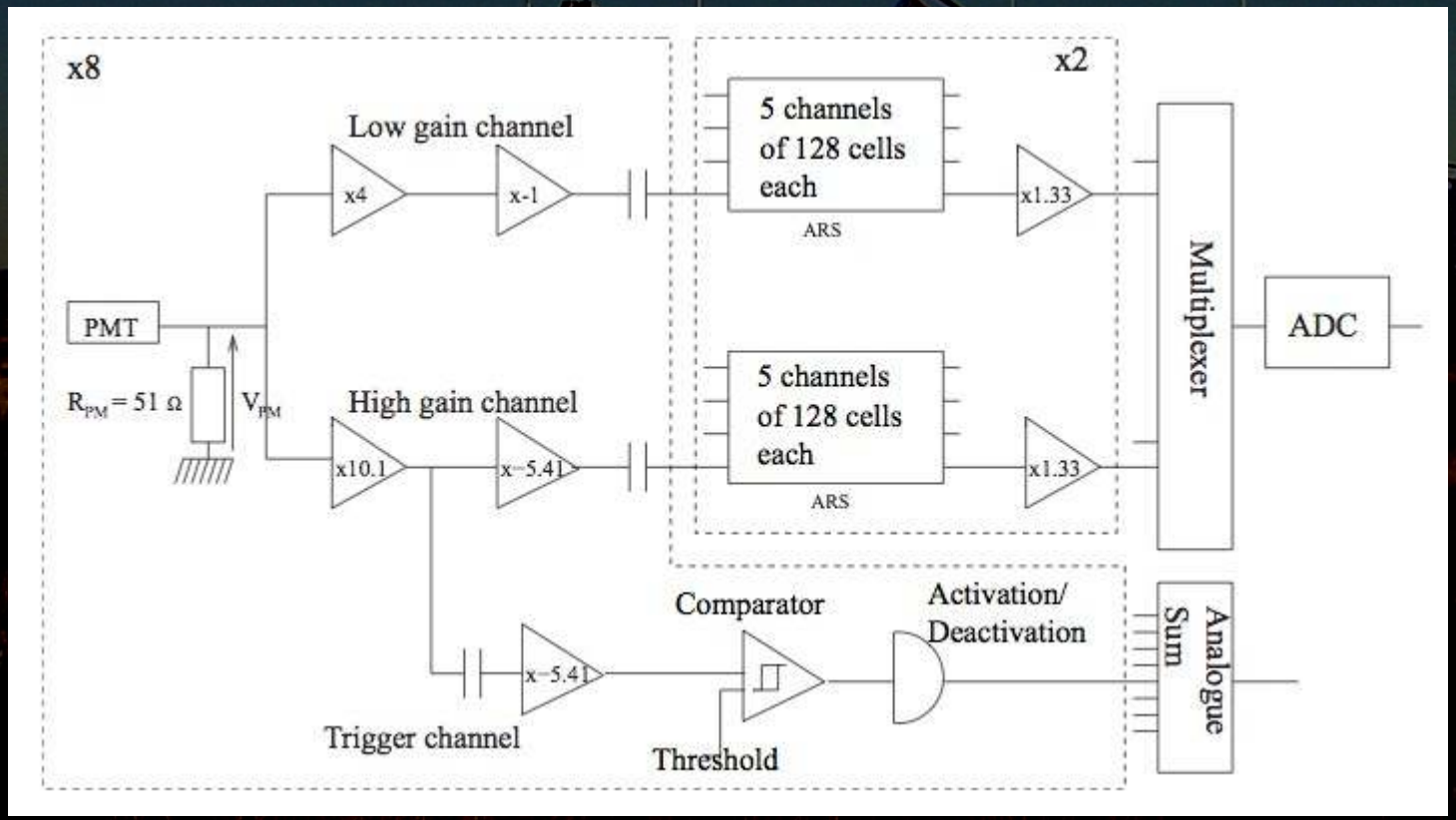
H.E.S.S. II – Le plus grand télescope Cherenkov jamais construit





