

Partie II

Résultats expérimentaux et implications Spectre et composition

A) Le spectre en énergie

- 1) Etat des lieux
- 2) Reconstruction en énergie avec Auger
- 3) la cheville
- 4) la coupure GZK

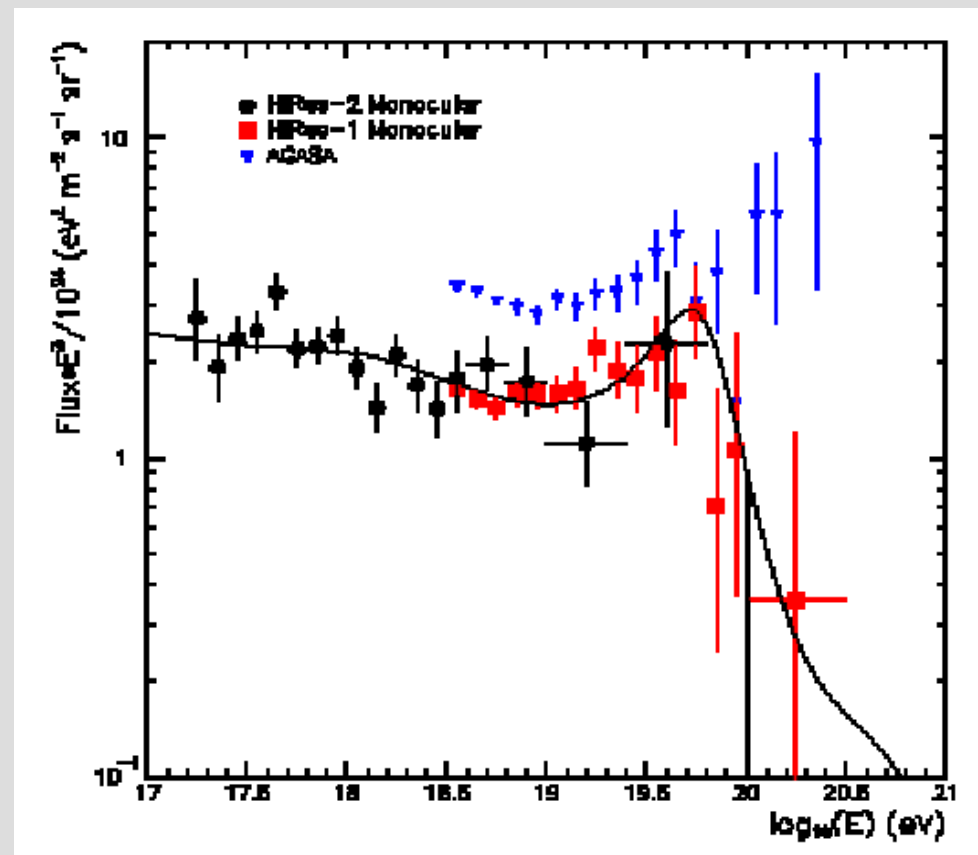
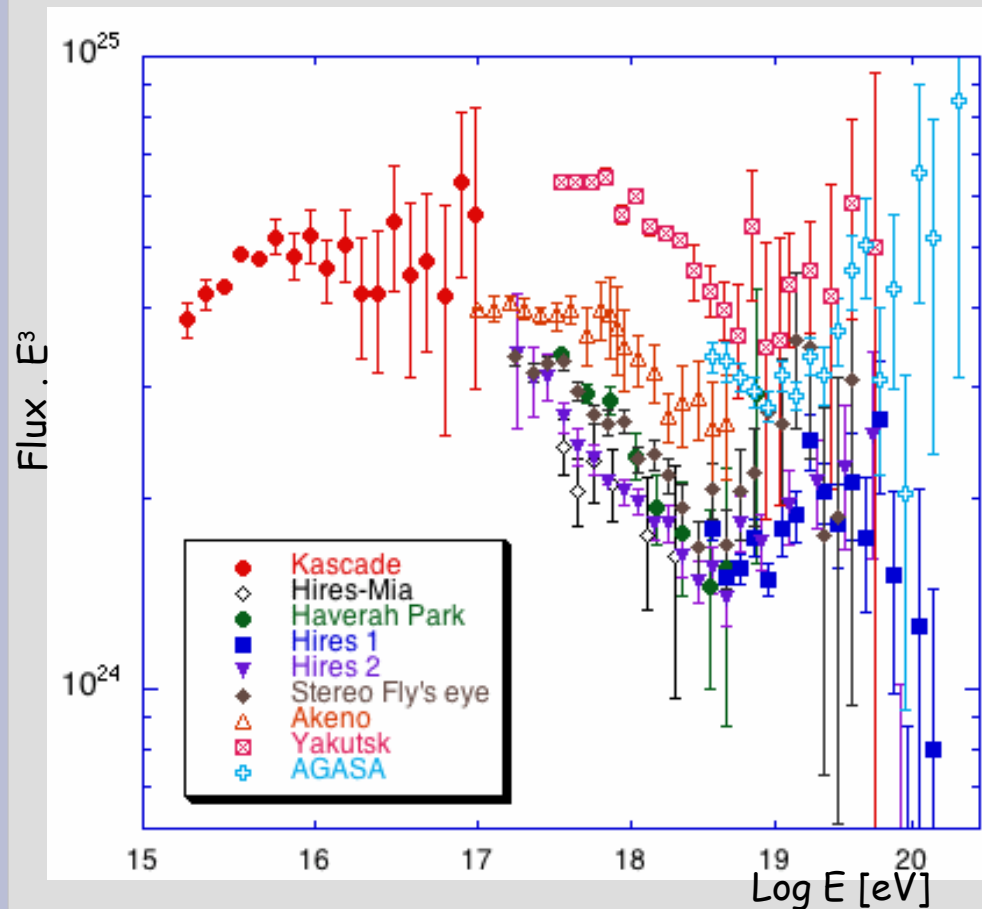
B) La composition

- 1) limite en photons
- 2) mesure de composition
- 3) les modèles hadroniques

Spectre aux énergies extrêmes

Observations

Situation expérimentale confuse $E > 1 \text{ EeV}$



Principe de l'analyse des données Auger : détection hybride des RCUEs

FD

- mesure quasi calorimétrique de l'énergie (+)
- erreurs systématiques sur l'énergie mesurée $\sim 25\%$ (-)
- cycle utile de détection $\sim 10\%$ (-)
- calcul subtil de l'acceptance (-)

SD

- E dépend des simulations (-)
- cycle utile de détection $\sim 100\%$ (+)
- calcul simple de l'acceptance géométrique $E > E_{\text{sat}}$ (+)

Calibrer le SD avec le FD à l'aide des événements hybrides



Échelle en énergie du FD
Statistique du SD

Reconstruction de l'énergie

- Détermination du signal à 1000 m de l'axe de la gerbe : S1000

S1000 :

- lieu où les fluctuations gerbe à gerbe sont les plus faibles)
- Dépend de l'angle zénithal et de l'énergie

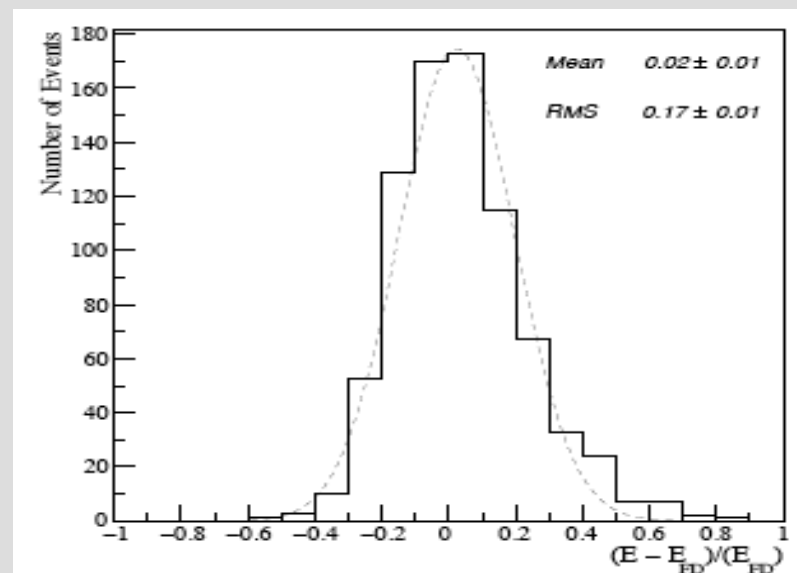
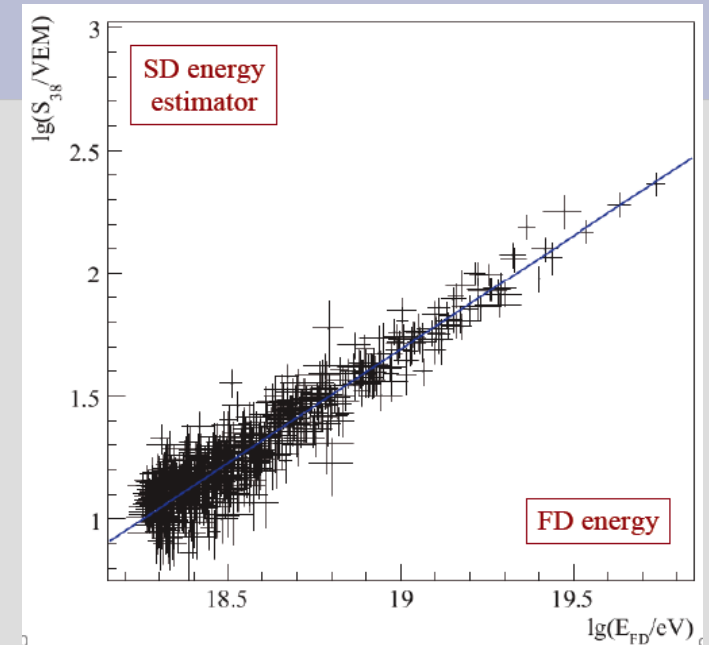
- Conversion en S38 :

S38 : signal qui aurait été mesuré à un angle zénithal de 38°

$$S38 = S1000 / (1 + ax + bx^2)$$

- Conversion en énergie équivalent FD:

grâce à un étalonnage fait à partir des événements hybrides

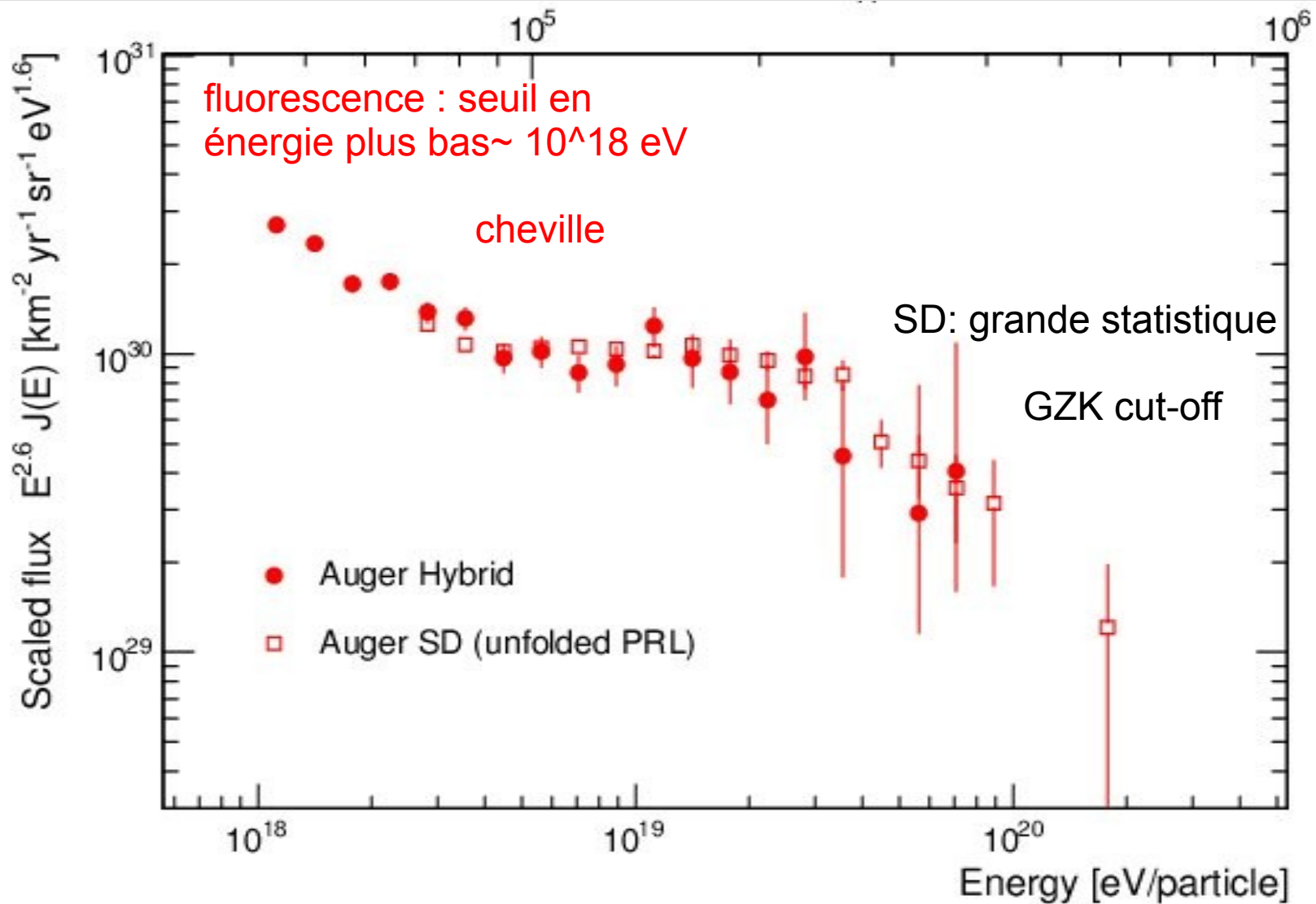


Incertitudes systématiques sur l'énergie

Source	Systematic uncertainty
Fluorescence yield	14%
P,T and humidity effects on yield	7%
Calibration	9.5%
Atmosphere	4%
Reconstruction	10%
Invisible energy	4%
TOTAL	22%

