

Étude de la composition des rayons cosmiques  
d'ultra-hautes énergies  
détectés par l'Observatoire Pierre Auger et  
analyse des processus hadroniques

Xavier Garrido

sous la direction de

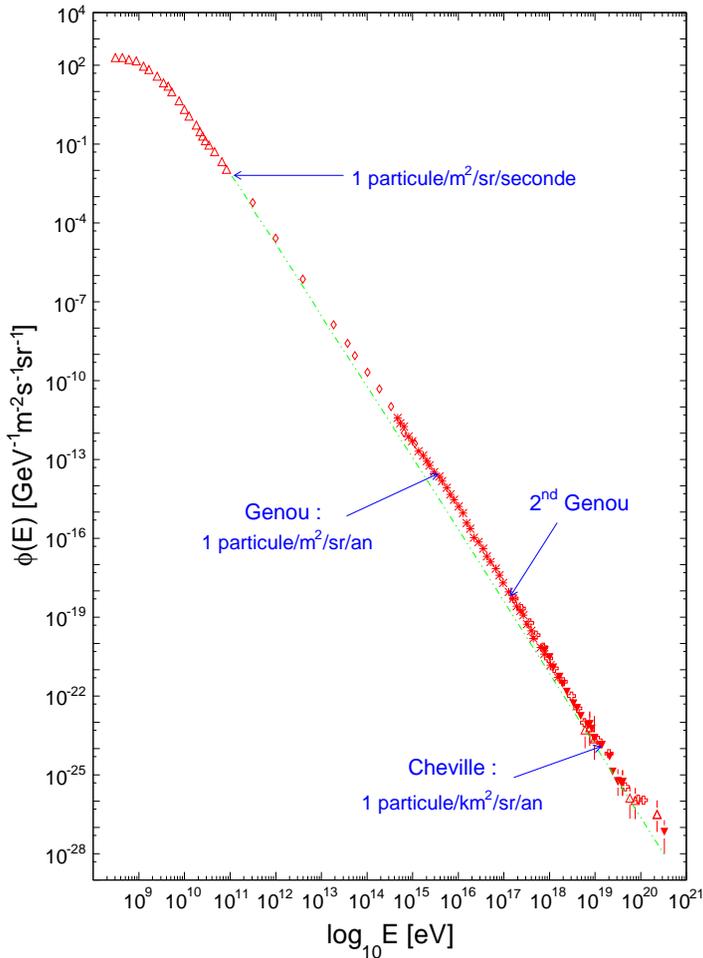
Alain Cordier & Pascal Lautridou



# Plan de l'exposé

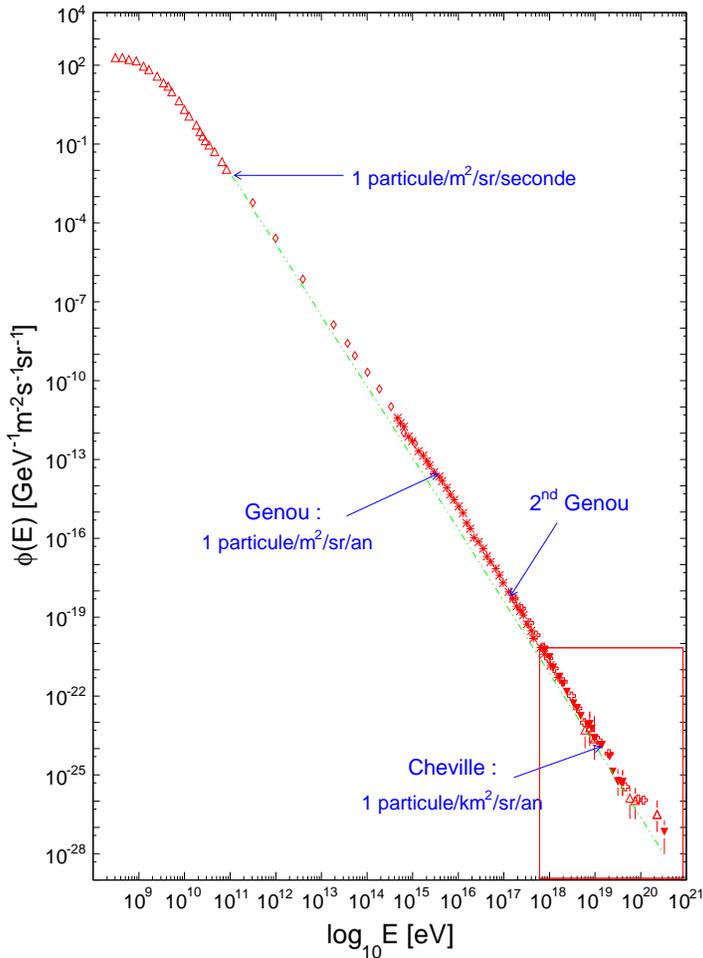
- **Problématiques** liées aux RCUHEs
- L'Observatoire Pierre Auger : **un détecteur hybride**
- Étude de la composition des gerbes : **comptage des muons**
- Mesure de **la section efficace rayon cosmique-air**
- Conclusions et perspectives

# Les rayons cosmiques d'ultra-haute énergie



- Spectre régulier sur 12 décades en énergie  
→ Loi de puissance d'indice moyen  $-2.7$

# Les rayons cosmiques d'ultra-haute énergie



- Spectre régulier sur **12 décades** en énergie

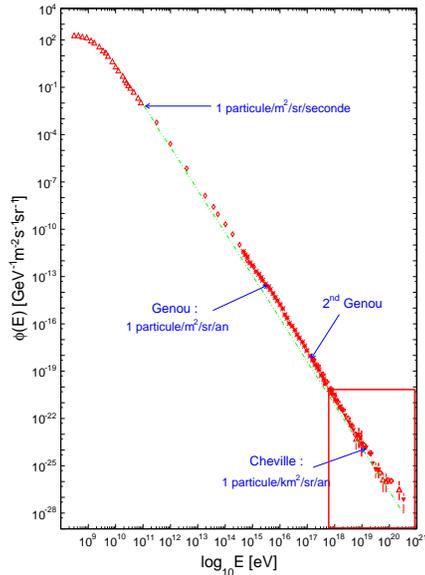
→ Loi de puissance d'indice moyen  $-2.7$