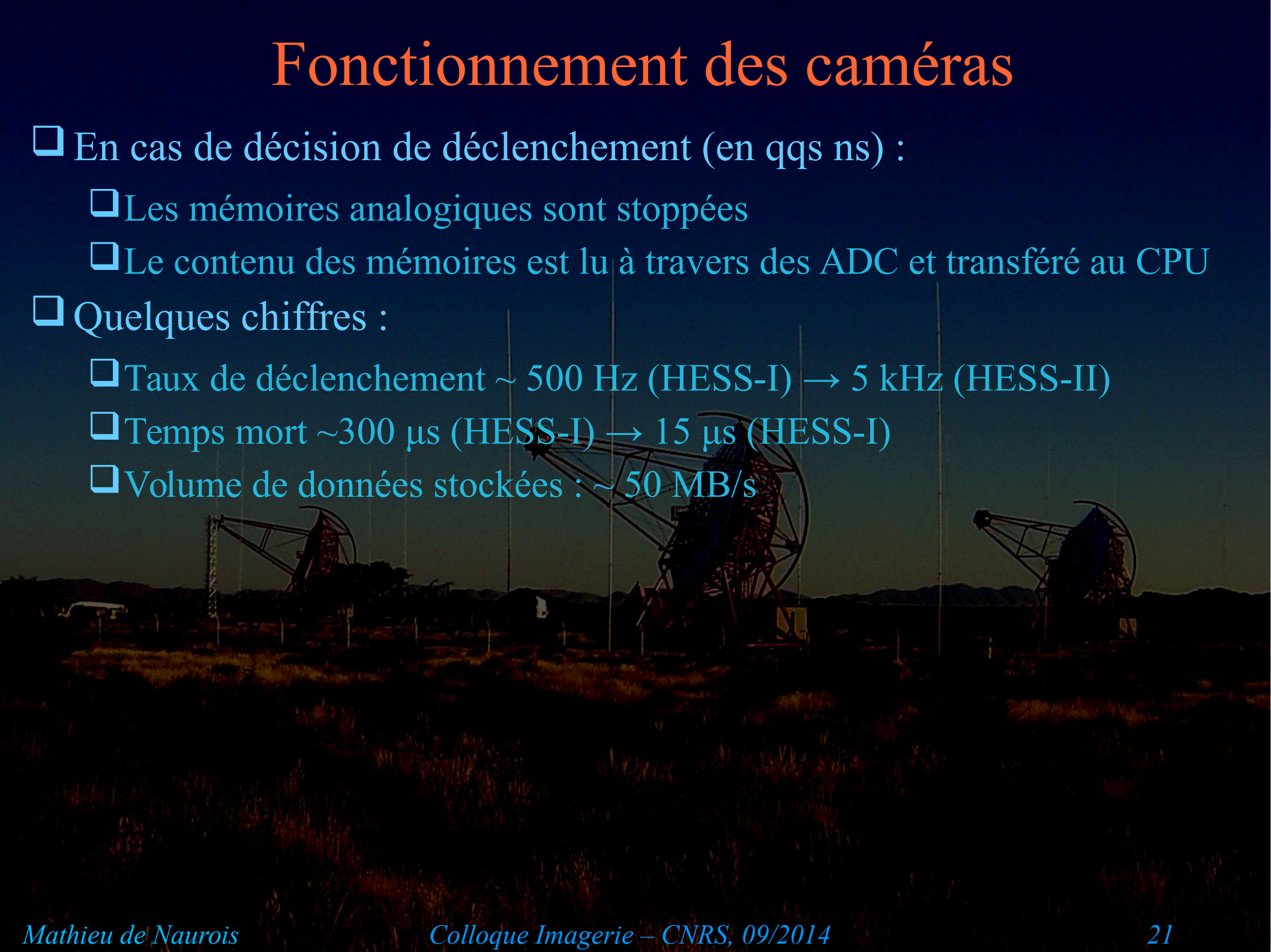
Fonctionnement des caméras

- Signal divisé en trois voies :
  - Échantillonnage en continu, deux gains, à 1Gs/s, dans des mémoires analogiques organisées en buffer circulaire (de 128/256 cellules)
  - Système de déclenchement temps réel, basé sur le franchissement simultané d'un seuil (4 p.e.) par un certain nombre de pixels voisins (+ coïncidence temporelle entre télescopes)