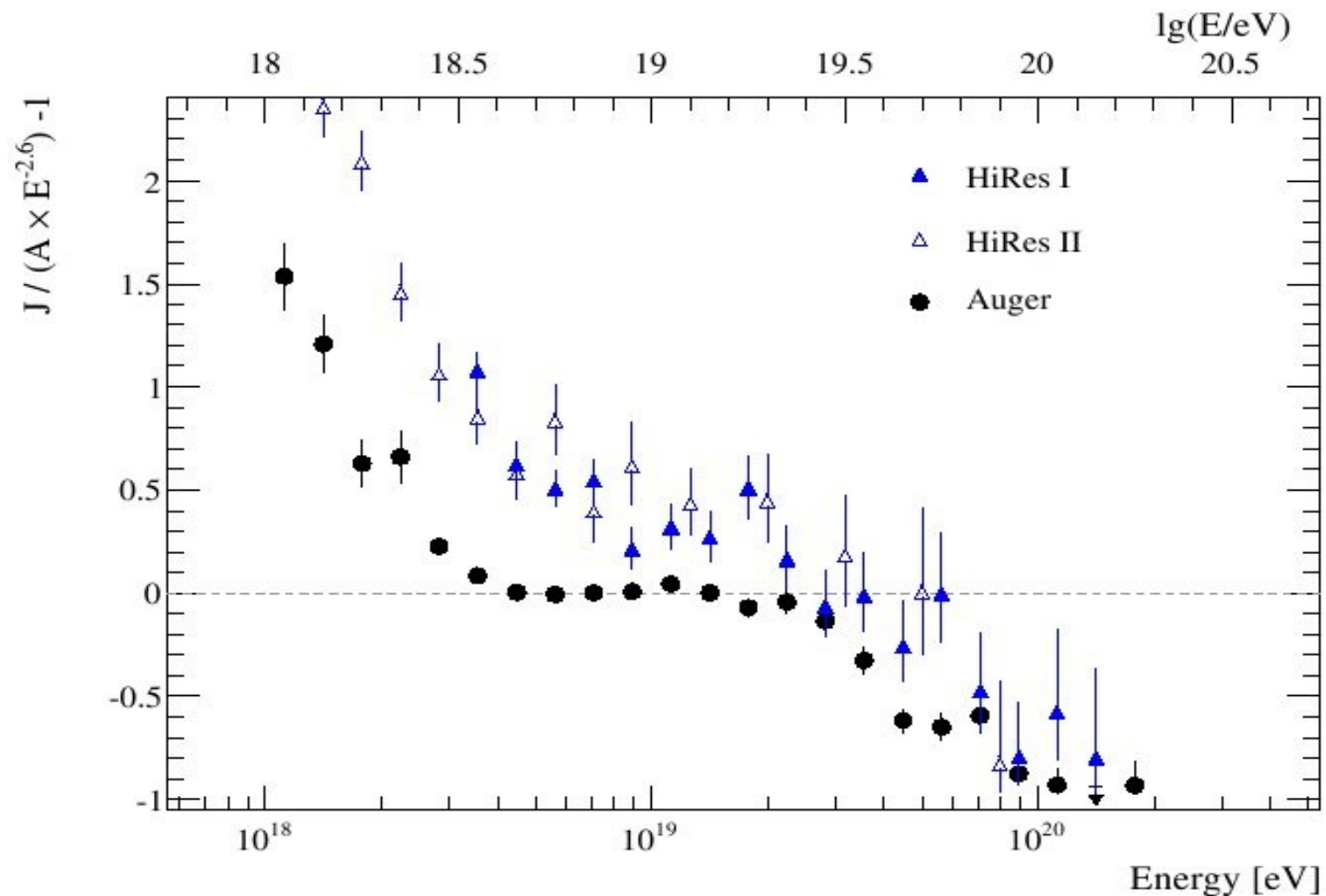
Comparaison Spectre hybride et SD

Echelle d'énergie unique calibrée par le détecteur de fluorescence



Spectre combiné

Incertitudes systématiques sur l'échelle d'énergie : $\sim 22\%$ pour les deux expériences
→ Deux spectres compatibles avec un scale de 20% en énergie



Utilisation des données à grand angle zénithal

Gerbes inclinées :
symétrie cylindrique perdue

Carte de muons: paramétrisent le nombre de muon attendu dans le plan perpendiculaire à l'axe de la gerbe, en fonction de l'angle zénithal et azimutal.

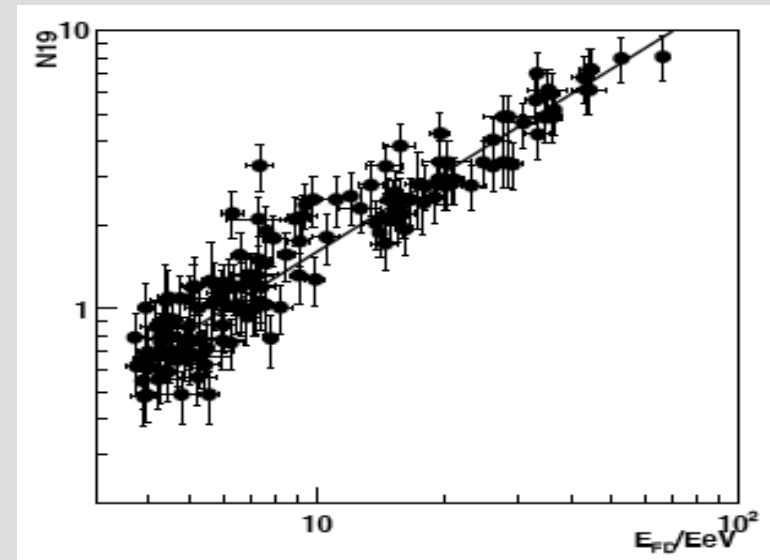
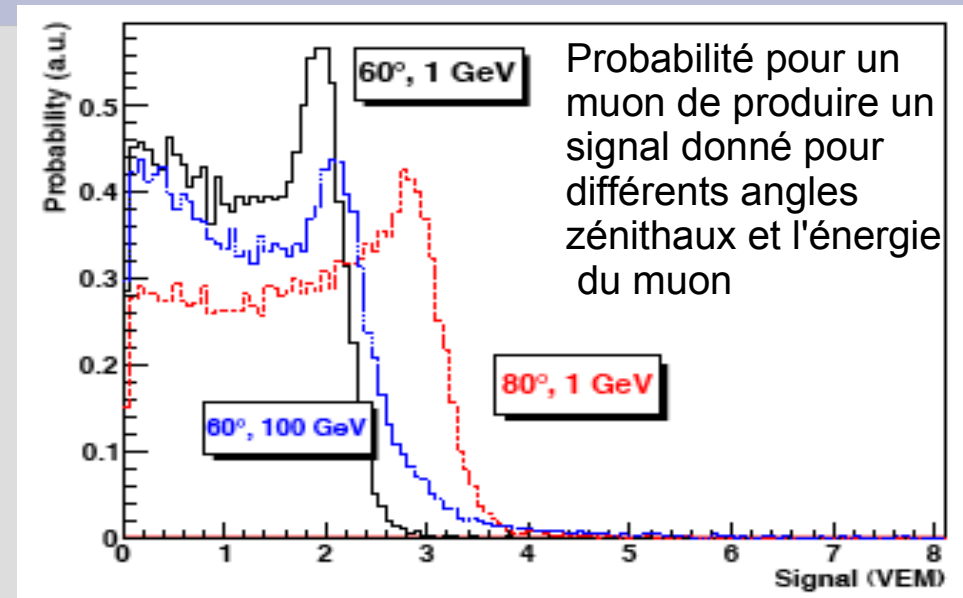
+

réponse du détecteur (GEANT4)

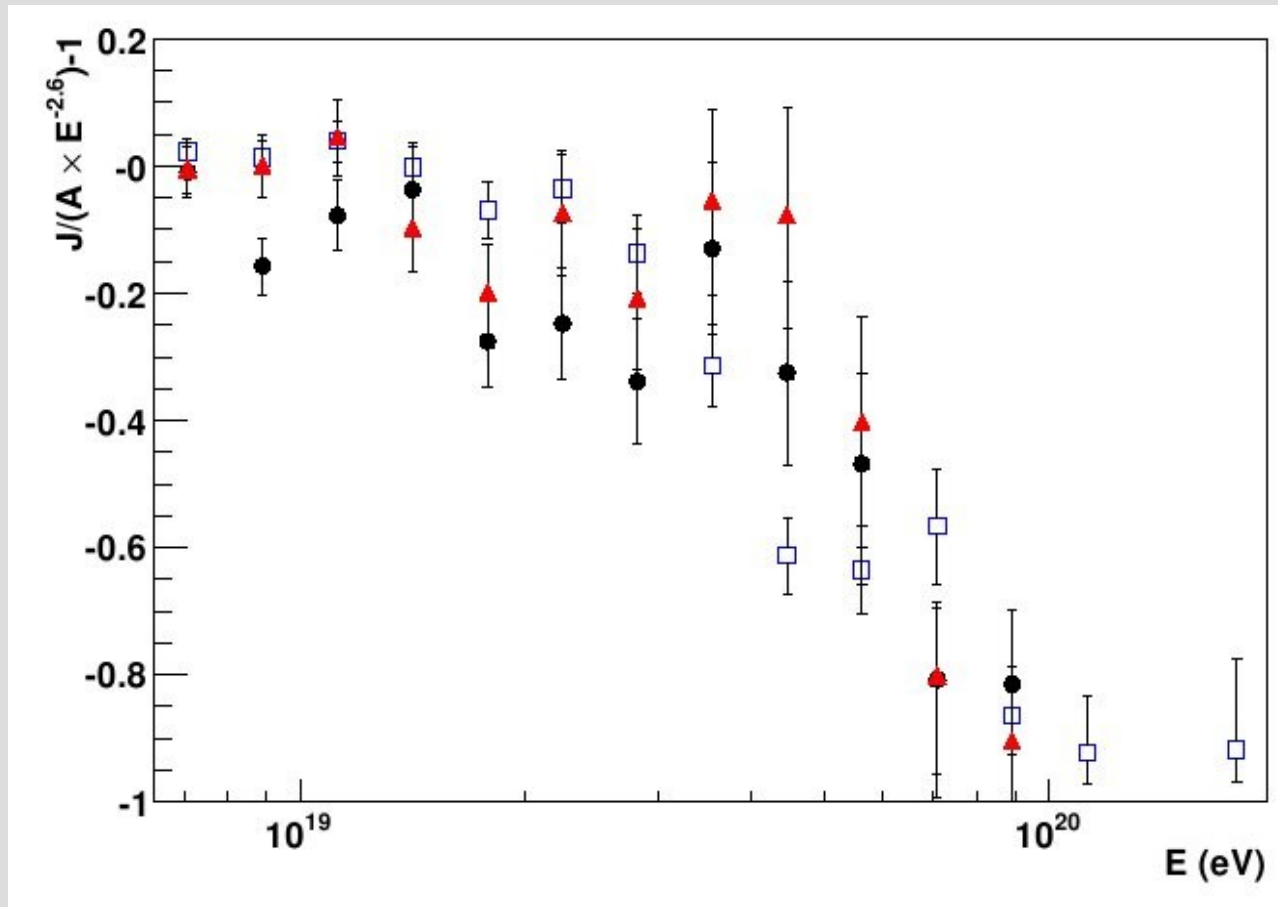
maximisation d'un Likelihood
estimation

- paramètre d'impact de la gerbe
- taille de la gerbe \sim nb total de muon dans la gerbe (N19)

MC \rightarrow Energie / N19



Utilisation des données à grand angle zénithal



$\theta > 60^\circ$: spectra at large angle compatible

Résultats importants sur le spectre

- cut-off à haute énergie
→ Confirmation du résultat d'Hires

Questions :

GZK ou cut-off intrinsèque des sources ?

Ou les deux ?

Protons ou compo mixte ?

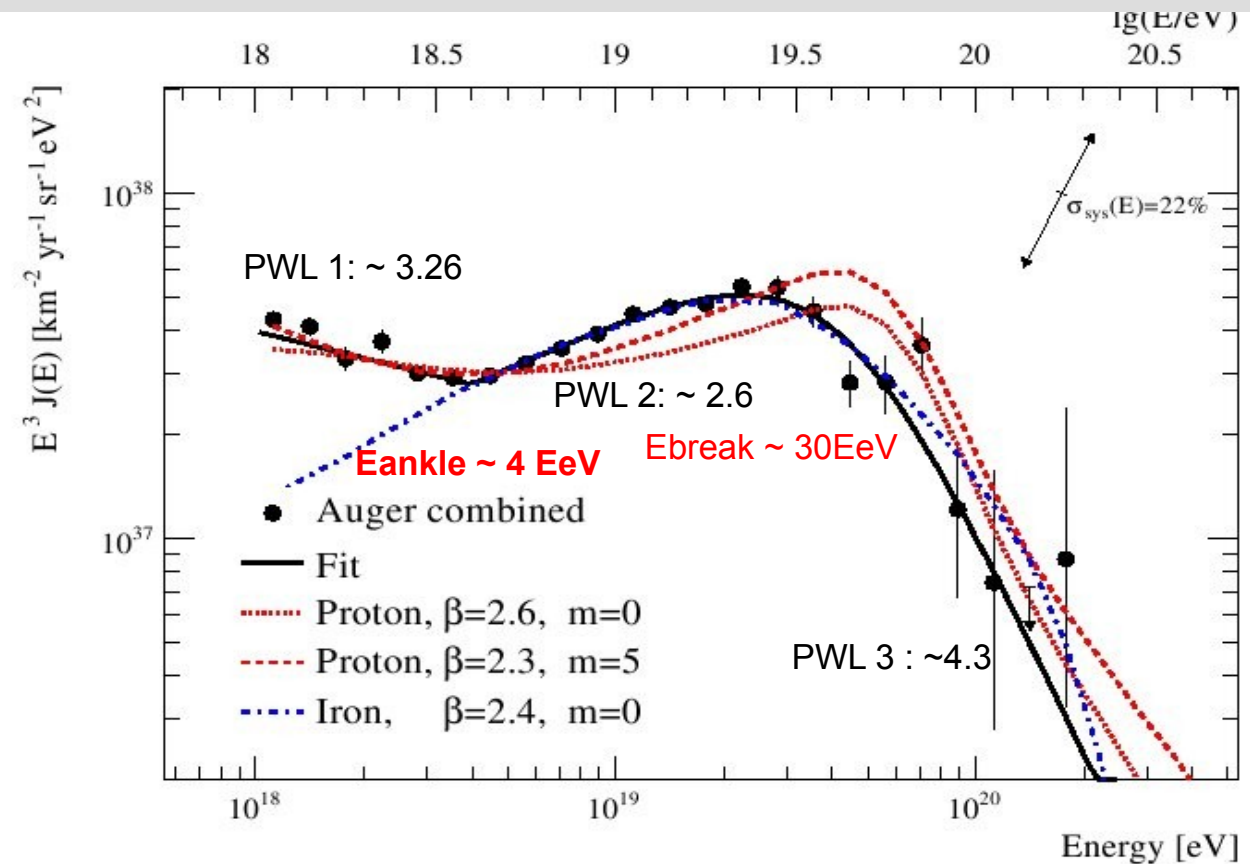
- Observation et mesure de la cassure à la cheville

Questions :

Transition Galactique /extragalactique ?

Effet de la creation de paires ?

Protons ou noyaux ?