- Région UHE :  $E \geq 10^{18}$  eV = 1 EeV

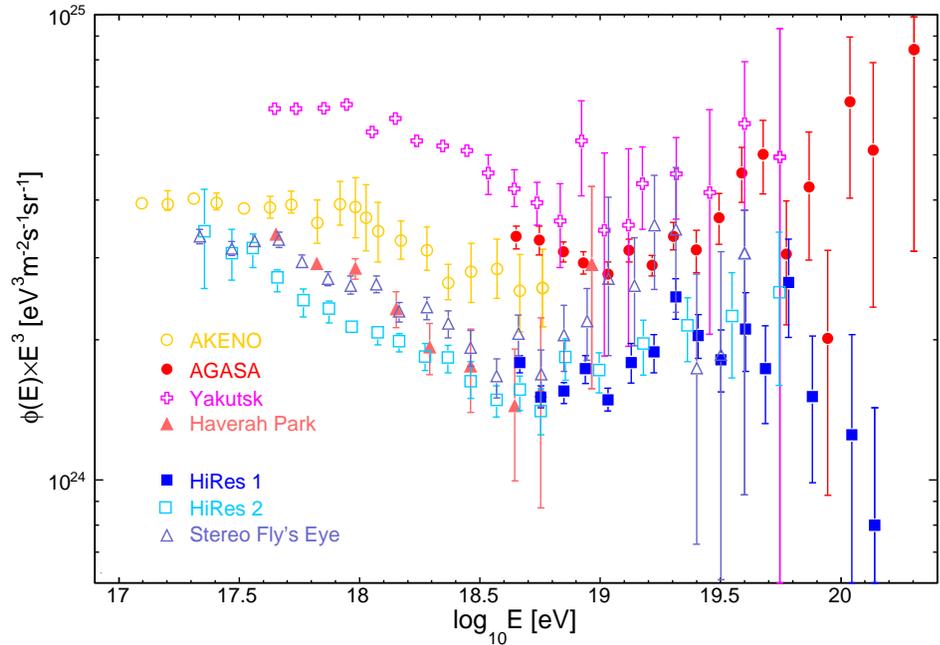
→ Faible statistique

$\leq 1$  part./km<sup>2</sup>/siècle à  $10^{20}$  eV

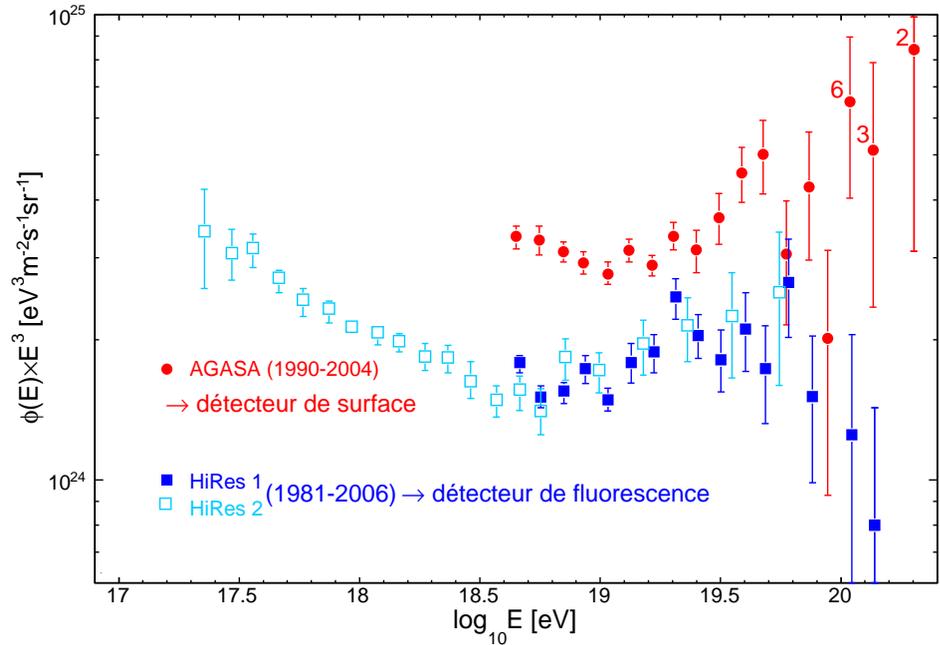
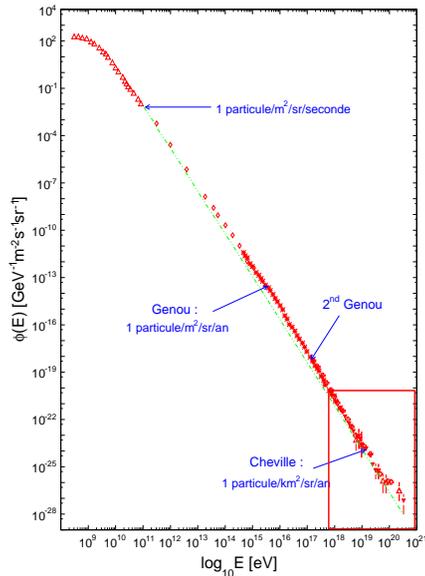
# Les rayons cosmiques d'ultra-haute énergie



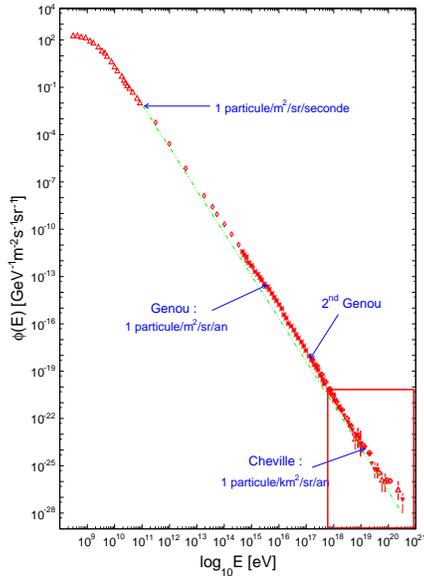
Situation pour le moins confuse !



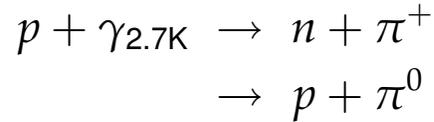
# Les rayons cosmiques d'ultra-haute énergie



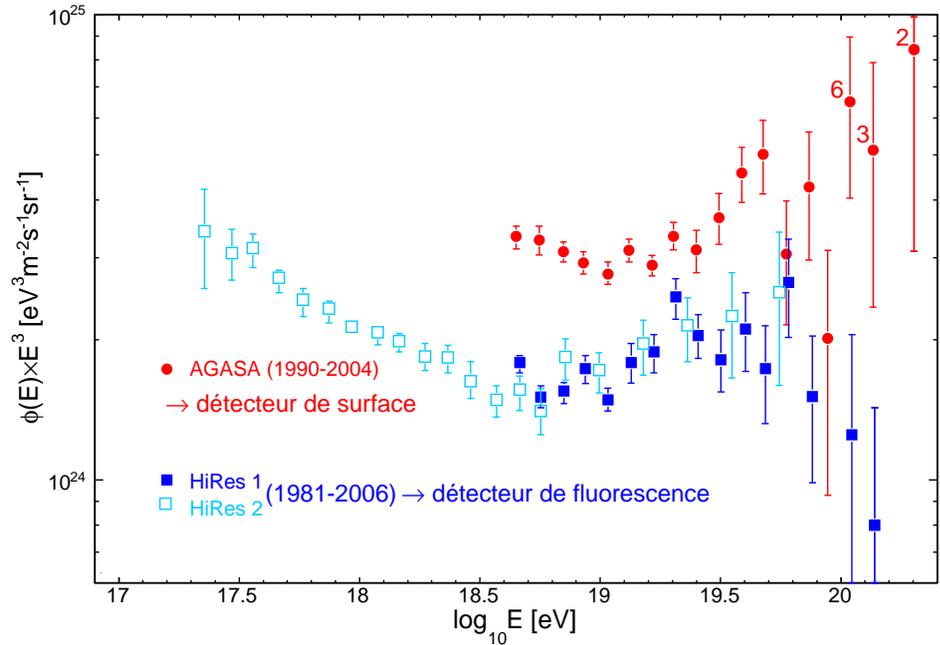
# Les rayons cosmiques d'ultra-haute énergie



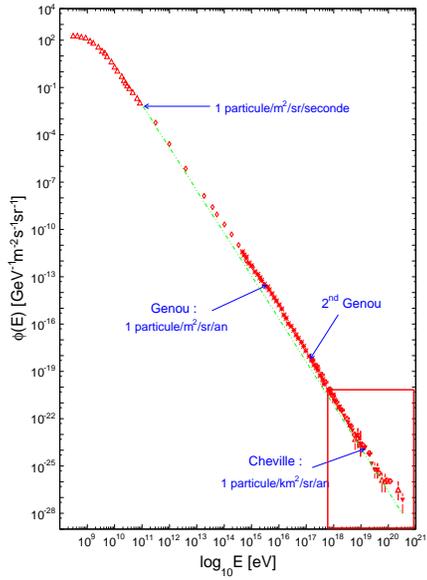
- Contexte théorique : effet GZK (1966)



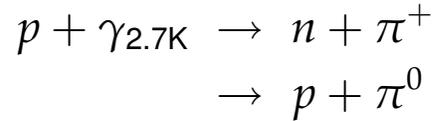
→ Pertes énergétiques  $\sim 15\%/2 \text{ Mpc}$