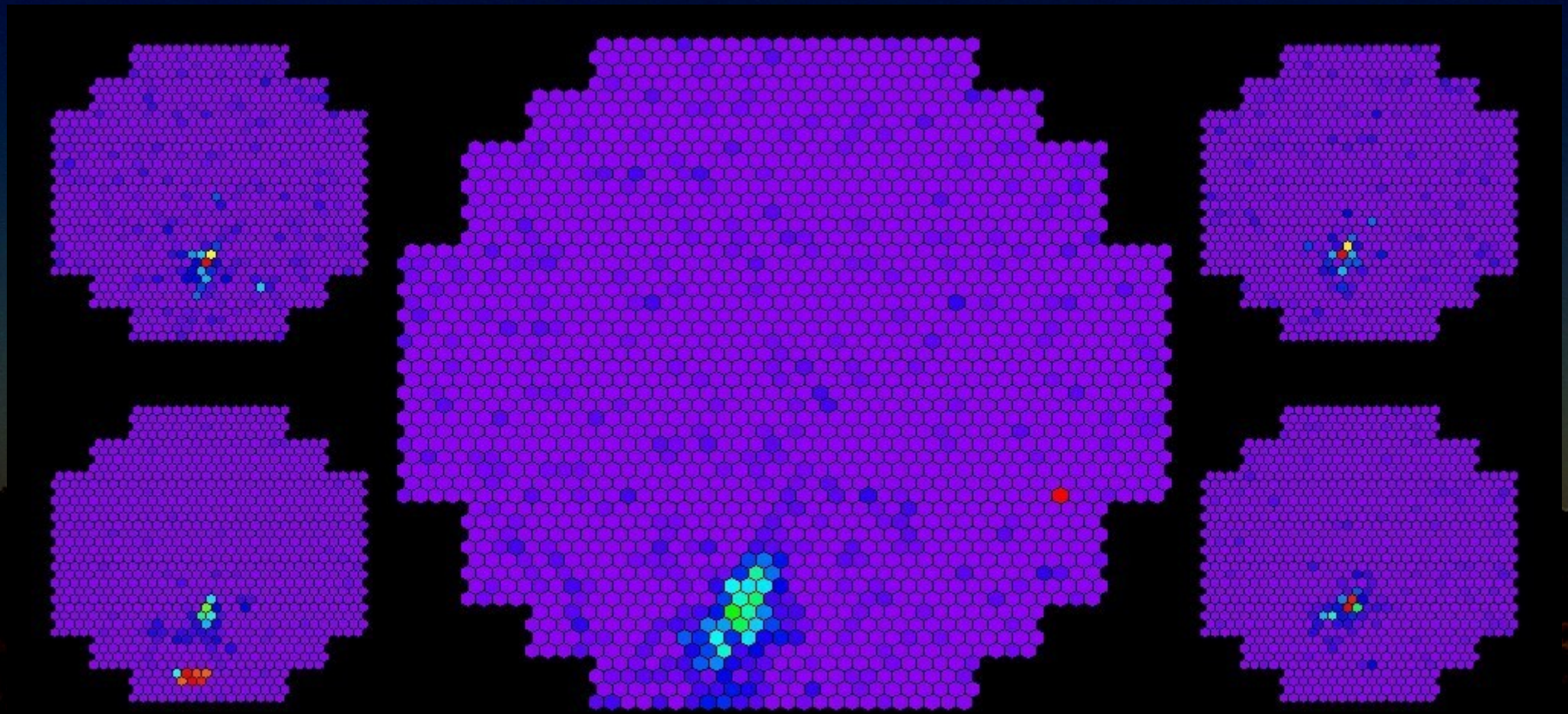


Fonctionnement des caméras

- En cas de décision de déclenchement (en qqs ns) :
  - Les mémoires analogiques sont stoppées
  - Le contenu des mémoires est lu à travers des ADC et transféré au CPU
- Quelques chiffres :
  - Taux de déclenchement ~ 500 Hz (HESS-I) → 5 kHz (HESS-II)
  - Temps mort ~300 μs (HESS-I) → 15 μs (HESS-I)
  - Volume de données stockées : ~ 50 MB/s