La cheville

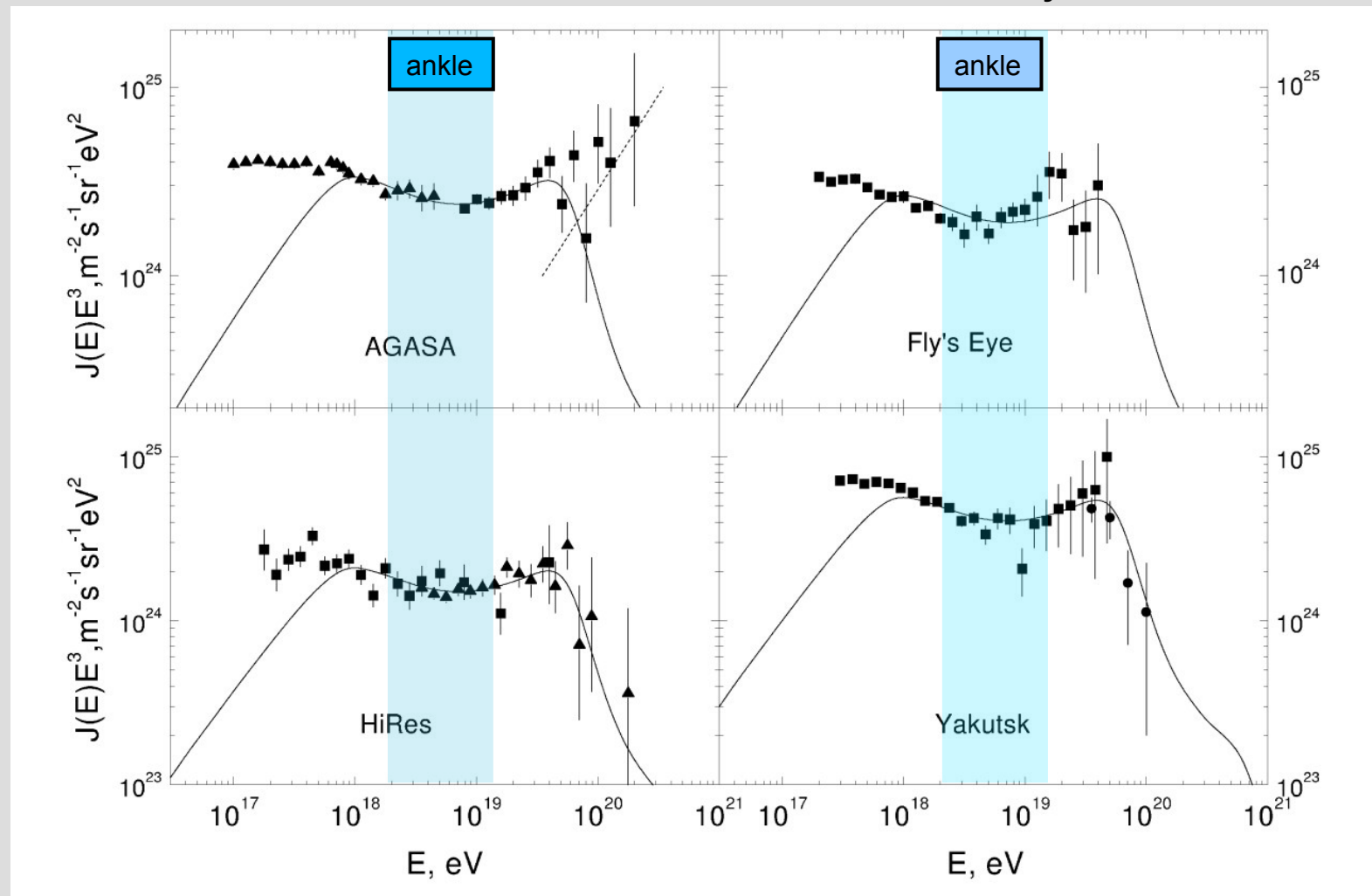
reproduite par interaction des protons avec le CMB

Berezinsky et al. 02

« dip » due to pair production on CMB

Assumes existence of a cut-off below 10^{18} eV

GZK cut-off



Spectre pour une distribution cosmologique des sources (distribution continue)

Transition galactique/extragalactique

KASCADE :

transition « léger » - « lourd » de 10^{15} à 10^{17} eV → fin de la composante galactique
« légère »

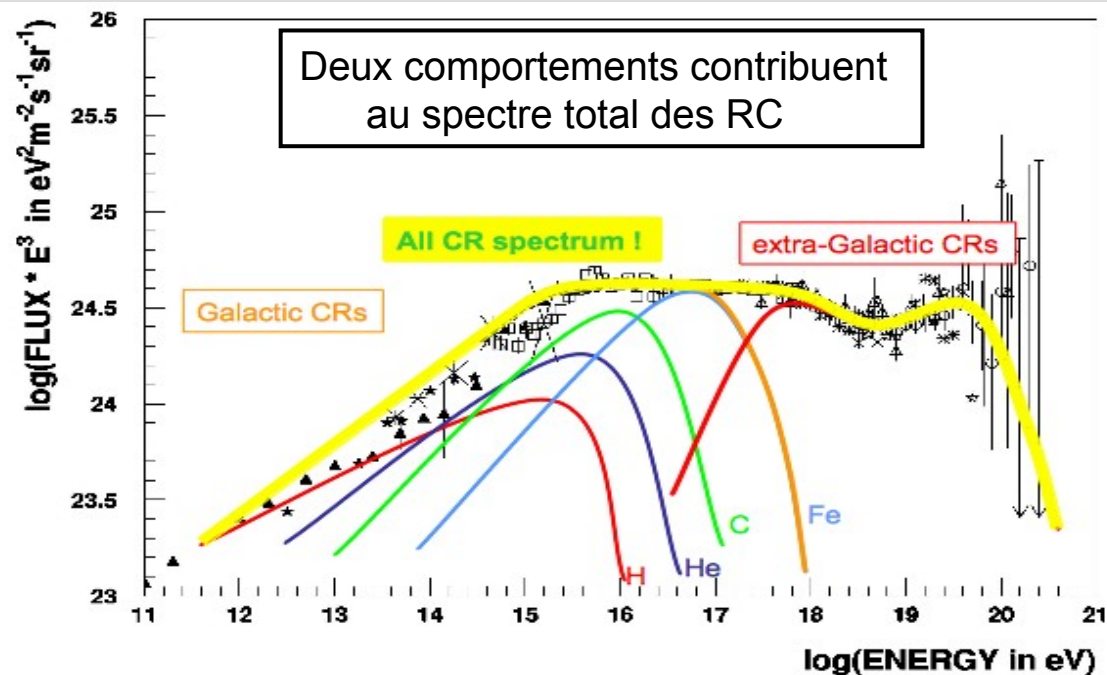
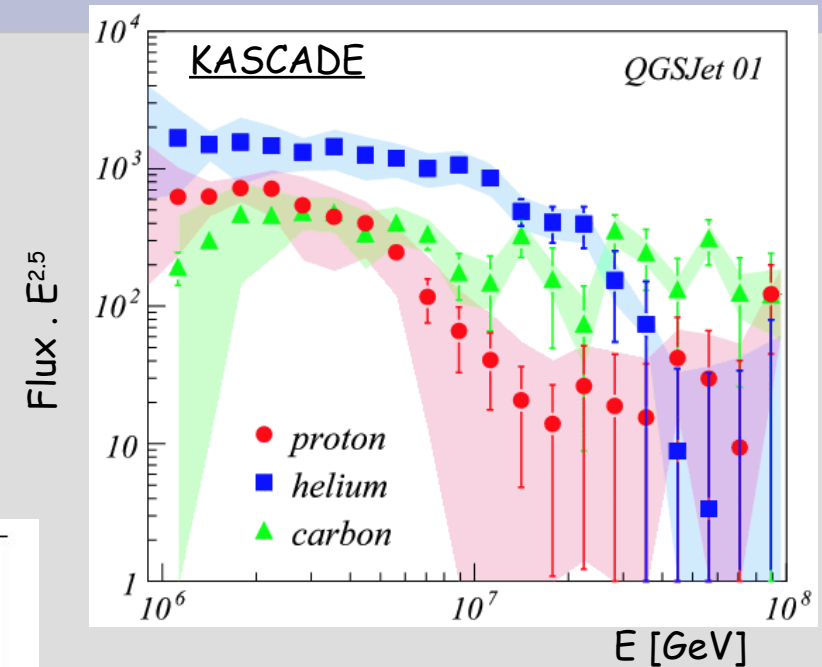


Schéma possible :

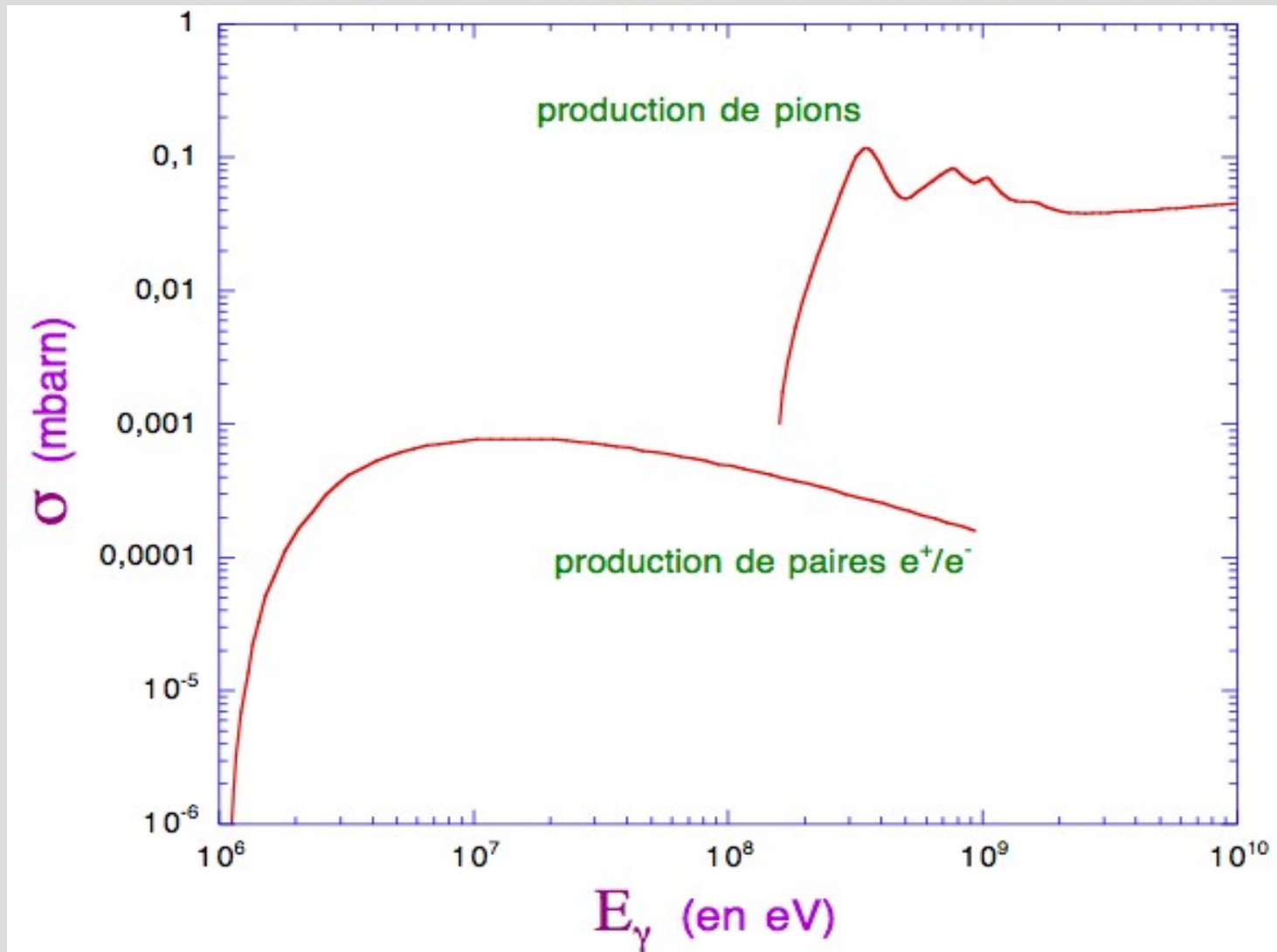
galactique :

$E < 10^{17.6}$ eV (2nd genou)

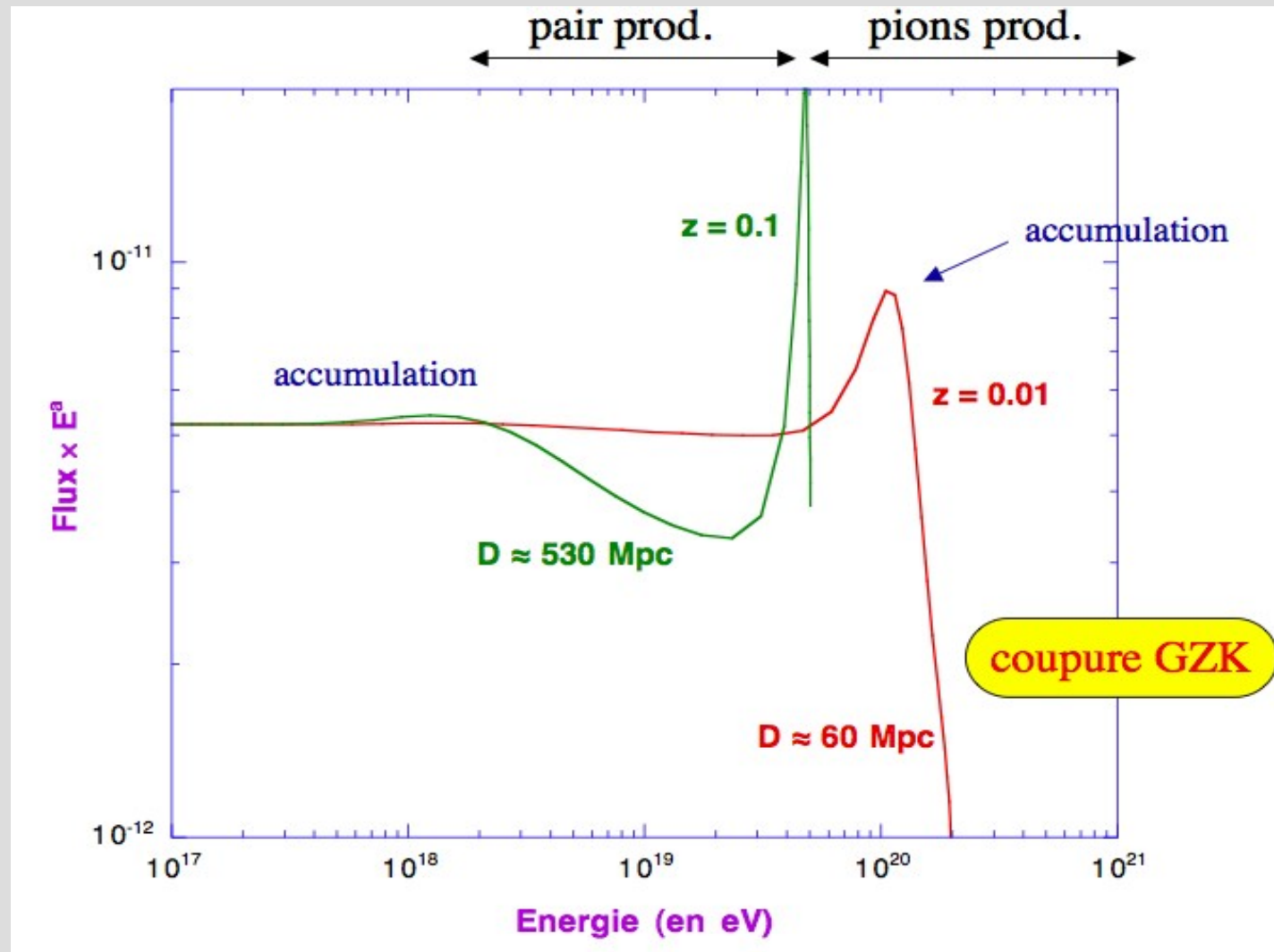
extragalactique :

$E > 10^{18.5}$ eV (cheville)