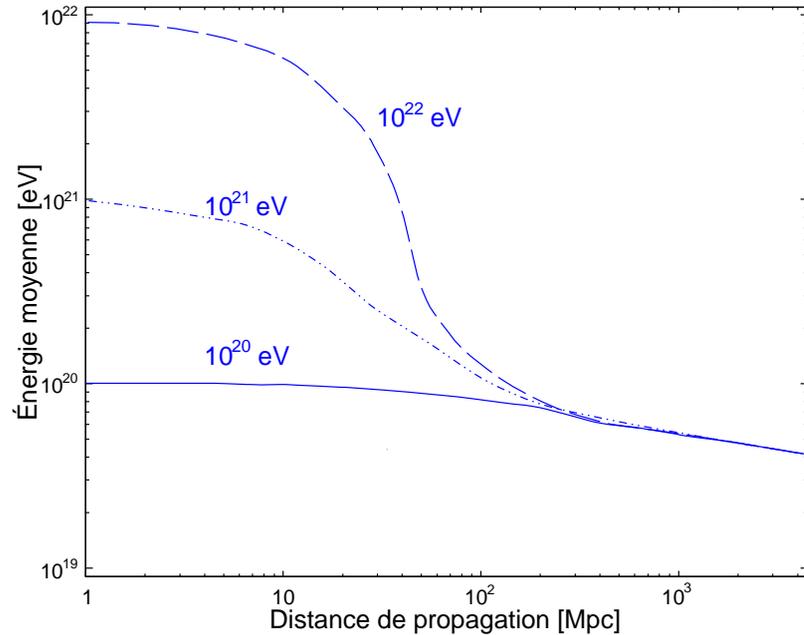
# Les rayons cosmiques d'ultra-haute énergie



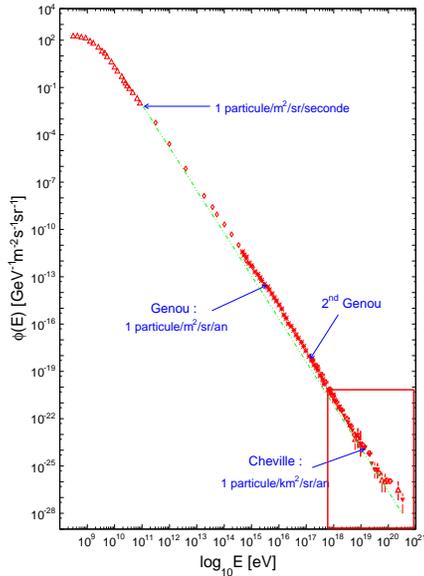
- Contexte théorique : **effet GZK (1966)**



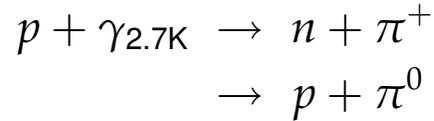
→ Pertes énergétiques  $\sim 15\%/2 \text{ Mpc}$



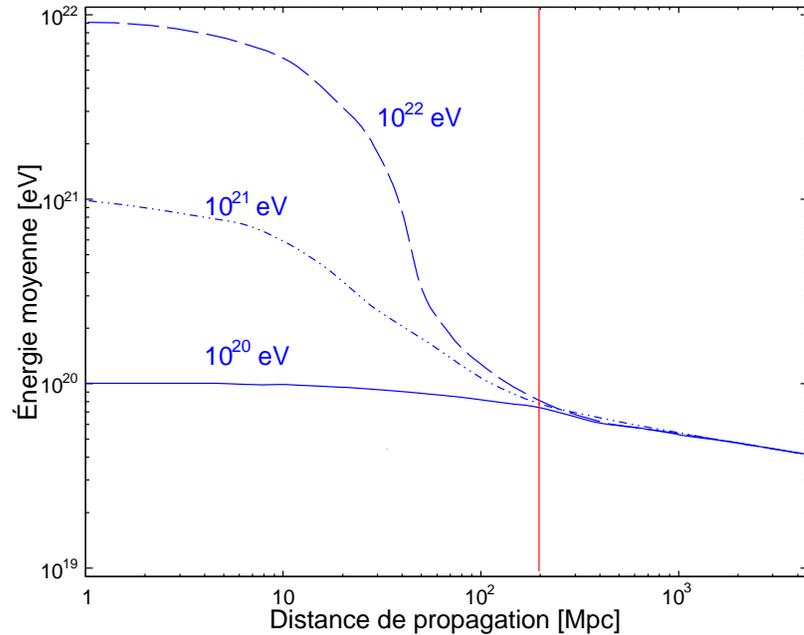
# Les rayons cosmiques d'ultra-haute énergie



- Contexte théorique : **effet GZK (1966)**



→ Seul l'Univers proche ( $\leq 200$  Mpc) contribue au flux au-delà de  $6 \cdot 10^{19}$  eV



# Les rayons cosmiques d'ultra-haute énergie

- Modèles de production des RCUHEs :
  - Scenarii "bottom-up" : Accélération par des objets astrophysiques

$$E_{\max} \simeq Z \left( \frac{B}{1 \mu\text{G}} \right) \left( \frac{L}{1 \text{Mpc}} \right) \times 10^{21} \text{ eV}$$

→ Candidats potentiels : noyaux actifs de galaxie, sursauts gamma

- Scenarii "top-down" : Désintégration de particules supermassives

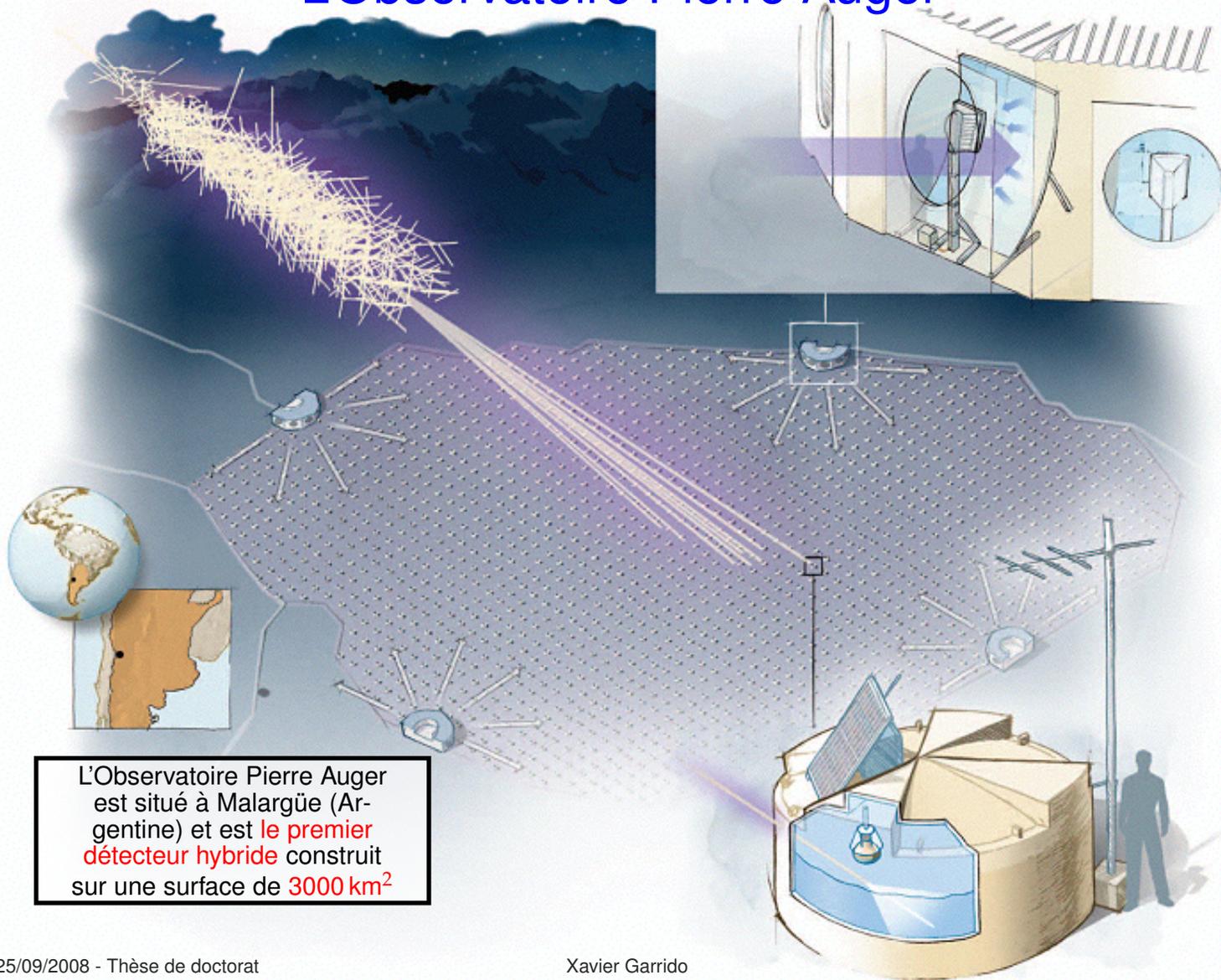
→ Particules de masse  $\gg 10^{20}$  eV

→ Défauts topologiques, reliques du Big-Bang,...