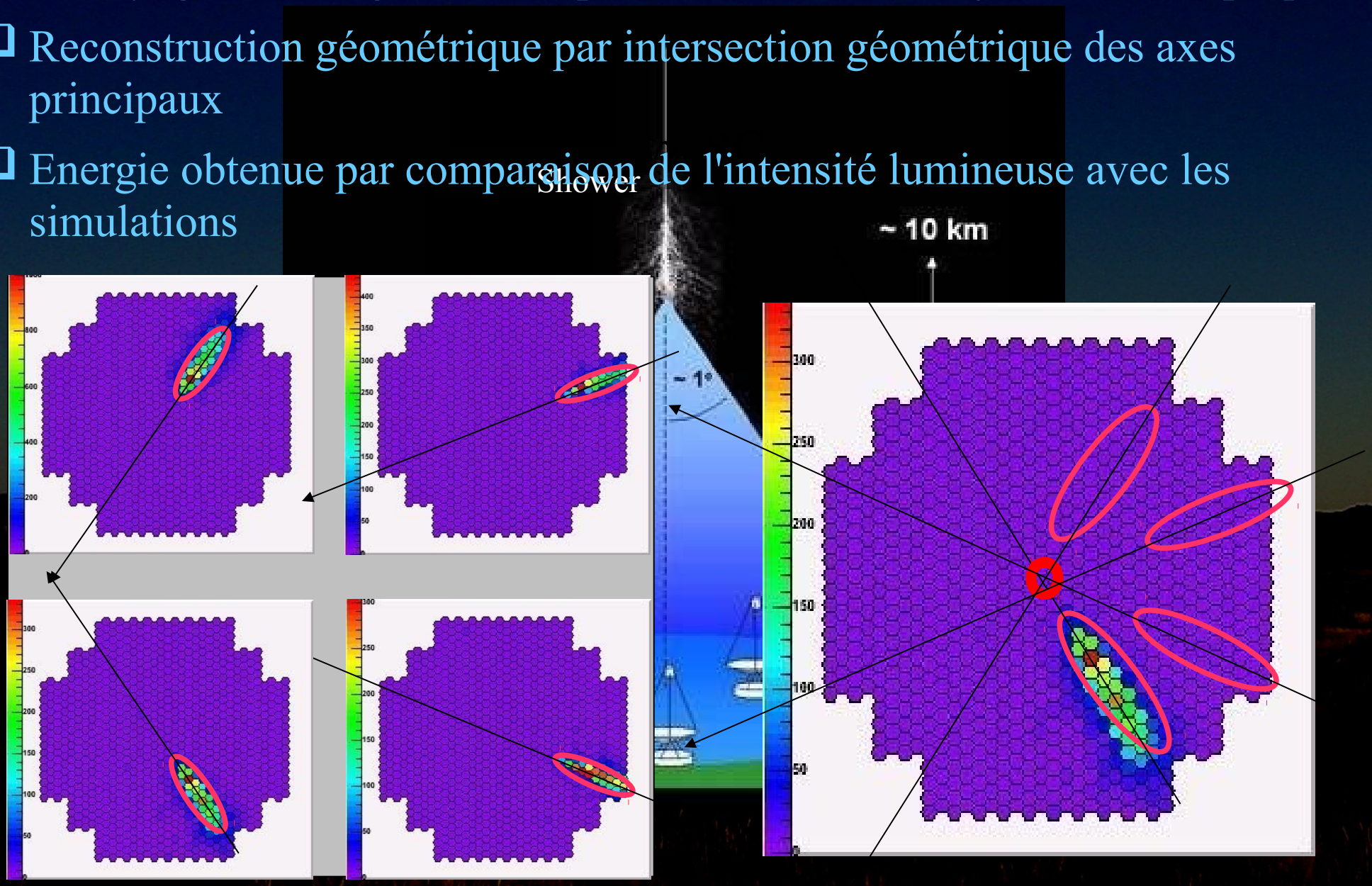


Les premiers événements



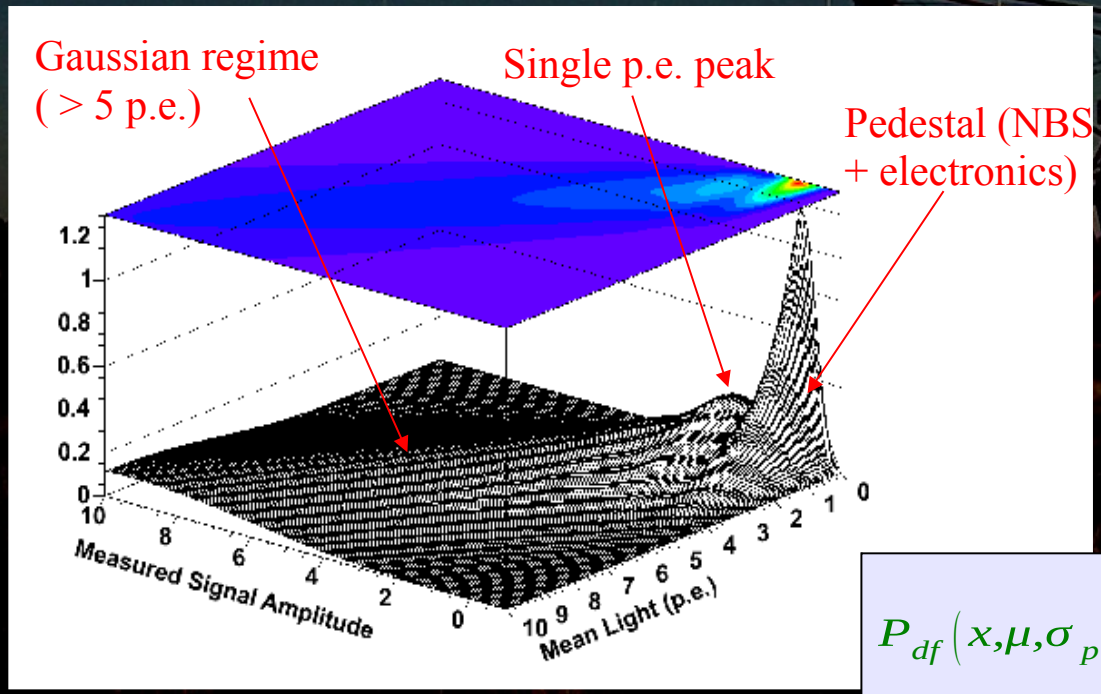
Reconstruction

- Nettoyage des images (technique à double seuil) + ajustement elliptique
- Reconstruction géométrique par intersection géométrique des axes principaux
- Energie obtenue par comparaison de l'intensité lumineuse avec les simulations



Techniques plus sophistiquées

- Modèle prédictif d'image de gerbe (basé sur les simulations Monte Carlo)
- Comparaison des images brute avec le modèle prenant en compte :