Production de pions / création de paires

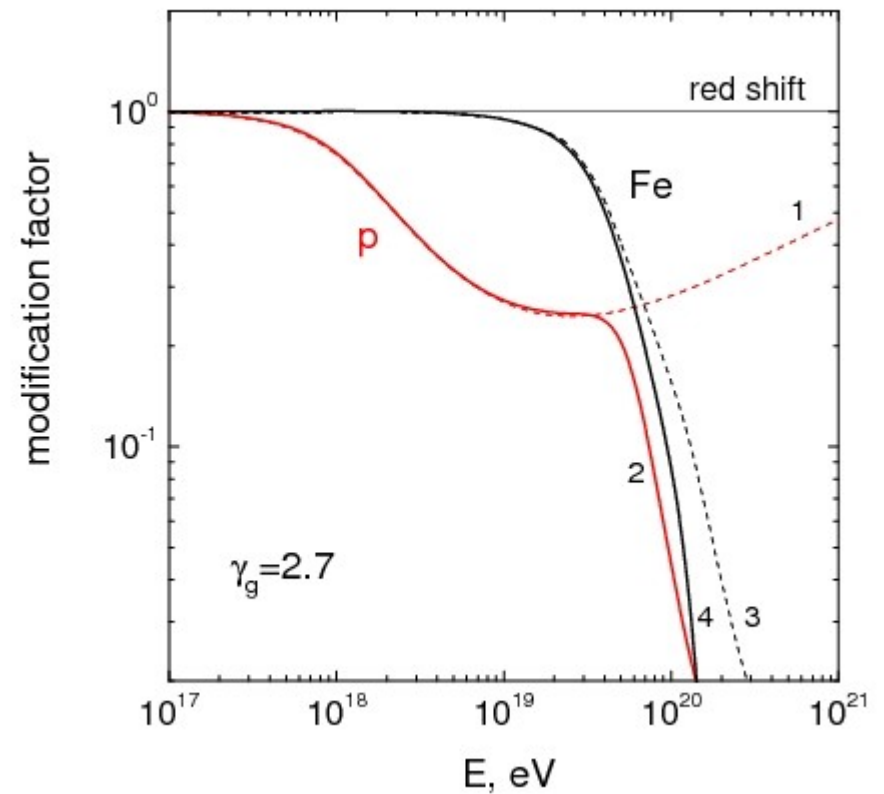
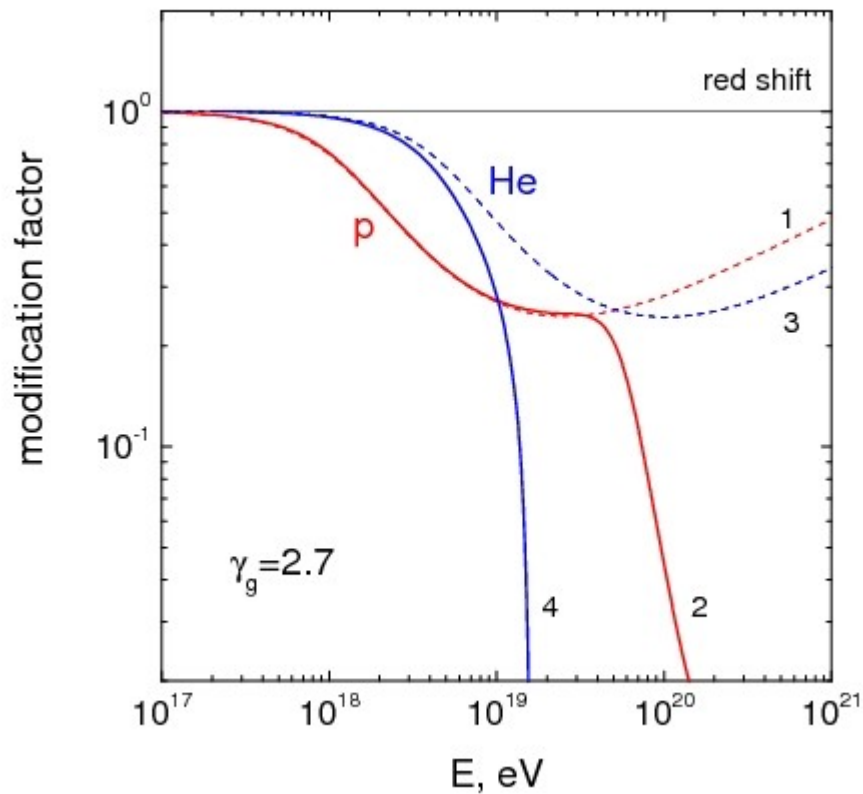


Effet sur un spectre de protons propagé



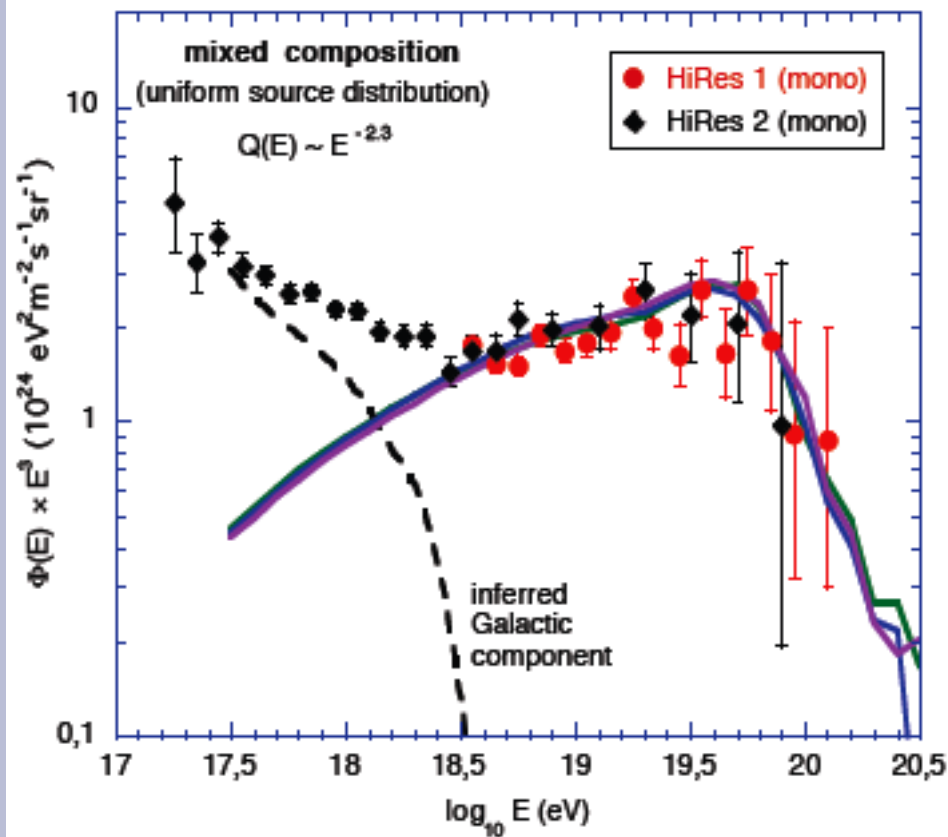
Les noyaux lourds

Allard et al. 05,
Berezinsky et al. 2006

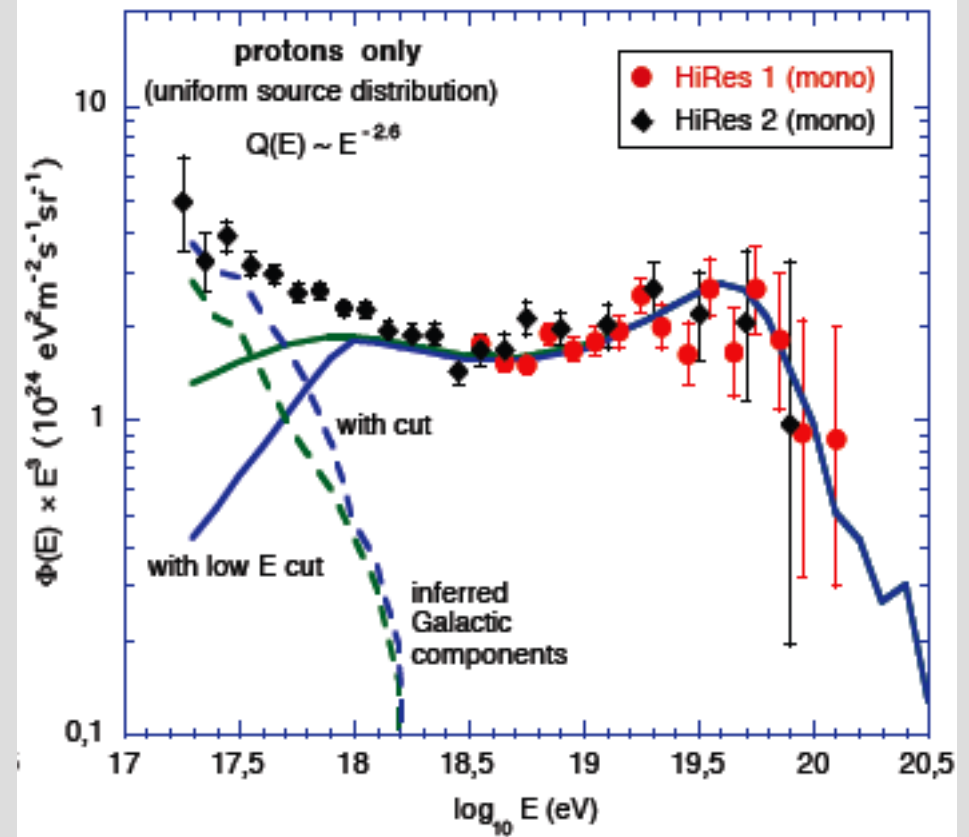


Si les UHECRs sont des noyaux lourds, le « creux » de la production de paires disparaît

Composition mixte versus pure proton



Compo mixte Allard et al.
Spectre à la source $E^{-2.3}$

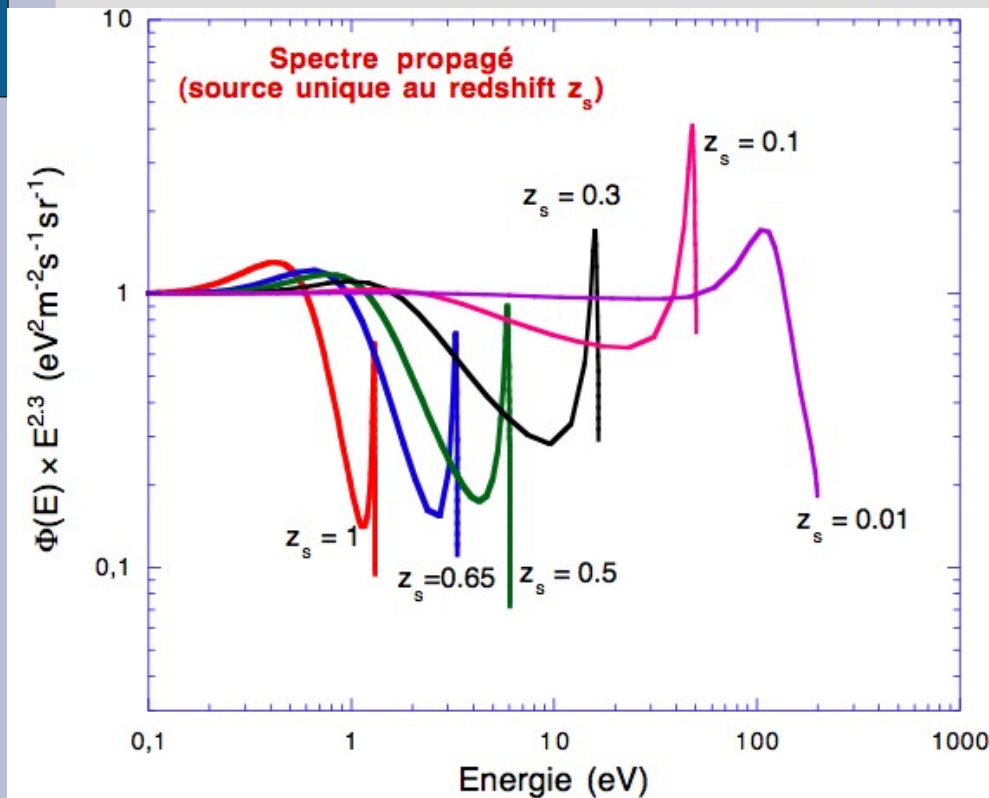


Pure proton
Spectre à la source $E^{-2.6}$

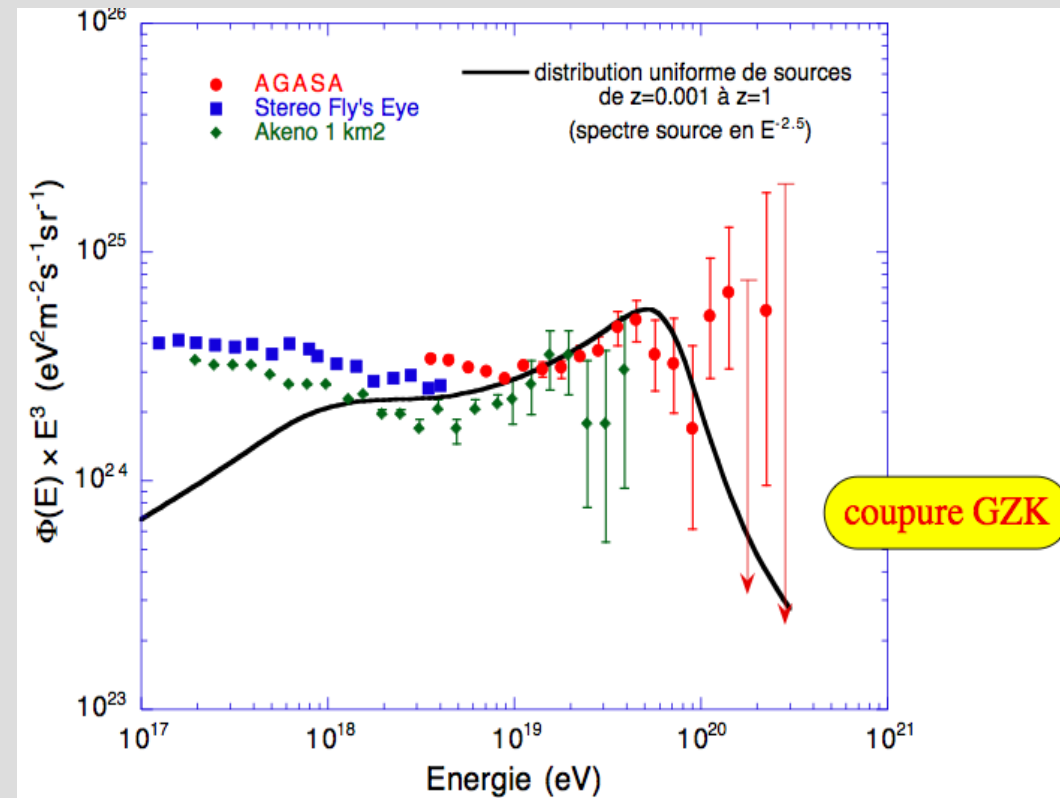
Effet sur un spectre de protons propagé

La coupure spectrale dépend :

- de la distance d'une source unique
- de la répartition et du nombre de sources



Spectre propagé pour une source à différents redshifts



Distribution isotrope de sources

Conclusion pour le spectre

Beaucoup de paramètres libres

→ Difficile à contraindre avec un seul spectre

Pistes:

Cheville :

Etude conjointe de la composition

Recherche d'anisotropies grande échelle à basse énergie :

→ chercher une composante galactique

Cut-off/GZK :

GZK : limite en photons

Recherche de sources à haute énergie

Spectres différentiels par source:

→ besoin d'une plus grande statistique

Les photons

Cascades electromagnetiques :

Photons et électrons/positrons d'UHE développent dans le milieu intergalactique des cascades électromagnétiques :
spectre centre autour d'énergies décroissantes avec la distance parcourue
Et peut descendre dans la regions du MeV-TeV.