# Les rayons cosmiques d'ultra-haute énergie

- Modèles de production des RCUHEs :
  - Scenarii "bottom-up" : Accélération par des objets astrophysiques
    - Distribution des directions d'arrivées : **anisotrope**
    - Composition : **particules chargées** (protons, noyaux)
  - Scenarii "top-down" : Désintégration de particules supermassives
    - Distribution des directions d'arrivées : **isotrope**
    - Composition : **particules légères** (photons  $\gamma$ , neutrinos)

# L'Observatoire Pierre Auger



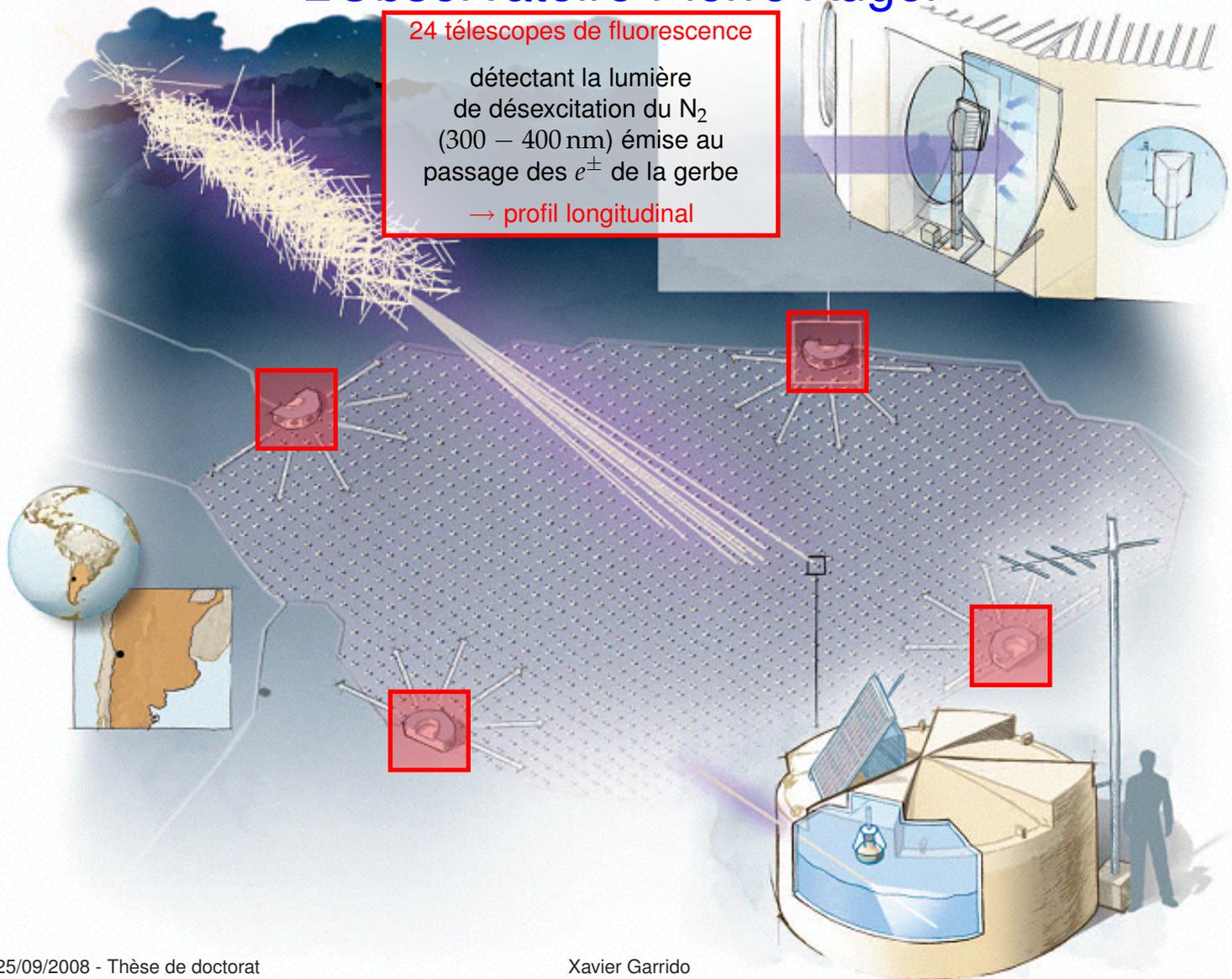
L'Observatoire Pierre Auger est situé à Malargüe (Argentine) et est le **premier détecteur hybride** construit sur une surface de **3000 km<sup>2</sup>**

# L'Observatoire Pierre Auger

24 télescopes de fluorescence

déteçant la lumière  
de désexcitation du  $N_2$   
(300 – 400 nm) émise au  
passage des  $e^\pm$  de la gerbe

→ profil longitudinal

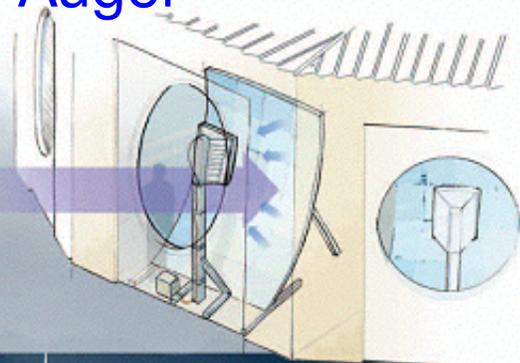


# L'Observatoire Pierre Auger

24 télescopes de fluorescence

détequant la lumière  
de désexcitation du  $N_2$   
(300 – 400 nm) émise au  
passage des  $e^\pm$  de la gerbe

→ profil longitudinal

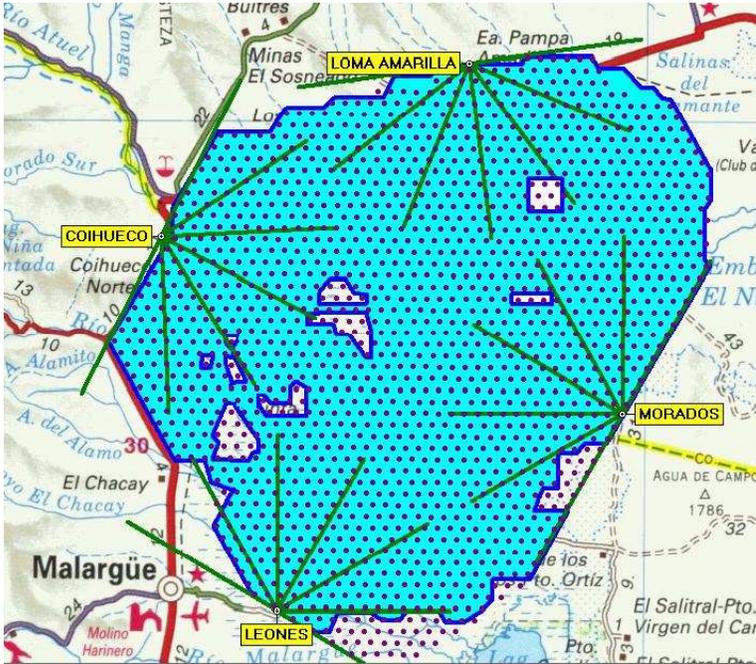


1600 cuves d'eau placées à  
1500 m les unes des autres  
et chargées de détecter les  
particules secondaires via la  
production de lumière Cherenkov