  - La distribution poissonnienne du nombre de photoélectrons
  - Les fluctuations (~ 40%) de réponse des photomultiplicateurs
  - Les bruits de fond (électronique, ciel, ...)



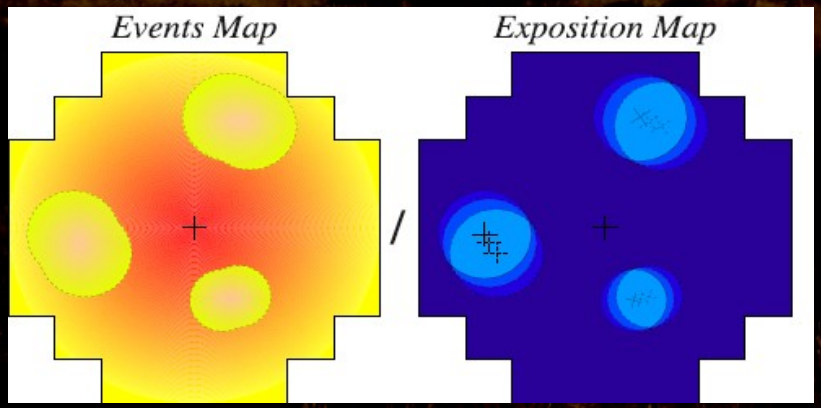
$$P_{df}(x,\mu,\sigma_p)=\sum_n \frac{\mu^n e^{-\mu}}{n!\sqrt{2\pi\left(\sigma_p^2+n^2\,\sigma_\gamma^2\right)}}\exp\left(\frac{-(x-n)^2}{2\left(\sigma_p^2+n^2\,\sigma_\gamma^2\right)}\right)$$

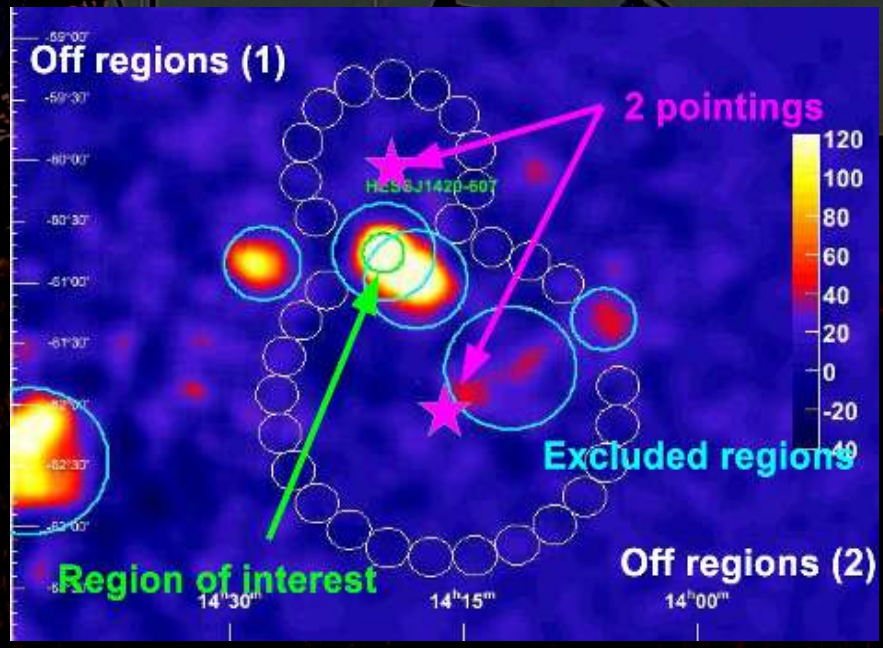
$\sigma_p = Pedestal\ width\ (NSB + electronic\ noise)$