Processus de création des photons secondaires :

- production de paire $e^+ e^-$ par les protons sur le CMB
- photoproduction de pions $\pi^+ -$
- desintegration des neutrons
- a la source : peu favorise actuellement

Interaction des photons :

- production de paires : (PP : collision photon-photon)

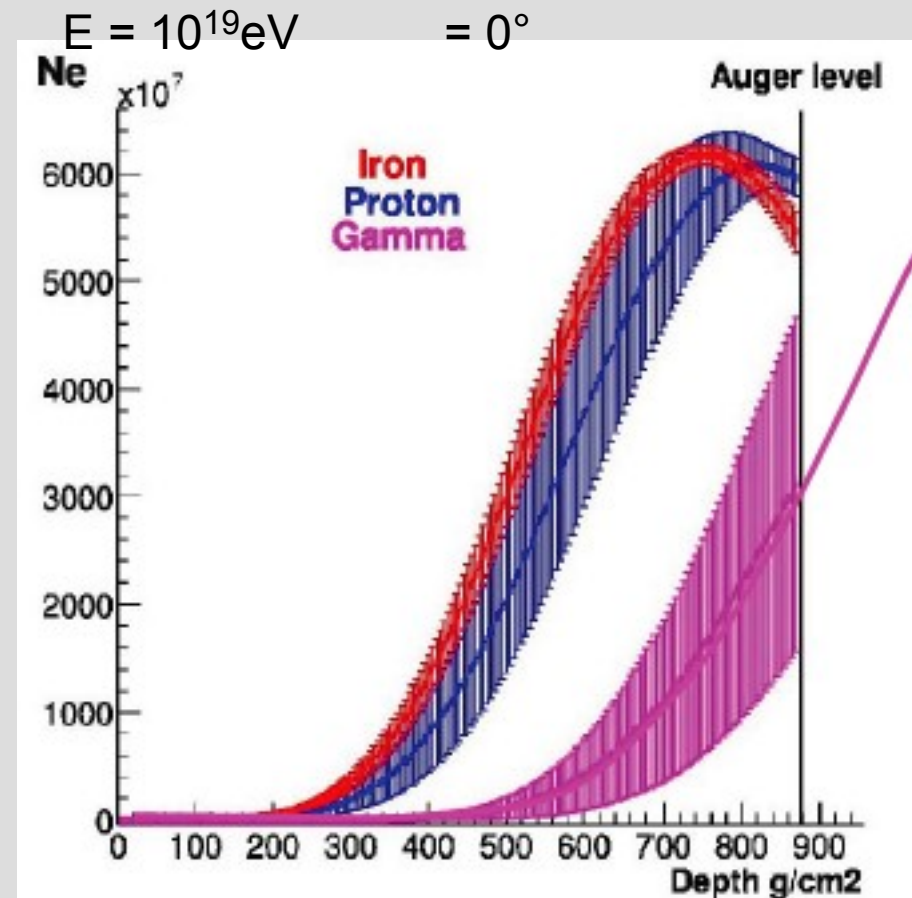
$$\gamma + \gamma \rightarrow e^+ + e^-$$

Σε χτιον εφφχαχε μ αξ α $E = 1 \text{ Πεζ}$ ουρ λε XMB
Χουπυρε δαν σλε πεχτρε δε σουρχε ζ HE ατυεε σα διστανχε χοαμ ολογιθυε σ

Analyse Photons

Les gerbes de photons sont très différentes des nucléons:

- Xmax : maximum de développement de gerbe plus grand
- Courbure du front de gerbe
- Risetime : temps de montée du signal



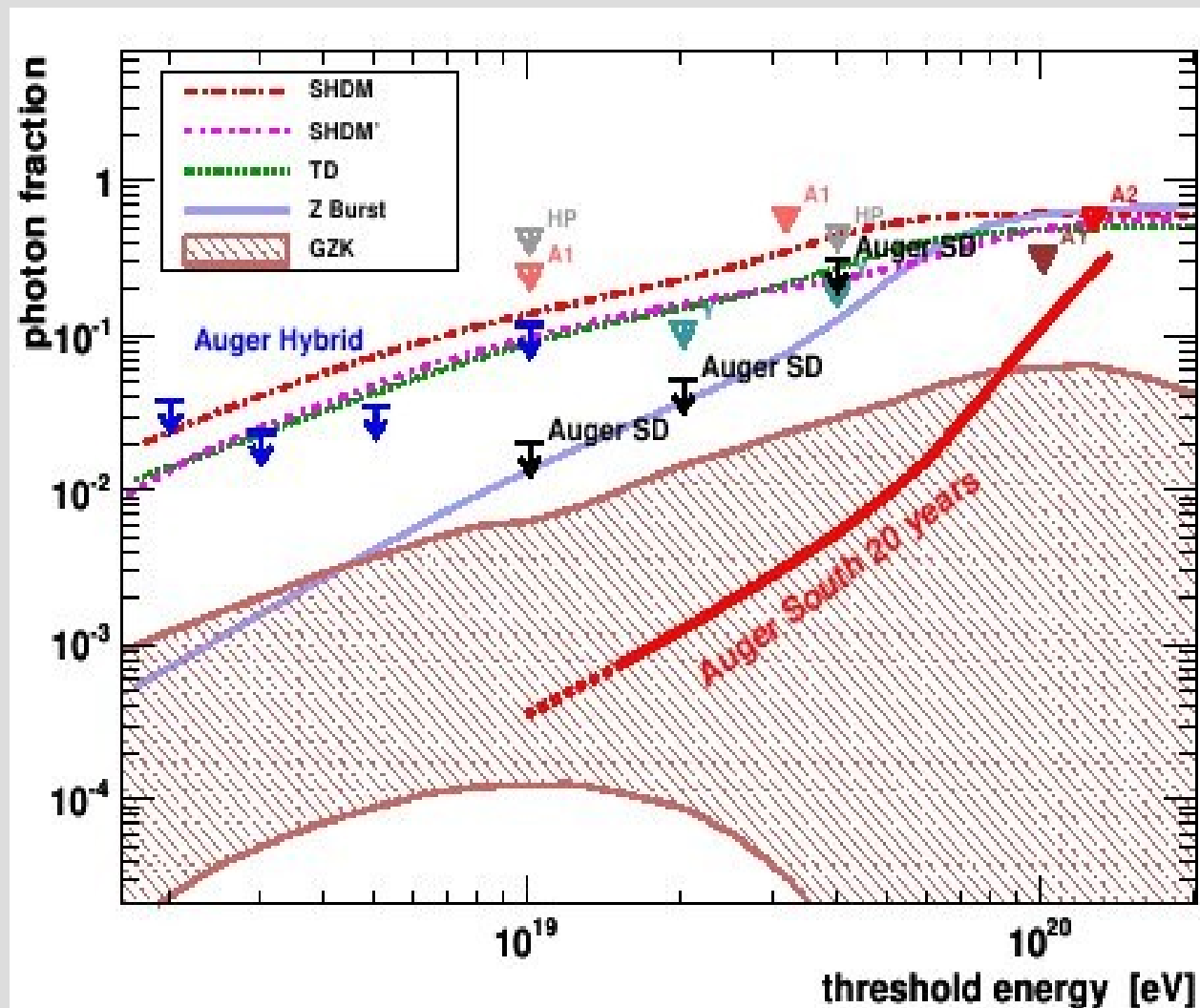
Une limite sur la fraction de photon de plus en plus contraignante

Exposition : facteur ~ 4 plus large que ce qui a été utilisé pour la limite photon à 2% à 10^{20} EeV.

L'observatoire commence à être sensible à la fraction de photons trans GZK !

Test GZK scenarios:

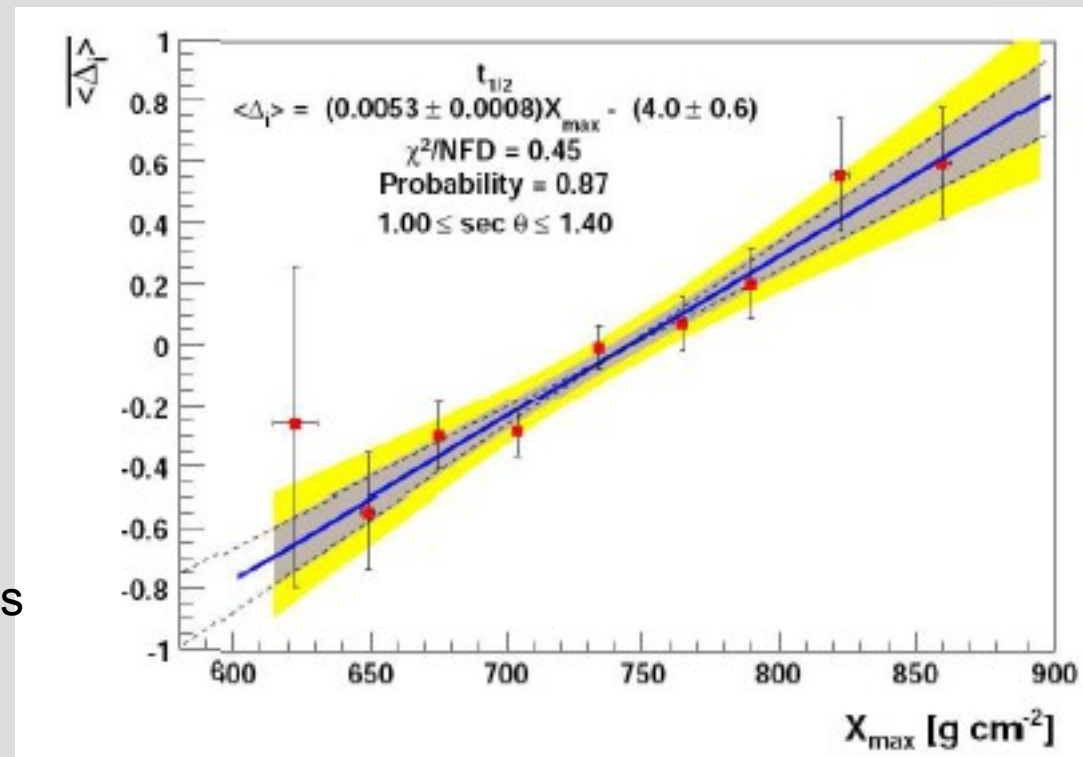
Les photons GZK sont supposés être absorbés sur une échelle de quelques Mpc par la production de paire



Composition

Mesure indirecte avec le SD :

- Calcul de l'écart moyen du temps de montée du signal dans les cuves en fonction de la distance et de l'angle zénithal.
 - doit être plus grand pour les gerbes qui se développent plus profondément dans l'atmosphère
- Calibration par rapport à X_{\max} avec des événements hybrides

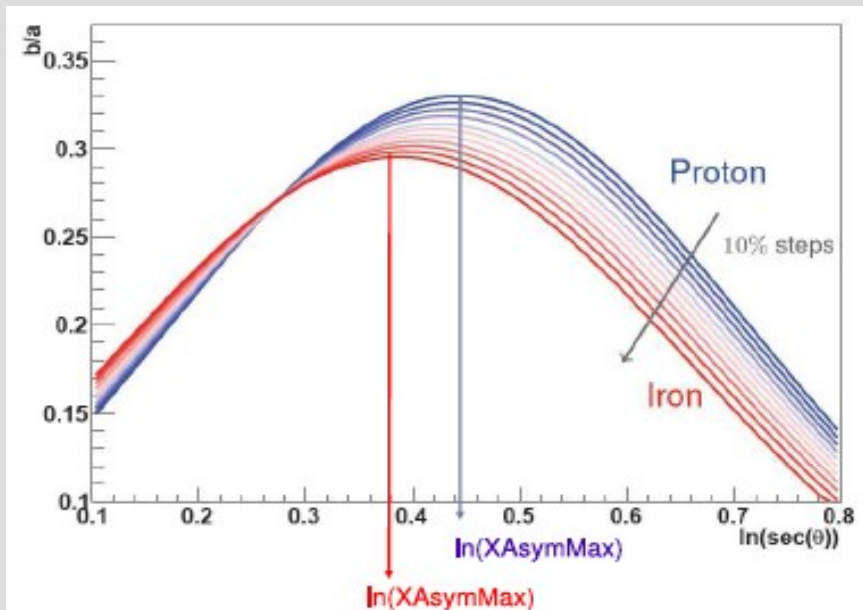


Composition

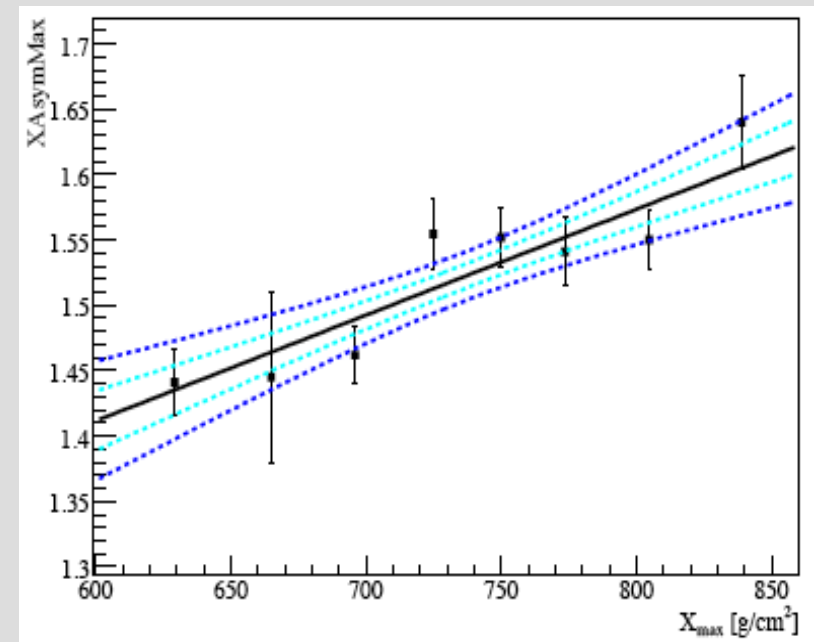
Mesure indirecte avec le SD :

Mesure indirecte de X_{\max} avec le SD :

Asymétrie azimuthal des distributions d'arrivée en temps pour les gerbes non verticales



- Asymétrie dans les temps d'arrivée des gerbes non verticales: facteur d'asymétrie (a/b)
- choix du maximum d'asymétrie