→ profil latéral



# L'Observatoire Pierre Auger



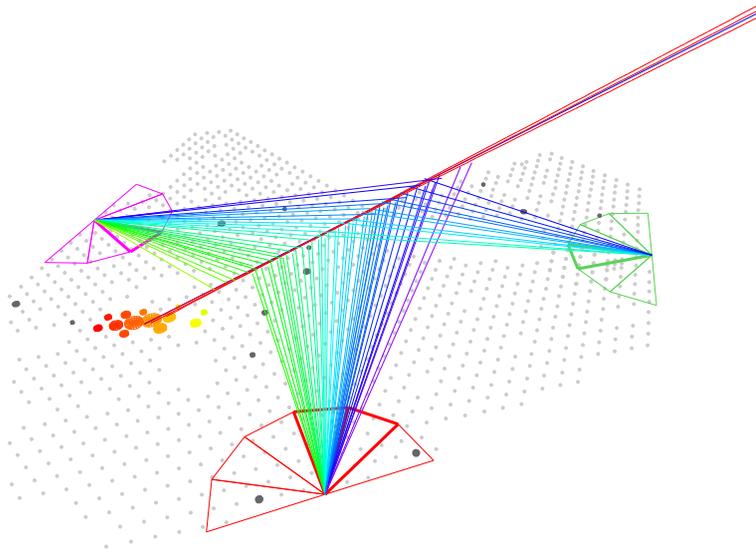
- Mesures hybrides : Calibration SD/FD

$$\text{Signal(SD)} \iff E_{\text{calo.}}(\text{FD})$$

- Acceptance du détecteur

$$E \geq 3 \cdot 10^{18} \text{ eV} \implies \mathcal{A} = S_{\text{géo.}}(\text{SD})$$

# L'Observatoire Pierre Auger

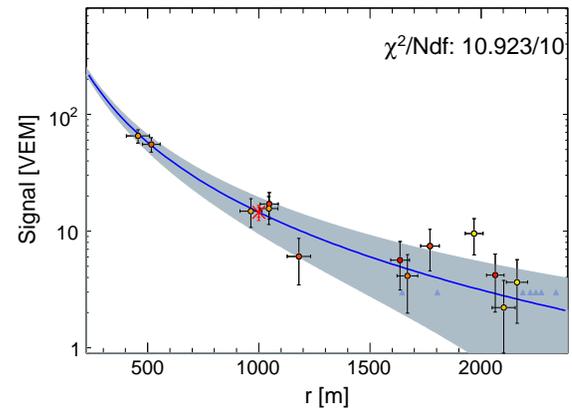
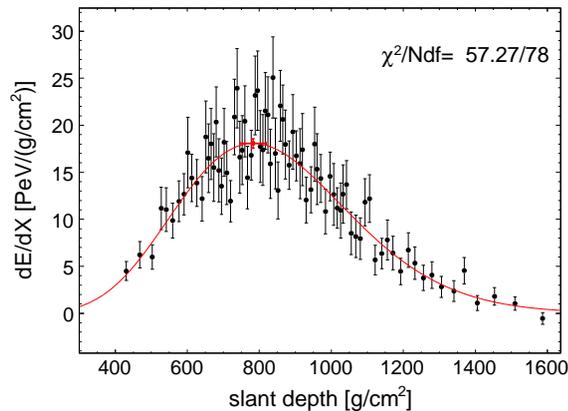


- Mesures hybrides : Calibration SD/FD

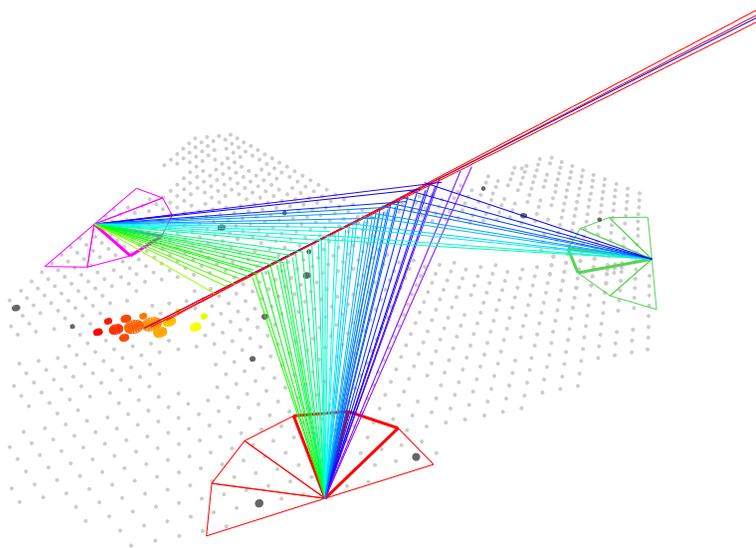
$$\text{Signal(SD)} \iff E_{\text{calo.}}(\text{FD})$$

- Acceptance du détecteur

$$E \geq 3 \cdot 10^{18} \text{ eV} \implies \mathcal{A} = S_{\text{géo.}}(\text{SD})$$



# L'Observatoire Pierre Auger



- Mesures hybrides : Calibration SD/FD

$$\text{Signal(SD)} \iff E_{\text{calo.}}(\text{FD})$$

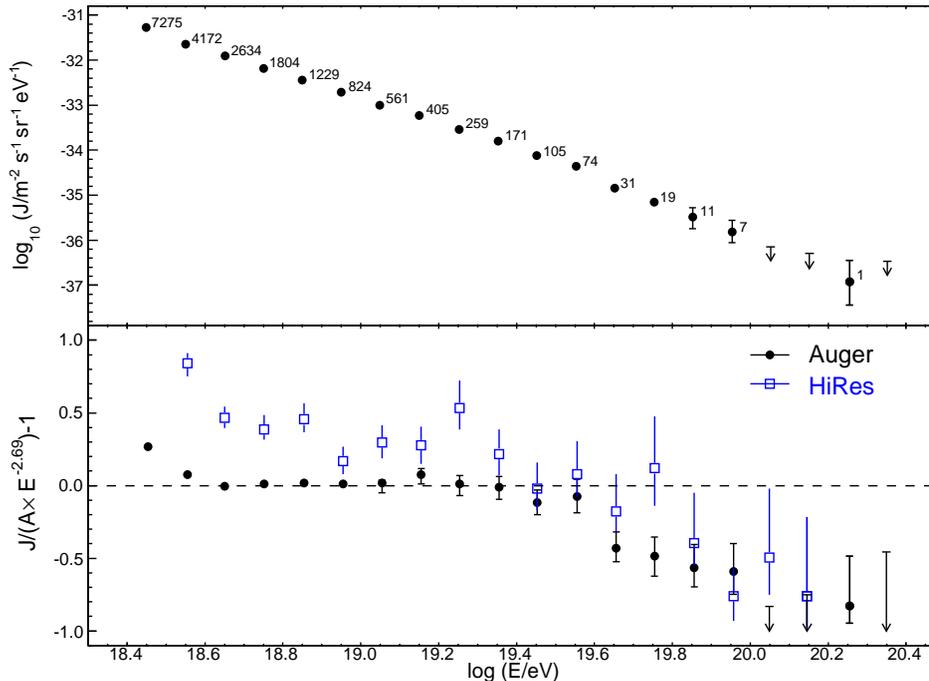
- Acceptance du détecteur

$$E \geq 3 \cdot 10^{18} \text{ eV} \implies \mathcal{A} = S_{\text{géo.}}(\text{SD})$$

Expérience	Statut	km <sup>2</sup> sr yr @ 50 EeV	# événements		résolution	
			> 10 EeV	> 50 EeV	$\sigma_{\theta}$	$\sigma_E/E$
AGASA	1993-2005	1620	886	46	1.6°	30%
HiRes I mono	1997-2006	~ 4500	561	31	~ 5°	20%
<b>Auger</b>	<b>2004-présent</b>	<b>&gt; 7000</b>	<b>1644</b>	<b>38</b>	<b>≲ 1.5°</b>	<b>22%</b>