$\sigma_\gamma = PMT\ resolution$

Soustraction de fond

- Le flux de rayons cosmique est très largement dominé par les cosmiques chargés (isotropes) : électrons, protons et noyaux
- Mise en évidence d'un signal par comparaison d'un nombre d'événements dans une région avec un modèle de réponse de l'instrument, calibré sur les données réelle (en excluant les régions sources)
- Techniques de re-projection multiples, mosaïques de centaines d'heures d'observation
- Fond modélisé à ~ 1 % de précision



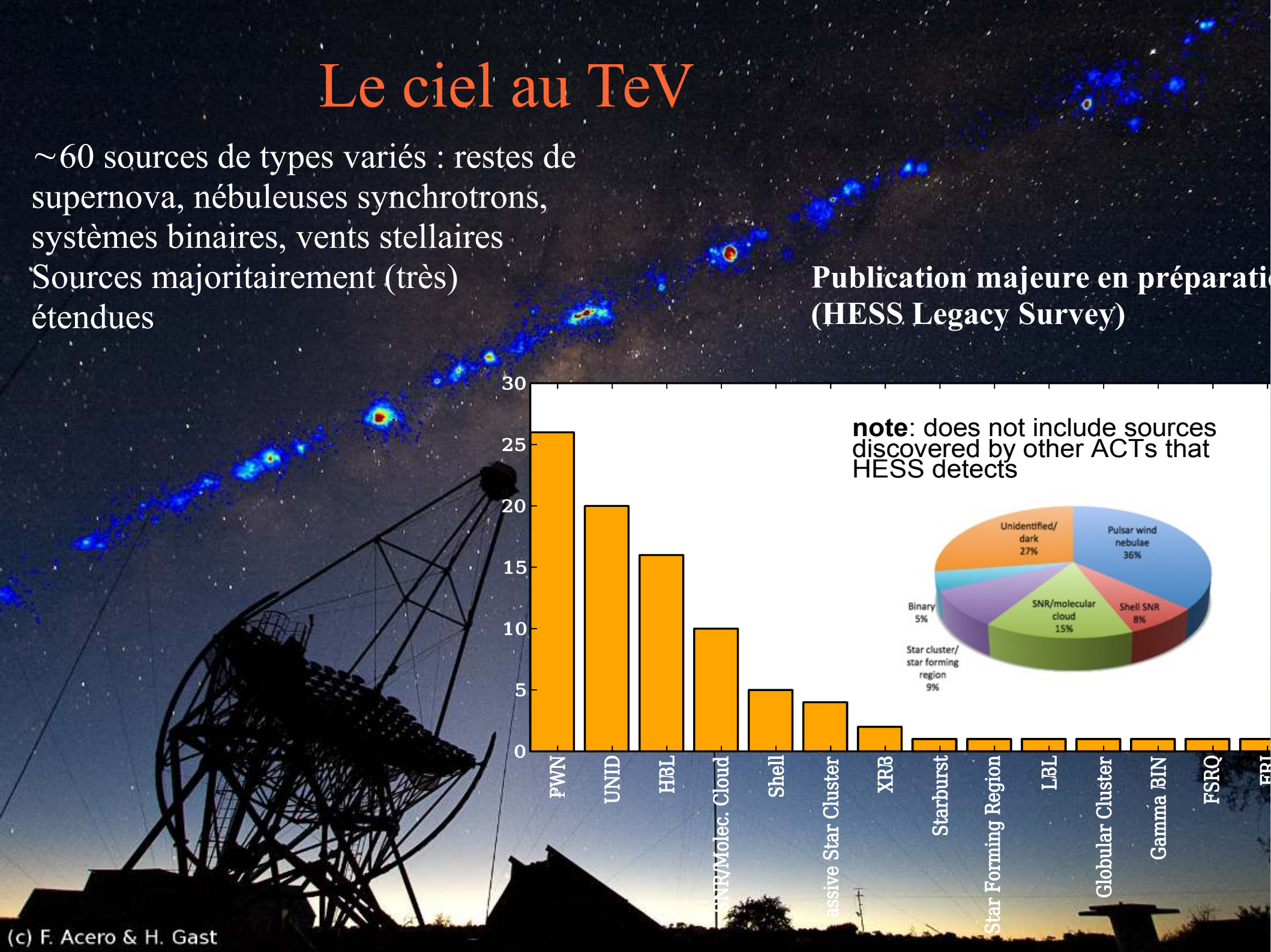


Résultats

Le ciel au TeV

~60 sources de types variés : restes de supernova, nébuleuses synchrotrons, systèmes binaires, vents stellaires
Sources majoritairement (très) étendues