Paramétrisation de la relation Asymétrie maximale/ X_{\max} avec les hybrides

Composition: résultats

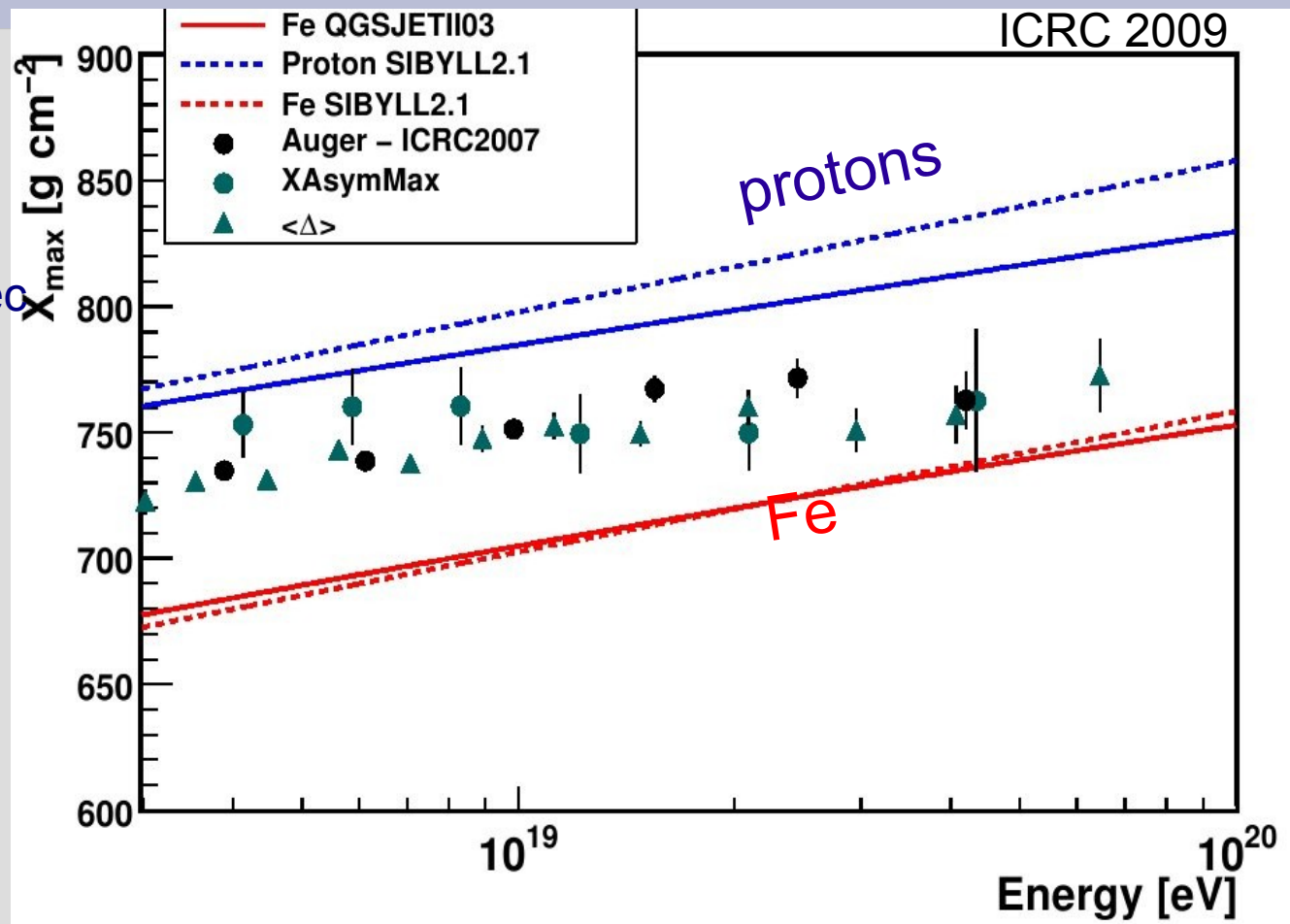
3 méthodes en bon accord :

- mesure directe de X_{\max} avec le FD

- mesure indirecte de X_{\max} avec le SD:

- Mesure du risetime moyen

- Mesure de l'asymetrie des temps d'arrivée



A l'air d'indiquer une transition des primaires légers vers les noyaux lourds avec l'augmentation de l'énergie

Conclusion à propos de la composition

Pas de conclusion définitive...

- La collaboration continue de travailler à la recherche des meilleurs observables liées à la composition
 - Il faut attendre encore de la statistique
 - Une évolution des éléments légers vers les éléments lourds semble être observée
- Cela indique plutôt des incertitudes importantes dans la physique des gerbes atmosphériques à UHE

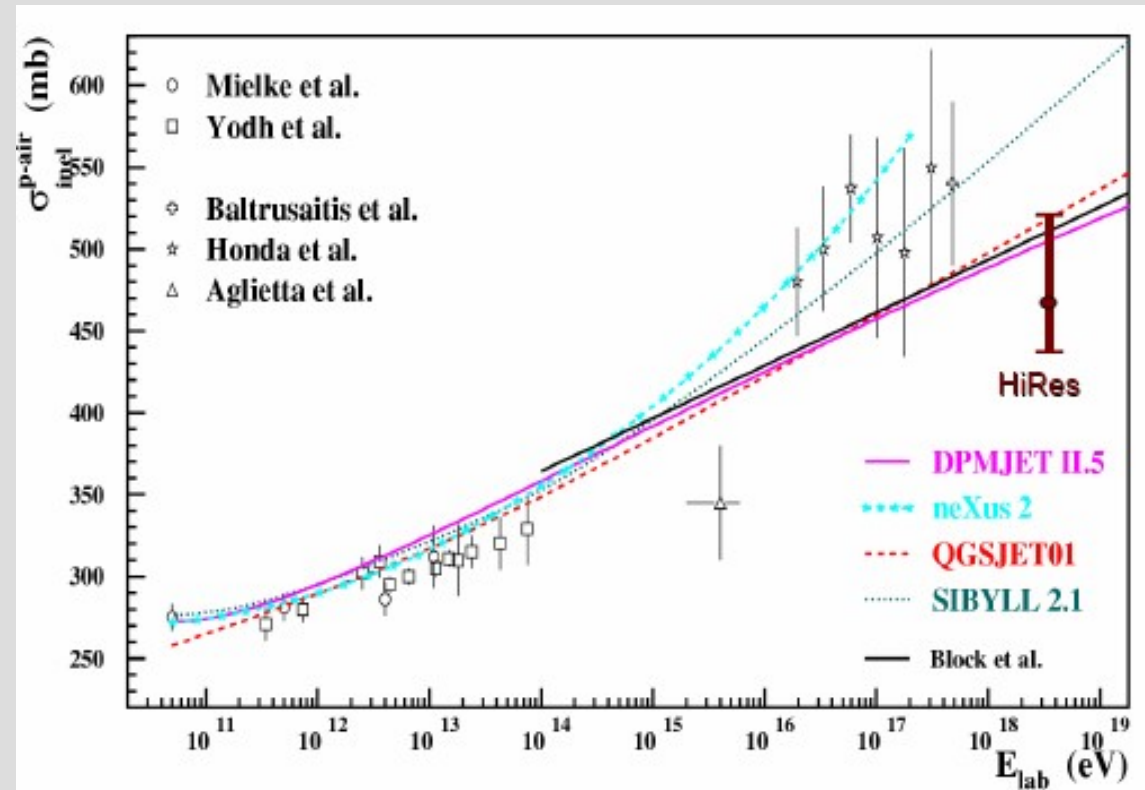
Modèles hadroniques

Limite dans la modélisation des interactions hadroniques est connu comme la majeure source d'incertitude.

→ Extrapolation des modèles hadroniques au-delà de 10^{13} eV

On attend LHC pour des données de plus haute énergie!! (10^{17} eV)

But: essayer d'obtenir des informations sur ces interactions.



Teste des modèles hadroniques

Comparaison des données de l'observatoire avec les simulations

ICRC2009

FD → test le développement longitudinal des gerbes:

- shower maximum X_{max}
- énergie du primaire

SD → test les comportements muoniques et EM au sol

- * Nombre de muons à 1000 mètres
- * Test direct avec des événements individuels hybrides

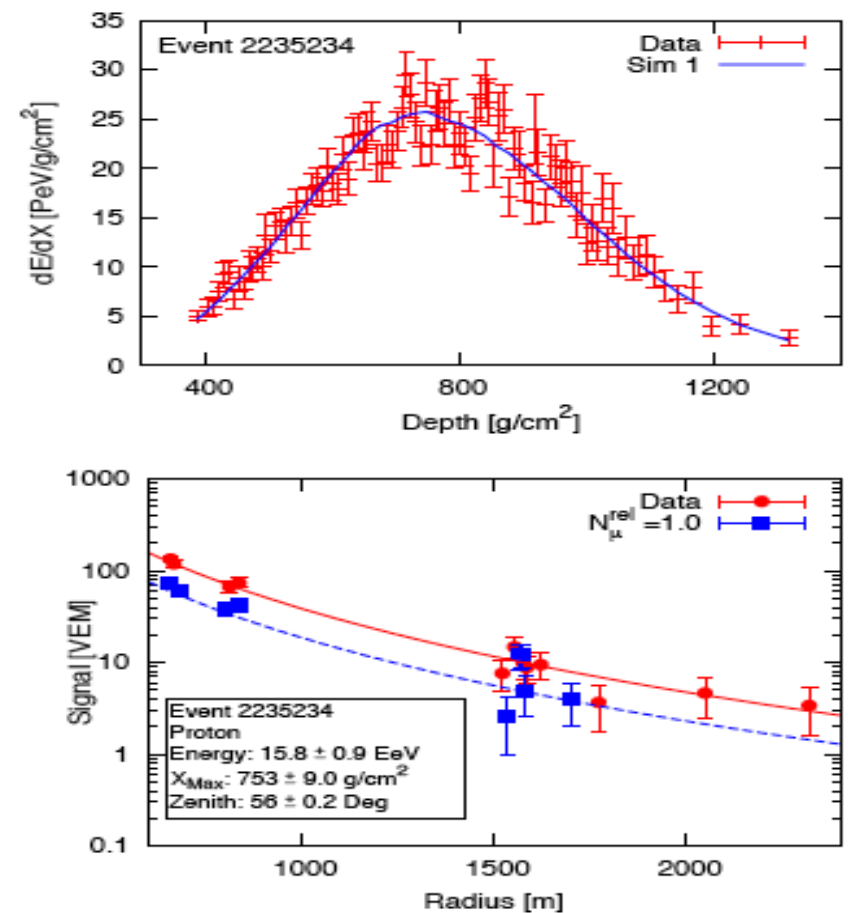


Fig. 5: The observed longitudinal (top panel) and lateral (bottom panel) profiles for one of the hybrid events. The best-matching simulation is shown by the full (top) and dashed (bottom) line (without rescaling of the muon number relative to the model prediction).

Test de modèles hadroniques

Nombre de muons à 1000 m pour des protons ($E=10\text{EeV}$; $<50^\circ$)
En fonction de l'échelle d'énergie du FD

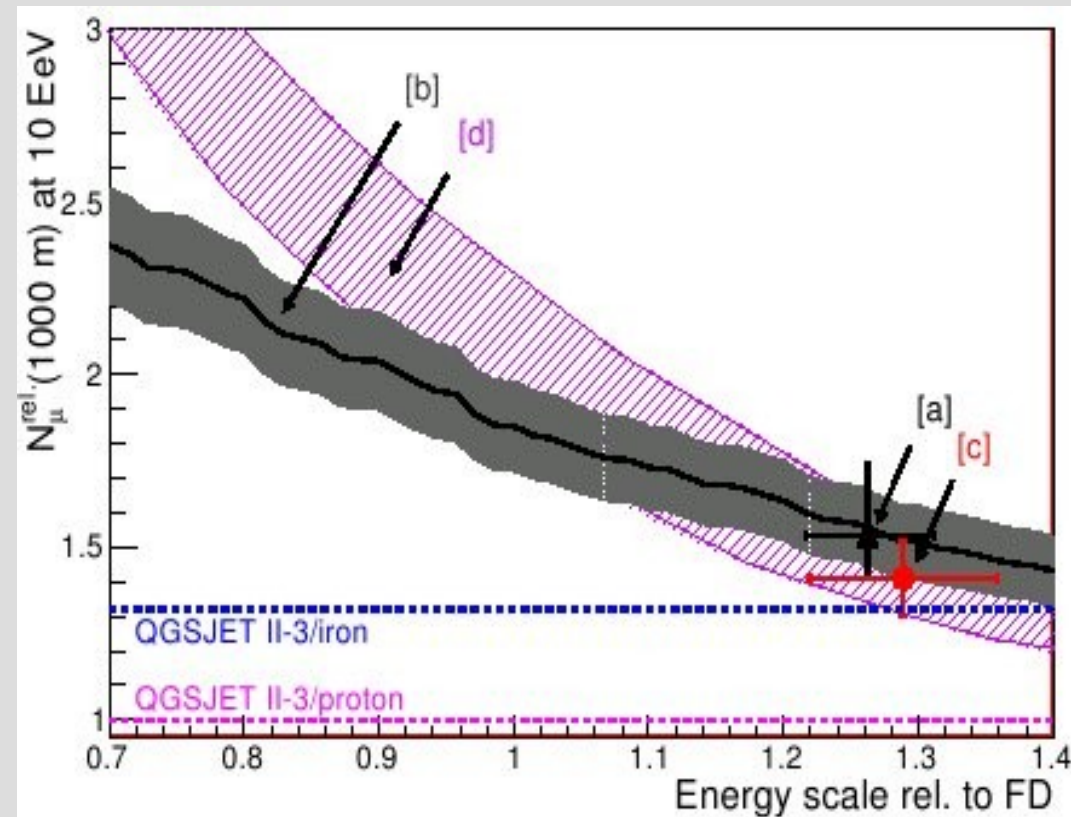
ICRC2009

Toutes les analyses compatibles :

L'analyse montre que le signal muon est 1.3 fois plus grand que celui prédit par QGSJET-II pour les protons.