# L'Observatoire Pierre Auger : principaux résultats

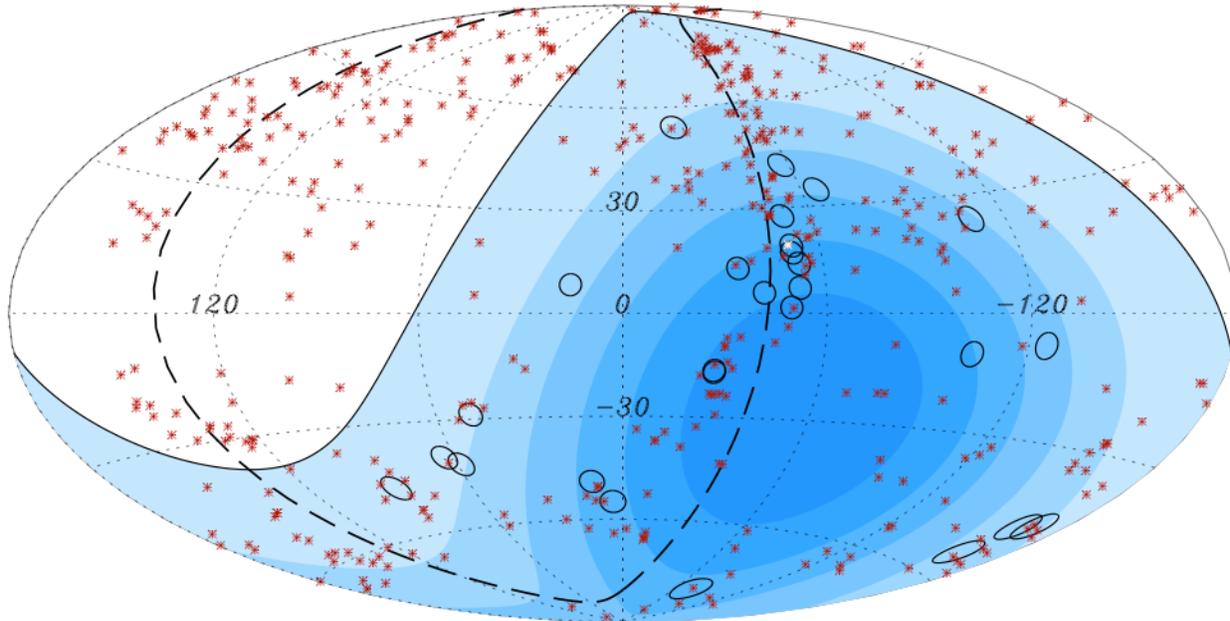
- Étude du spectre en énergie



- un comportement en loi de puissance d'indice spectral  $-2.69$  est **rejeté au-delà de  $4 \cdot 10^{19}$  eV** avec une significativité de  $6\sigma$   
**MAIS** le spectre à lui seul ne peut confirmer l'effet GZK(proton)

# L'Observatoire Pierre Auger : principaux résultats

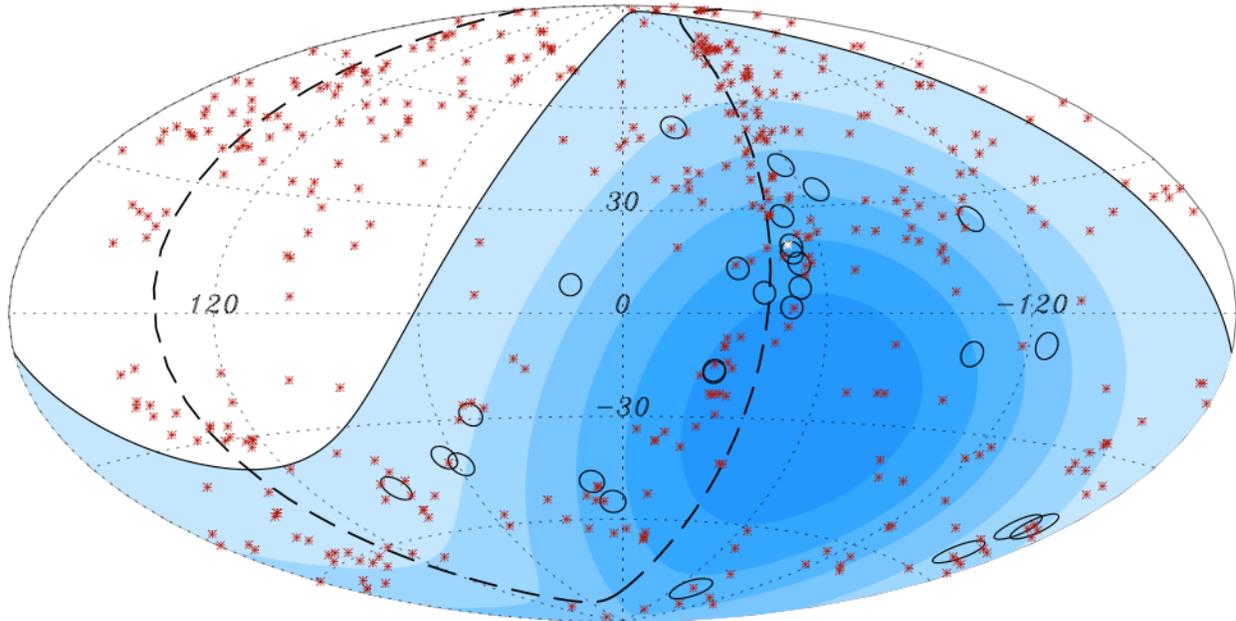
- Étude des directions d'arrivées



Projection des directions d'arrivées des 27 événements d'énergie supérieure à 57 EeV  
○ gerbes détectées — \* positions de 472 NAGs proches ( $d \leq 75$  Mpc)

# L'Observatoire Pierre Auger : principaux résultats

- Étude des directions d'arrivées



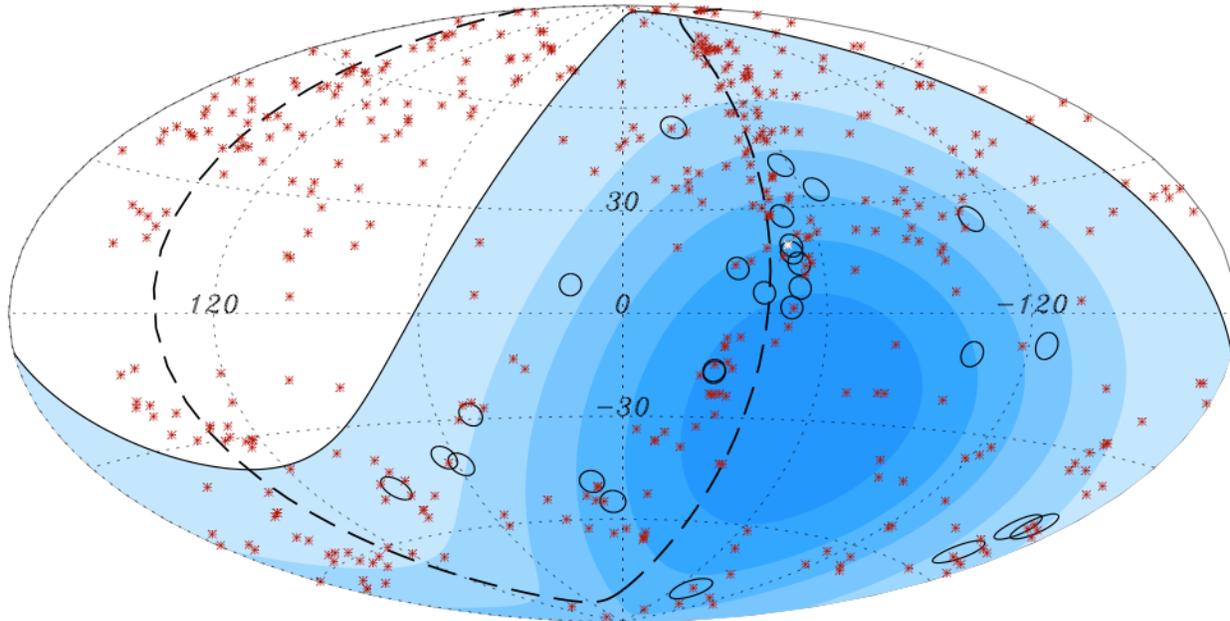
Projection des directions d'arrivées des 27 événements d'énergie supérieure à 57 EeV