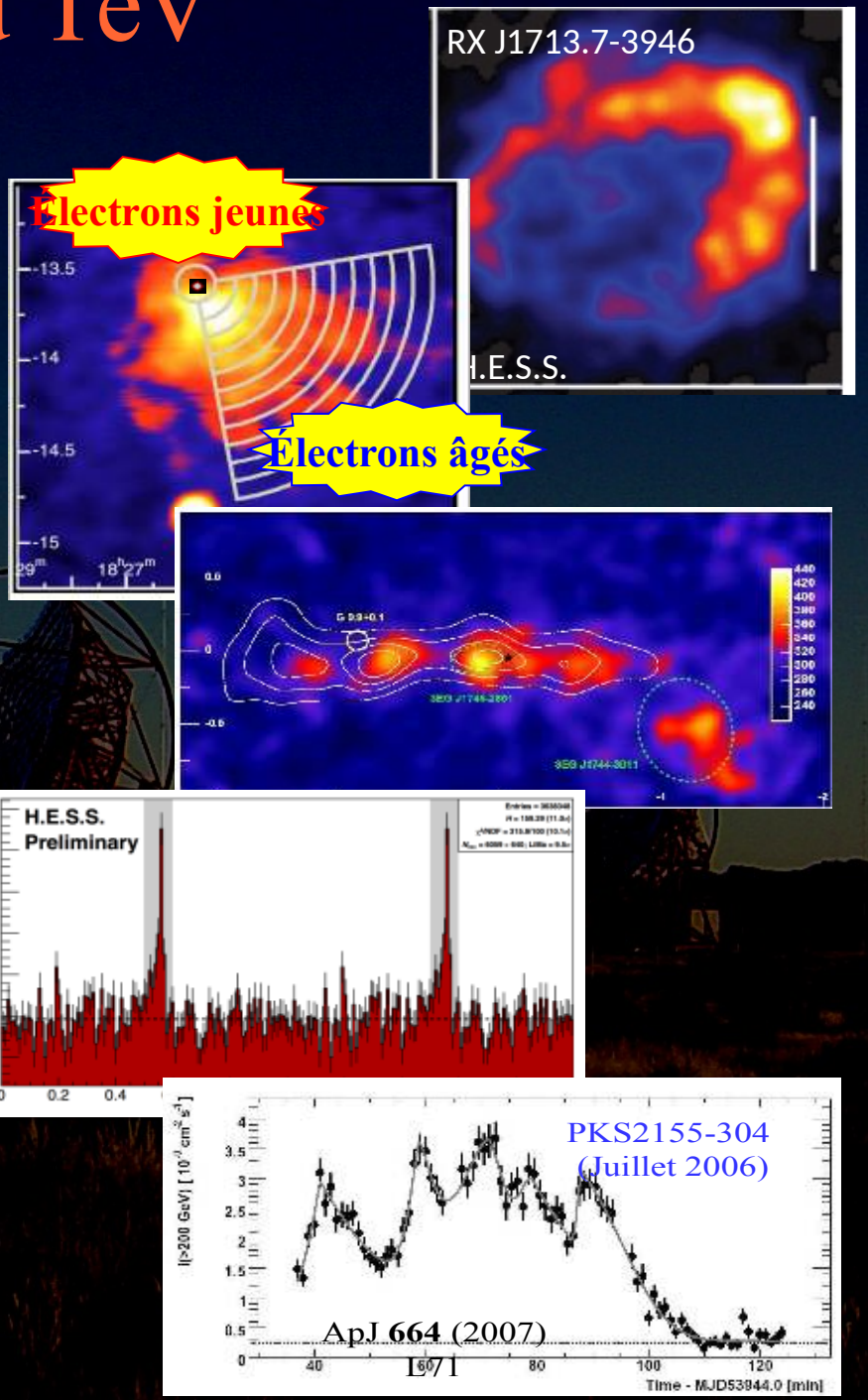
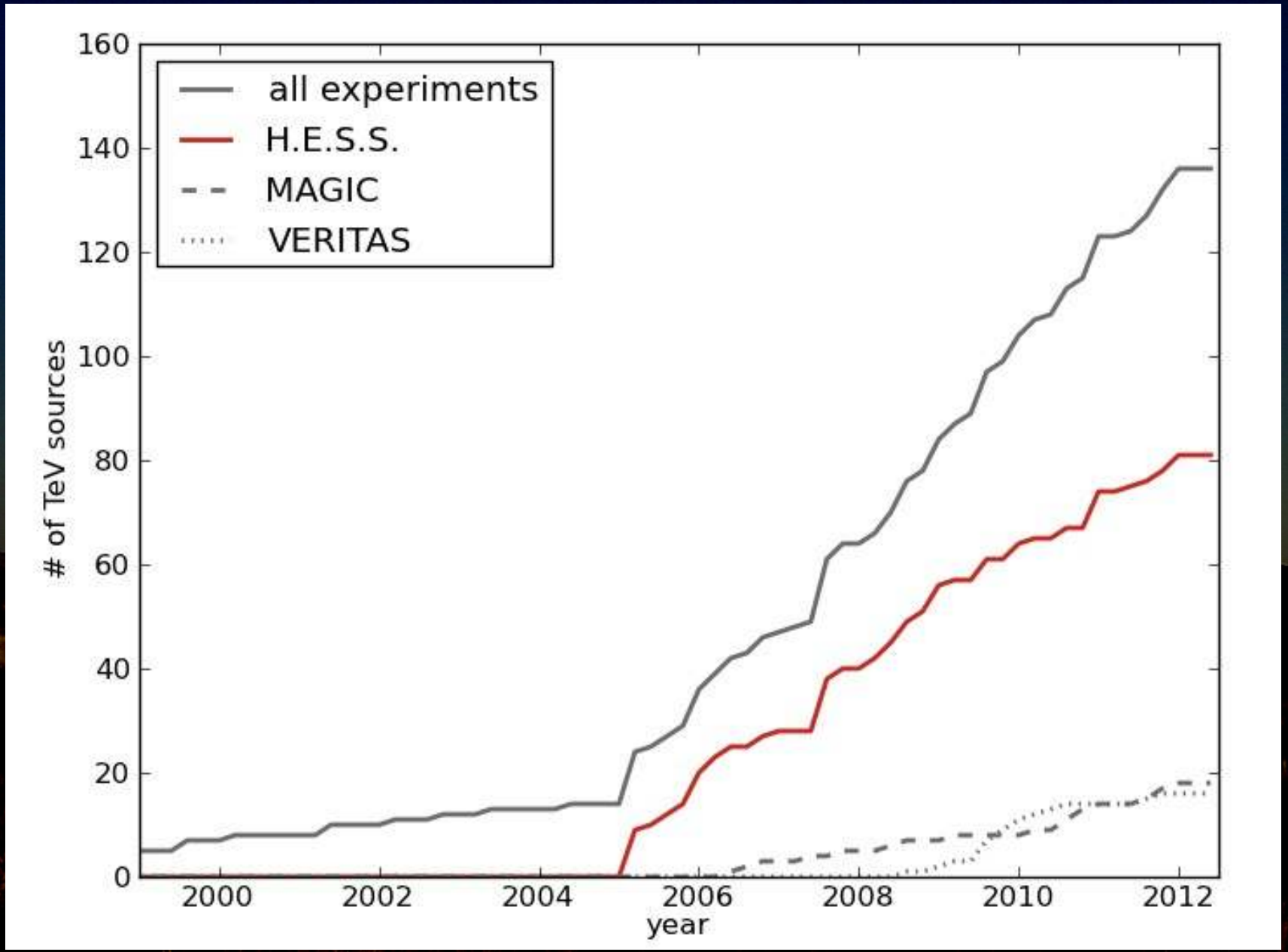
Publication majeure en préparati
(HESS Legacy Survey)



(c) F. Acero & H. Gast

Le Ciel au TeV

- Une zoologie très riche :
  - Restes de supernovae (résidus d'explosion d'étoiles massives
  - Nébuleuses à vent de pulsar
  - Systèmes binaires en interaction
  - Pulsars jeunes
  - Emission diffuse galactique (tomographie)
  - Noyaux actifs de Galaxie
  - Radio Galaxies
  - Galaxies à flambée d'étoiles
- Une astronomie nouvelle, intimement connectée à la physique fondamentale (matière noire, cosmologie, invariance de Lorentz, ...)
- 15 ordres de grandeur en énergie au delà du visible ! Et un ciel très variable.



Une belle success-story