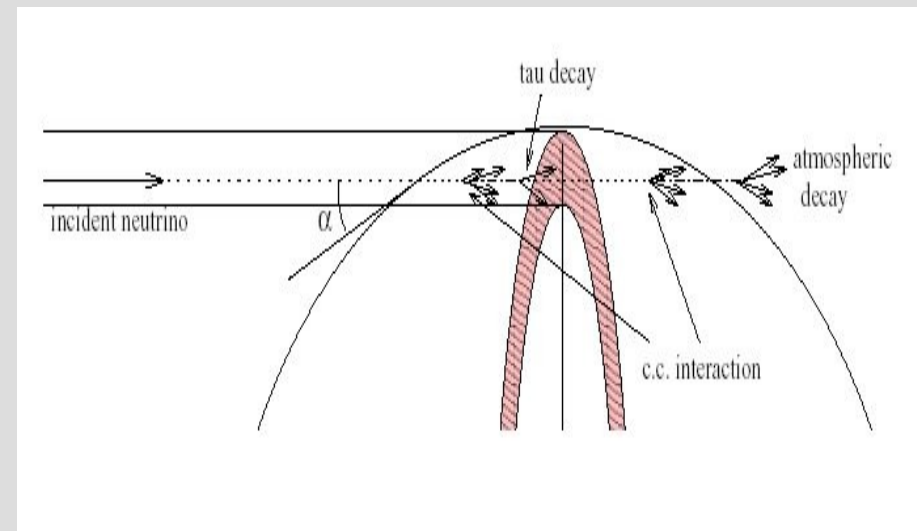
→ Déficit en muons dans les gerbes simulées

→ marginalement compatible avec les prédictions des modèles pour le fer



L'observatoire Auger peut aussi détecter des neutrinos ultra-énergétiques : cas des ν_τ

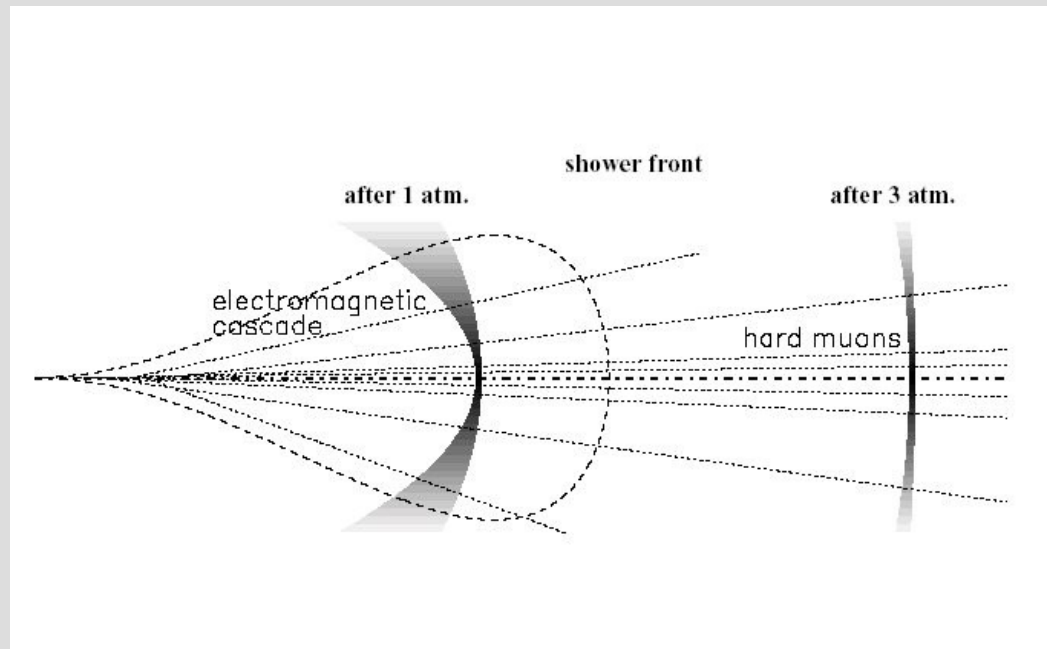
- Un neutrino « tau » venant du sol à moins de 2° de l'horizontale peut produire un τ sortant de terre, sa longueur moyenne de désintégration étant de 50 km à 10^{18} eV.
- Le lepton τ peut se désintégrer à basse altitude (quelques 100 m) juste au-dessus des détecteurs qui pourront être déclenchés.
- L'acceptance est significative pour un domaine d'énergie du ν_τ allant de 2×10^{17} eV à 6×10^{18} eV.



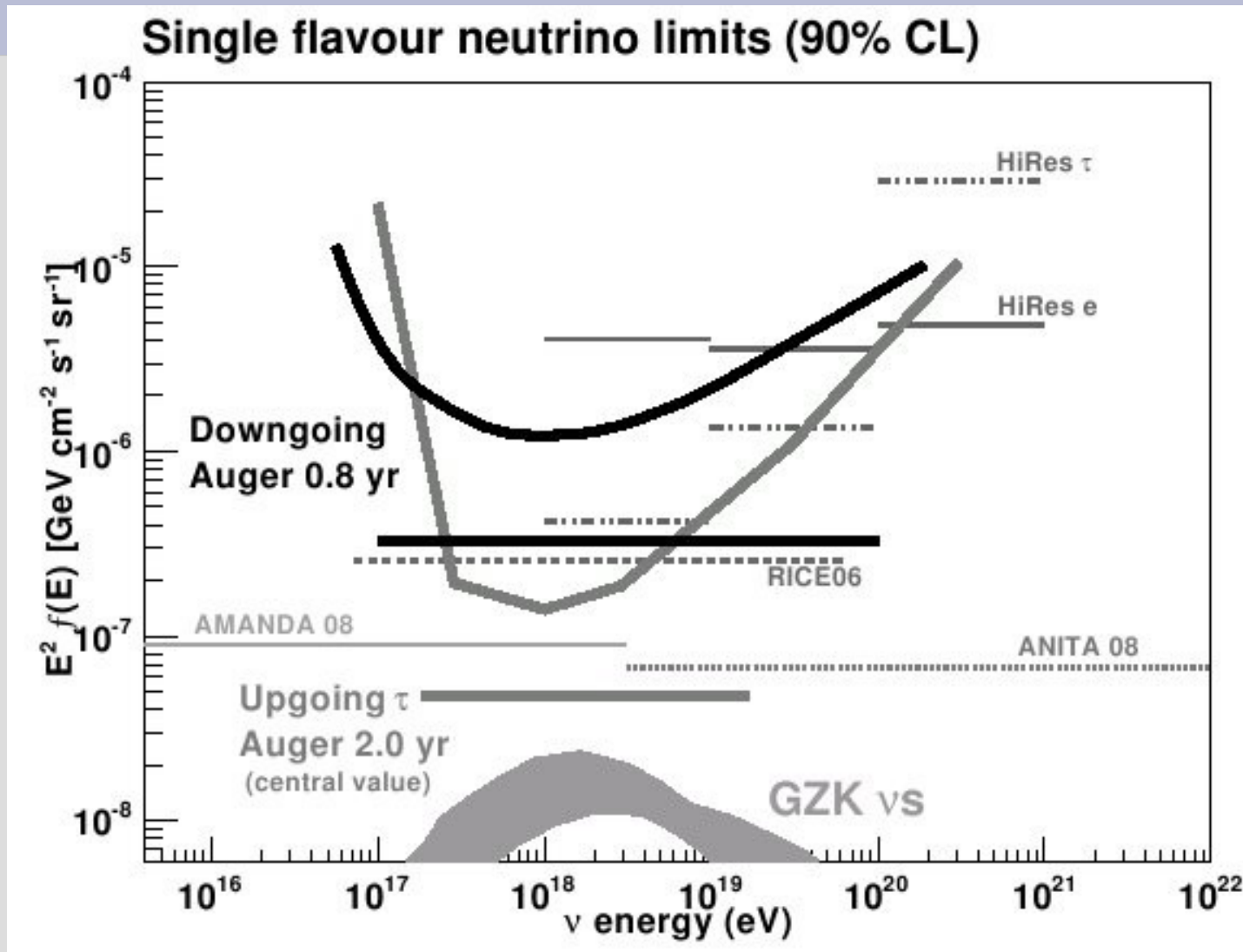
À ces énergies, la Terre n'est plus transparente pour les neutrinos – leur longueur moyenne d'interaction n'est plus que de quelques 100 km – mais quelle que soit l'interaction (par courant chargé ou neutre), un neutrino τ moins énergétique sera finalement produit, ce qui augmente la probabilité d'une détection.

L'observatoire Auger peut aussi détecter des neutrinos ultra-énergétiques : gerbes horizontales

- La masse d'atmosphère observée à ces grands angles zénithaux par l'observatoire Auger a été évaluée à environ 40 km^3 d'eau équivalents, donc une cible intéressante pour la détection de neutrinos.
- Le point d'interaction du neutrino peut alors être relativement proche du détecteur (quelques km), produisant ainsi une gerbe horizontale jeune caractérisée à la fois par :
 - la présence d'une composante importante d'électrons (\pm) et γ secondaires ;
 - un front de particule à courbure significative ($\sim \text{km}$) ;
 - un signal s'étalant temporellement sur plusieurs centaines de ns.



Limite Neutrino



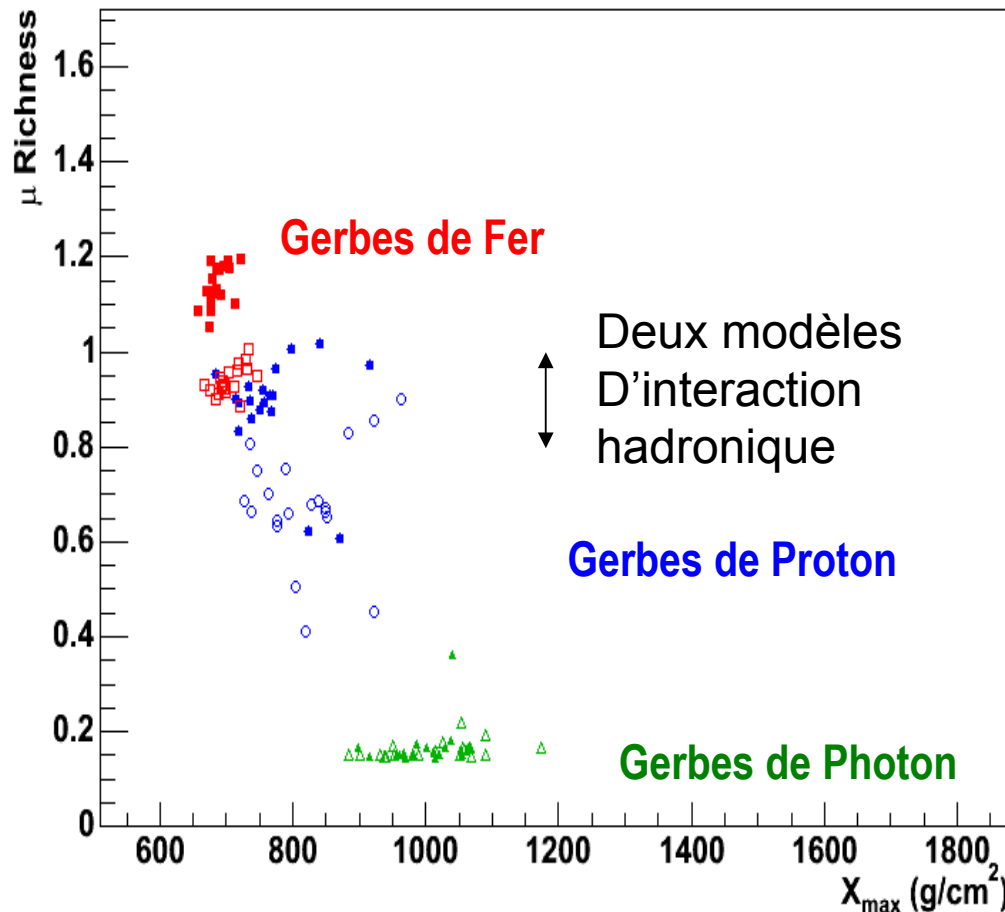
Limite sup différentielle et intégrée pour un flux diffus de nu ascendant et de nu_tau descendant

Conclusion

- Mesure du spectre :
 - Accord avec le spectre Hires à 20% pres sur l'énergie
 - Confirmation et mesure de la Cheville
 - creation de paires / ou transition Gal-ExtrGal ?
 - composition
 - anisotropies grande échelle à basse énergie
 - Confirmation et mesure d'un cut-off à haute énergie
 - coupure spectrale à la source ?
 - GZK ?
 - anisotropies petites échelles à haute énergie
- modelisation du spectre propagé: difficile car beaucoup de paramètres :
 - injection
 - nombre et distribution des sources
 - composition
- Composition :
 - Spectre de masses: pas de conclusion définitive
mesure directe et indirecte en bonne accord
 - probablement les sections efficaces hadroniques à revoir
 - limite en photons : presque dans la zone GZK → statistique
 - Auger peut aussi détecter des neutrinos

Perspectives sur la mesure de la composition : la séparation des composantes muonique / électromagnétique combiné avec la mesure du X_{\max}

S_{μ}/S_{em} à 1km ($E=10^{19}\text{eV}$, $\theta=45^{\circ}$)



Objectifs:

- Identification
- Mesure de $\sigma_{\text{p-air}}(E)$

Muons:

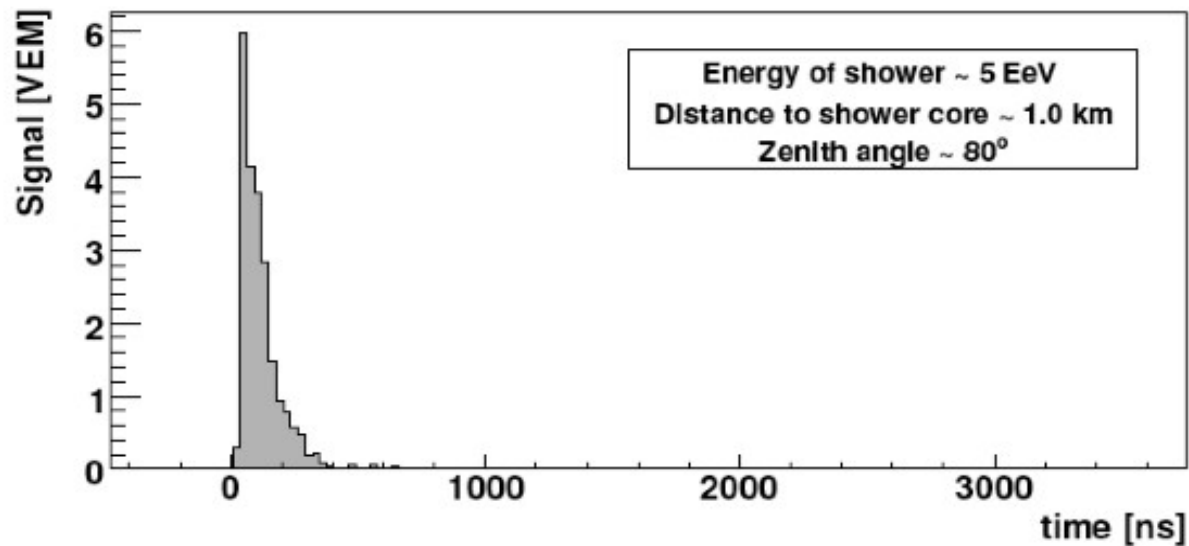
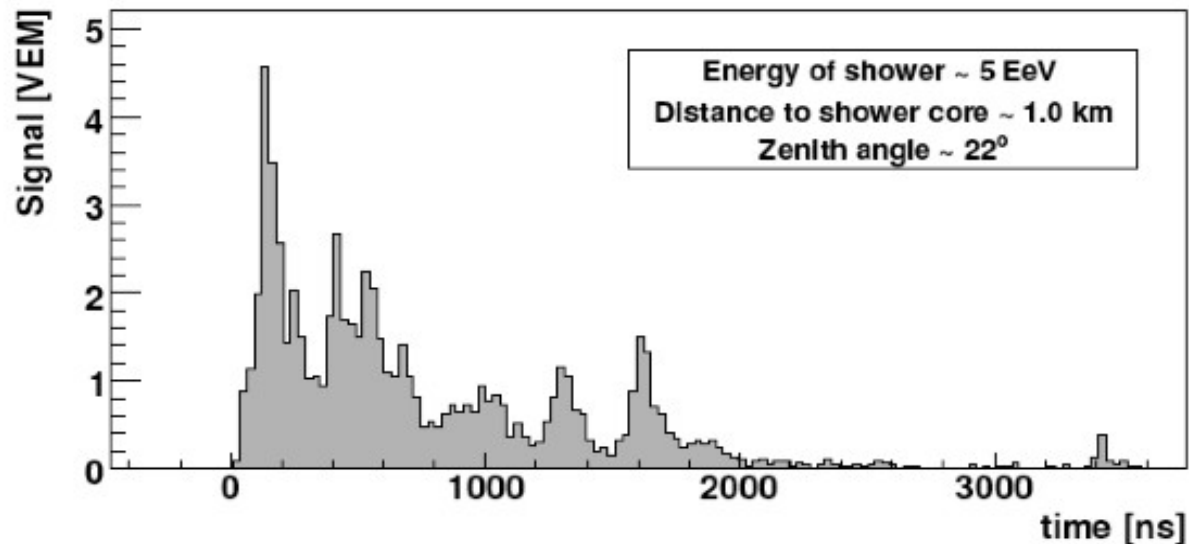
- Analyse détaillée des traces de FADC, reconnaissance de pics
- Scintillateurs enterrés (projet AMIGA) pour compter les muons