○ gerbes détectées — \* positions de 472 NAGs proches ( $d \leq 75$  Mpc)

→ 20 événements sur 27 sont situés à moins de  $\psi = 3.1^\circ$  de la position d'un NAG

# L'Observatoire Pierre Auger : principaux résultats

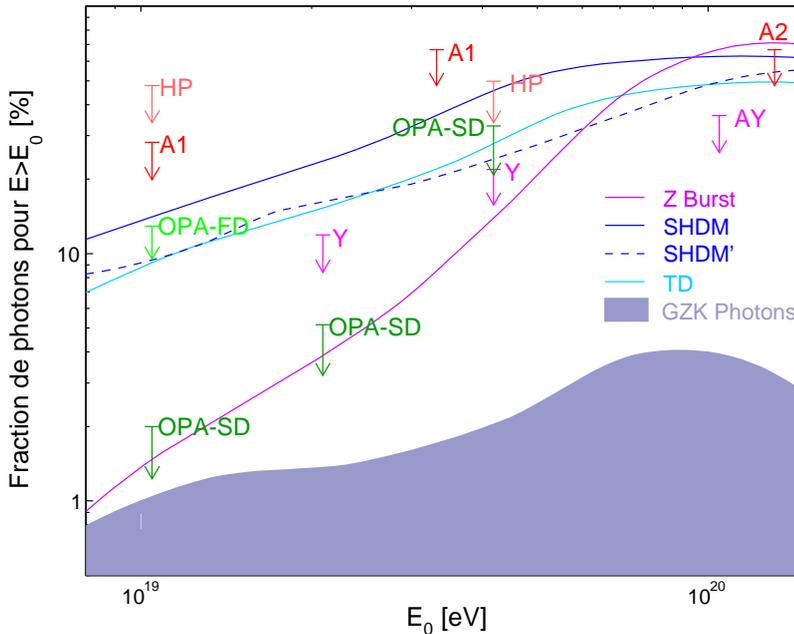
- Étude des directions d'arrivées



- les sources sont majoritairement **extra-galactiques**
- le rayonnement cosmique au-delà de 57 EeV est **anisotrope** (indépendamment de la corrélation)
- les noyaux actifs de galaxie sont des **candidats potentiels**  
→ **identification des sources et de leurs caractéristiques nécessite plus de données**

# L'Observatoire Pierre Auger : principaux résultats

- Limites sur le flux de photons et de neutrinos primaires

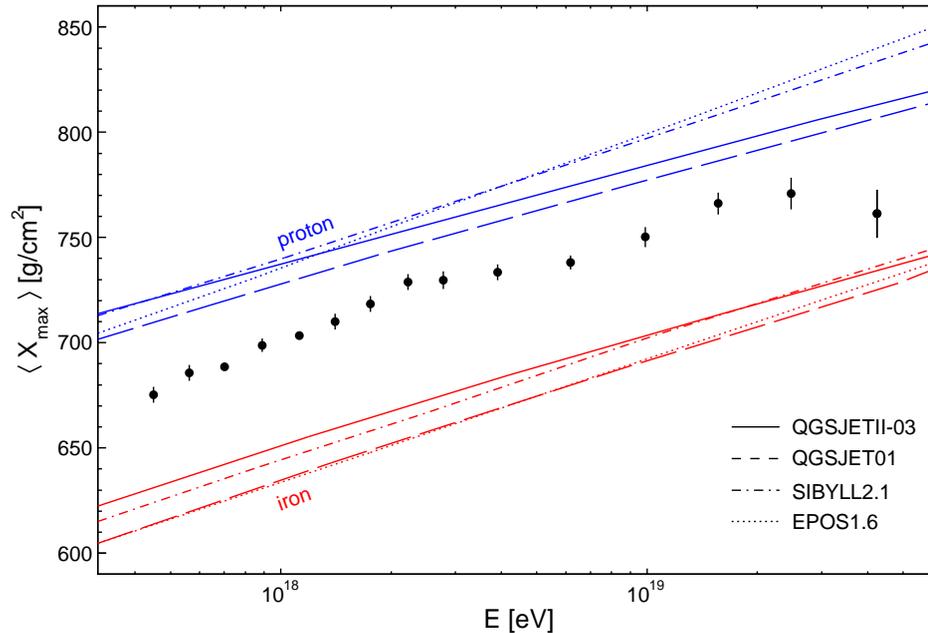


- les limites sur le flux de photons et de neutrinos posées par l'Observatoire Pierre Auger sont les **plus restrictives** à ce jour

→ ces résultats défavorisent les modèles "top-down" en particulier ceux s'appuyant sur la matière noire superlourde et les défauts topologiques

# L'Observatoire Pierre Auger : principaux résultats

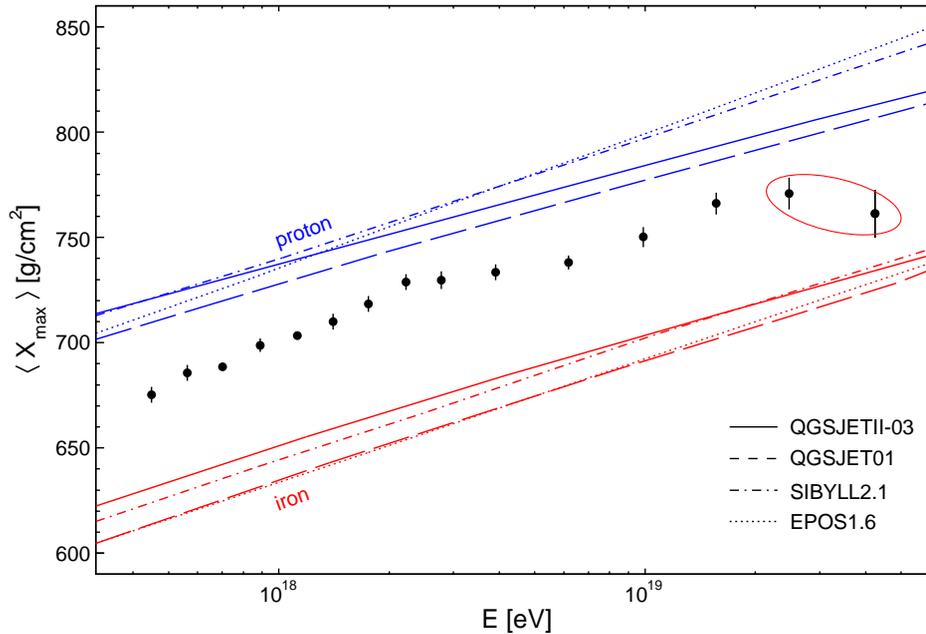
- Étude de la composition hadronique



- les études de composition déduites des paramètres FD semblent indiquer un **alourdissement** de la nature des primaires au delà de  $10^{19.2}$  eV

# L'Observatoire Pierre Auger : principaux résultats

- Étude de la composition hadronique



- les études de composition déduites des paramètres FD semblent indiquer un **alourdissement** de la nature des primaires au delà de  $10^{19.2}$  eV

# Interprétations & Problématiques

- Si le flux de RCUHEs diminue fortement autour de  $4 \cdot 10^{19}$  eV, quelle est l'origine et la nature de cette atténuation ?
  - effet GZK ? coupures successives selon la masse  $A$  ?  
spectre d'émission des sources ?