X_{\max} :

Élévation maximale des télescopes $0^{\circ} \rightarrow 60^{\circ}$ pour mieux mesurer le X_{\max} des gerbes de faible énergie

Analyse des gerbes horizontales

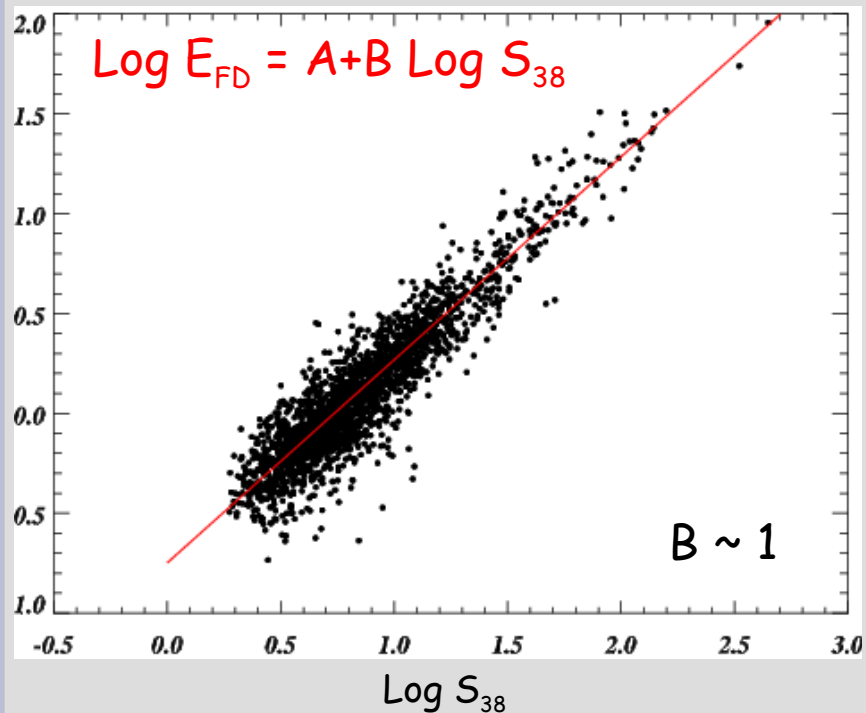
vertical vs. horizontal showers



Calibration

$$S_{38^\circ} = f(E)$$

Log E_{FD} [EeV]

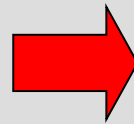
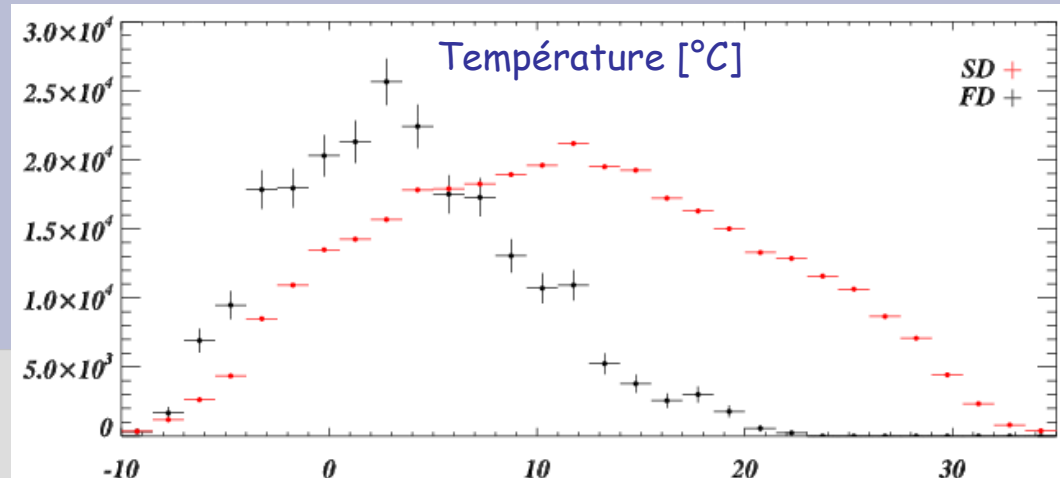


$$E_{SD} [\text{EeV}] = 10^A \times (S_{38})^B$$

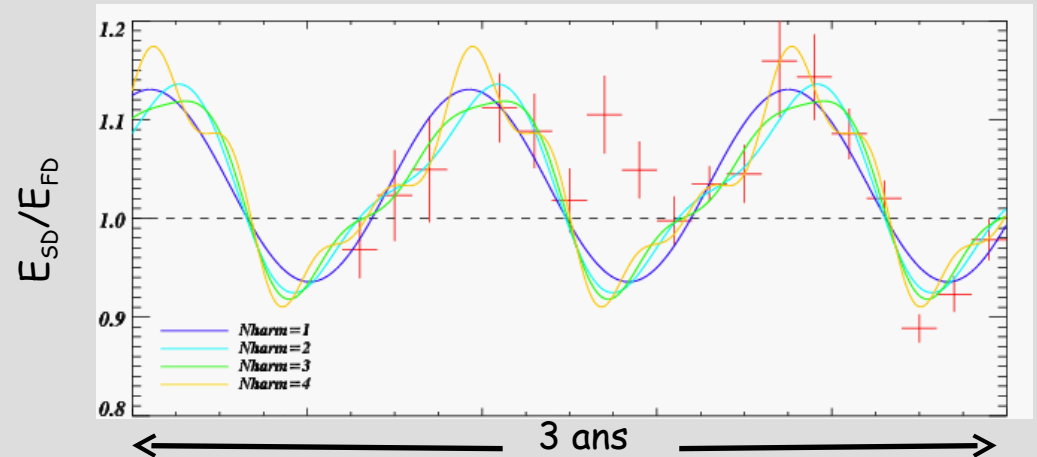
$$\langle X_{SD} \rangle \neq \langle X_{FD} \rangle$$

X = variables d'état de l'atmosphère

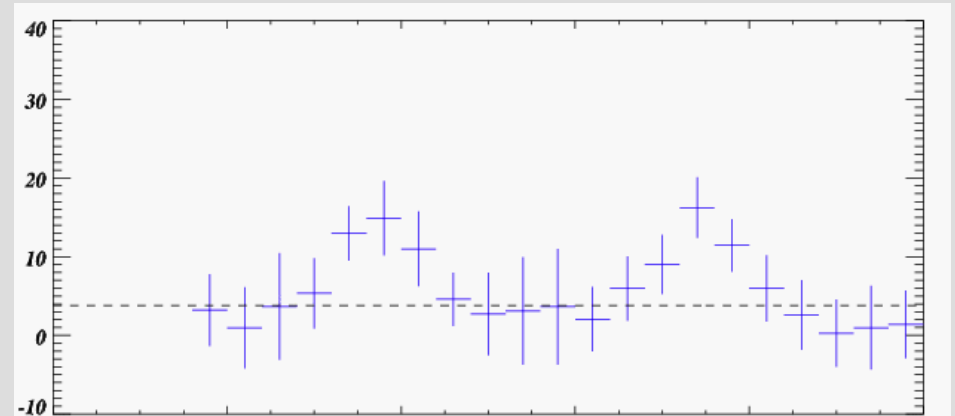
Nombre d'événements



Biais systématique sur E_{SD} attendu

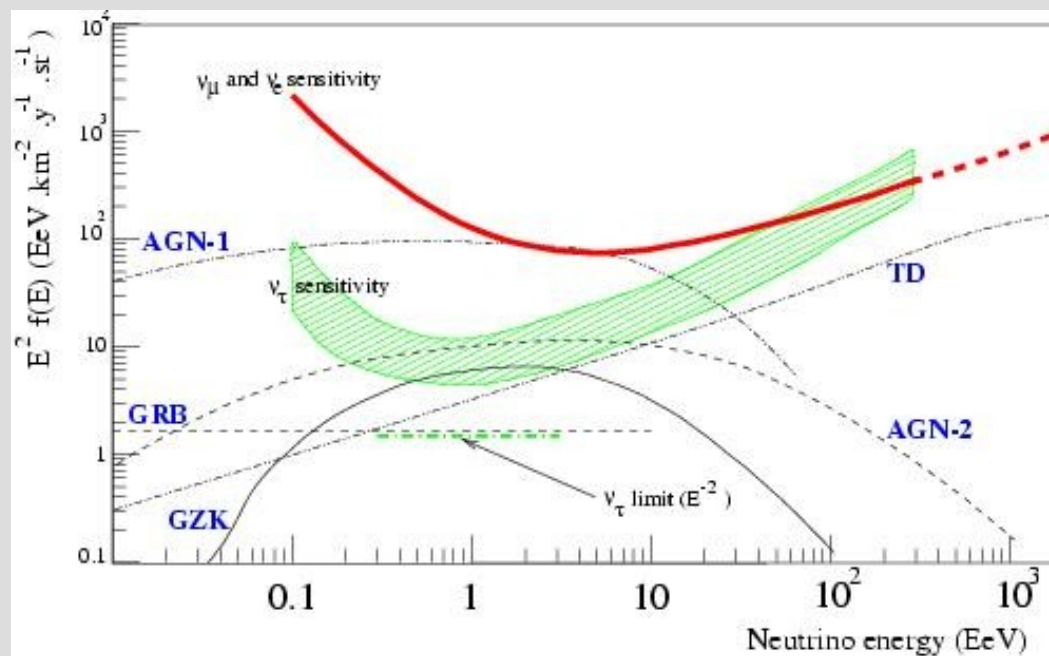


$T (^{\circ}\text{C})$



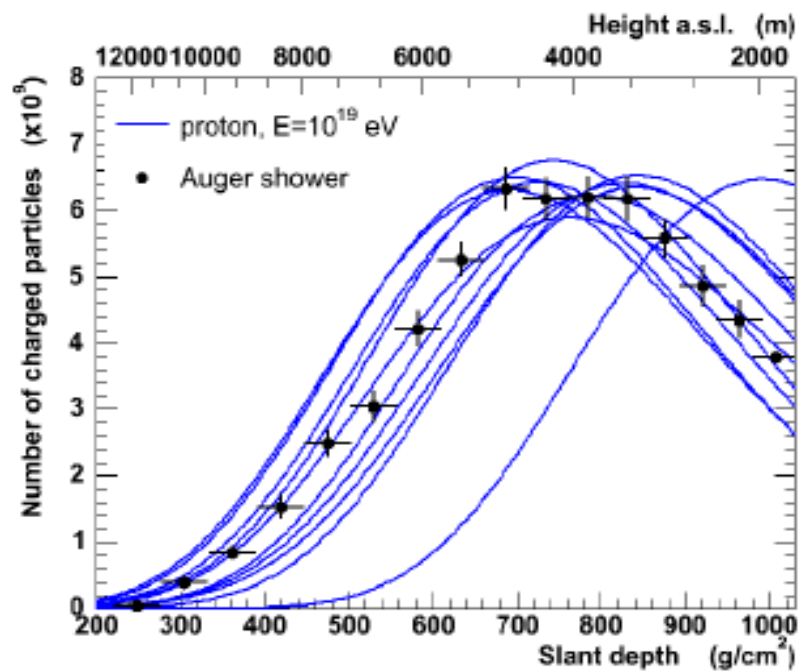
L'observatoire Auger : sensibilité aux neutrinos ultra-énergétiques

- Interactions de neutrinos dans l'atmosphère à très grand angle zénithal : quelques 10 km^3 d'eau équivalents.
- Interactions dans la Terre de ν_τ ascendants à moins de 2° de l'horizontale : $\sim 1000 \text{ km}^3$ d'eau équivalents, pour $E_\nu \sim 3 \times 10^{18} \text{ eV}$.

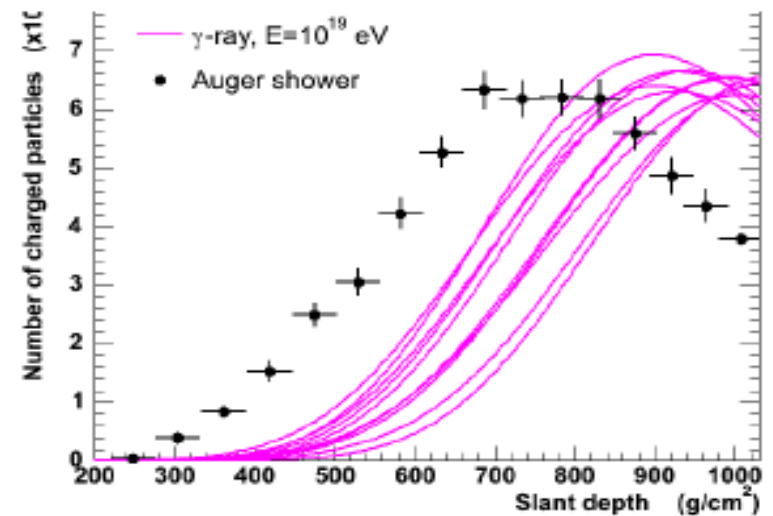
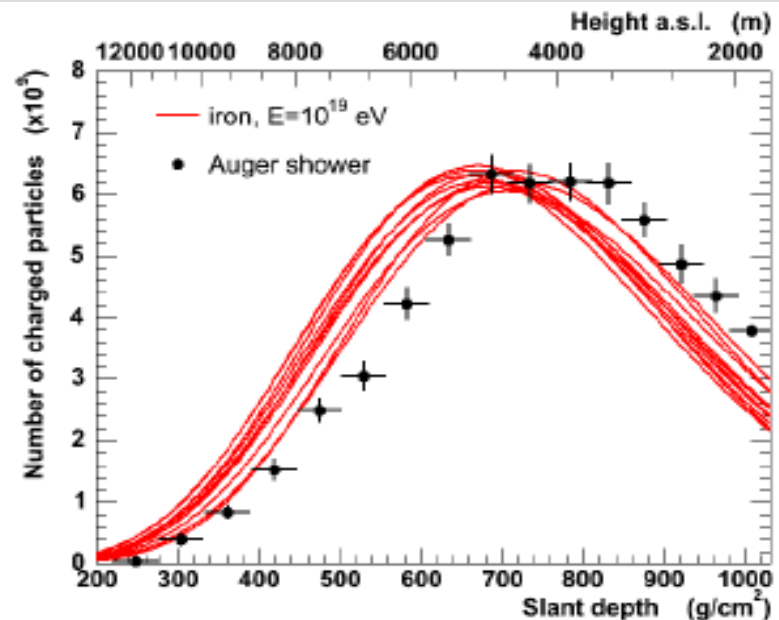


Phénoménologie des gerbes

Detailed MC simulation: 10 showers
zenith angle 35°, QGSJET



$$N_{\max}^A = N_{\max}, \quad X_{\max}^A \sim \lambda_e \ln(E_0/A)$$



Shower maximum measured over 2 decades in E