# Interprétations & Problématiques

- Si le flux de RCUHEs diminue fortement autour de  $4 \cdot 10^{19}$  eV, quelle est l'origine et la nature de cette atténuation ?
  - effet GZK ? coupures successives selon la masse  $A$  ?  
spectre d'émission des sources ?
- Dans l'hypothèse où les sources des RCUHES sont les NAGs, l'échelle  $\psi = 3.1^\circ$  de la corrélation est compatible avec les déflexions angulaires subies par des protons sous l'effet du champ magnétique Galactique
  - contradiction avec les premiers résultats sur la composition

# Interprétations & Problématiques

- Dans l'hypothèse où les sources des RCUHES sont les NAGs, l'échelle  $\psi = 3.1^\circ$  de la corrélation est compatible avec les déflexions angulaires subies par **des protons** sous l'effet du **champ magnétique Galactique**

→ **contradiction avec les premiers résultats sur la composition**

- **Hypothèses de travail**

1) l'interprétation de la corrélation *i.e.* NAG  $\equiv$  source est **incorrecte**  
     $\rightsquigarrow$  **augmentation de la statistique**

# Interprétations & Problématiques

- Dans l'hypothèse où les sources des RCUHES sont les NAGs, l'échelle  $\psi = 3.1^\circ$  de la corrélation est compatible avec les déflexions angulaires subies par **des protons** sous l'effet du **champ magnétique Galactique**

→ **contradiction avec les premiers résultats sur la composition**

- **Hypothèses de travail**

1) l'interprétation de la corrélation *i.e.* NAG  $\equiv$  source est **incorrecte**

↪ **augmentation de la statistique**

2) **la corrélation existe** mais l'intensité du champ magnétique Galactique est **surestimée**

↪ **les rayons cosmiques sont éventuellement des noyaux lourds**

# Interprétations & Problématiques

- Dans l'hypothèse où les sources des RCUHES sont les NAGs, l'échelle  $\psi = 3.1^\circ$  de la corrélation est compatible avec les déflexions angulaires subies par **des protons** sous l'effet du **champ magnétique Galactique**

→ **contradiction avec les premiers résultats sur la composition**

- **Hypothèses de travail**

1) l'interprétation de la corrélation *i.e.* NAG  $\equiv$  source est **incorrecte**

↪ **augmentation de la statistique**

2) **la corrélation existe** mais l'intensité du champ magnétique Galactique est **surestimée**

↪ **les rayons cosmiques sont éventuellement des noyaux lourds**

3) **la corrélation existe et les particules primaires sont des protons**

↪ **la modélisation des processus hadroniques serait inexacte**

# Interprétations & Problématiques

- Dans l'hypothèse où les sources des RCUHES sont les NAGs, l'échelle  $\psi = 3.1^\circ$  de la corrélation est compatible avec les déflexions angulaires subies par **des protons** sous l'effet du **champ magnétique Galactique**

→ **contradiction avec les premiers résultats sur la composition**

- **Hypothèses de travail**

1) l'interprétation de la corrélation *i.e.* NAG  $\equiv$  source est **incorrecte**

↪ **augmentation de la statistique**

2) **la corrélation existe** mais l'intensité du champ magnétique Galactique est **surestimée**

↪ **les rayons cosmiques sont éventuellement des noyaux lourds**

3) **la corrélation existe et les particules primaires sont des protons**

↪ **la modélisation des processus hadroniques serait inexacte**

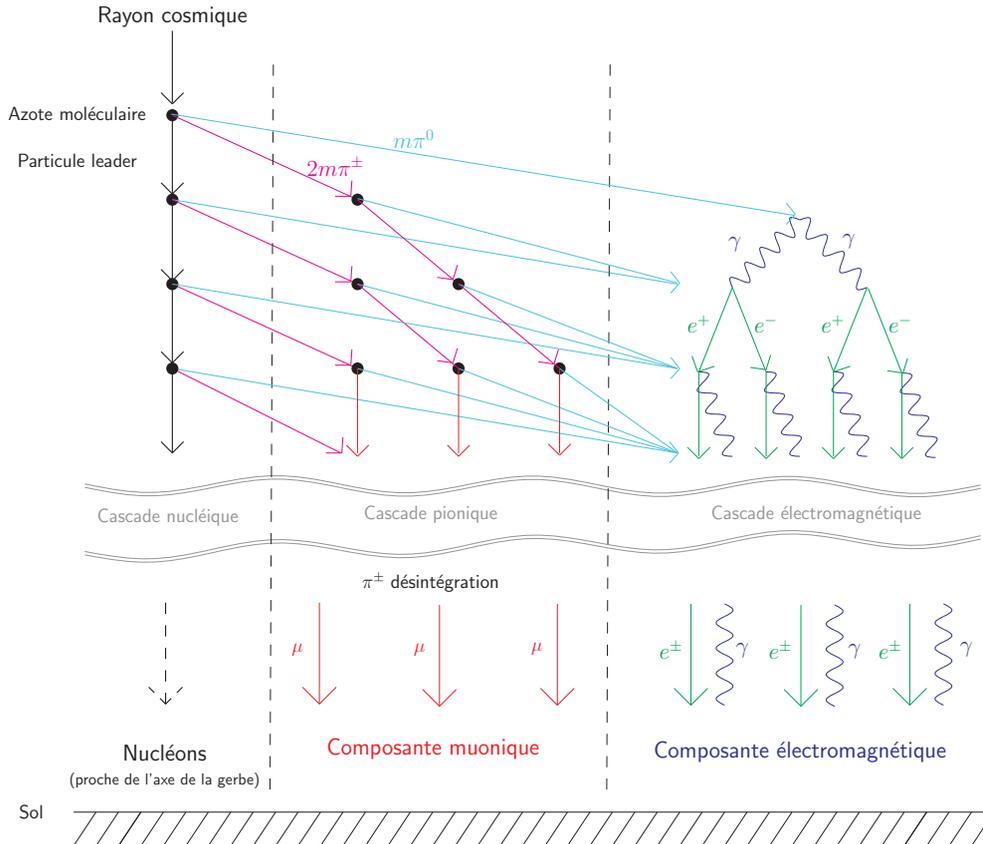
⇒ **analyse des mécanismes hadroniques & étude de la composition**

# Plan de l'exposé

- Problématiques liées aux RCUHEs
- L'Observatoire Pierre Auger : un détecteur hybride
- Étude de la composition des gerbes : **comptage des muons**
  - Motivation
  - Principe de "la méthode des sauts"
  - Résultats sur la composition & interprétations
- Mesure de **la section efficace rayon cosmique-air**
- Conclusions et perspectives

# Motivation

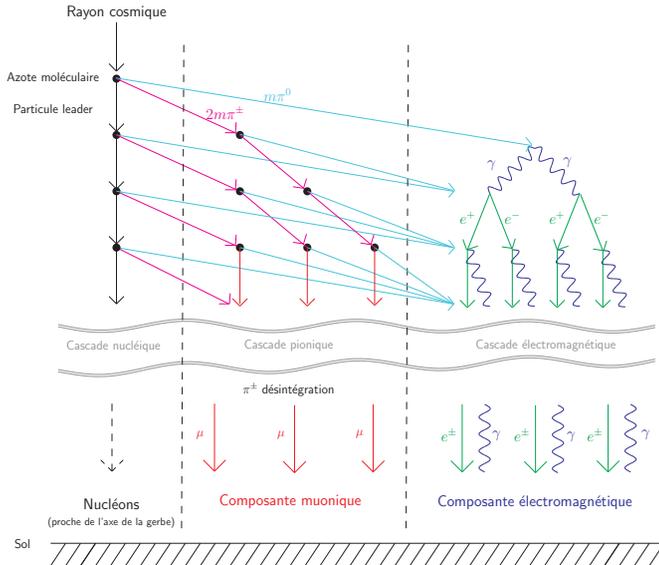
- Développement d'une gerbe atmosphérique



- Composante électromagnétique  $e^\pm, \gamma$  résultant de la désintégration des  $\pi$  neutres
- Composante muonique résultant de la désintégration des  $\pi$  chargés

# Motivation

## ● Développement d'une gerbe atmosphérique



### ● La composante muonique comme estimateur de la composition

- pour des **primaires photons**  $\gamma$ , la gerbe est principalement EM

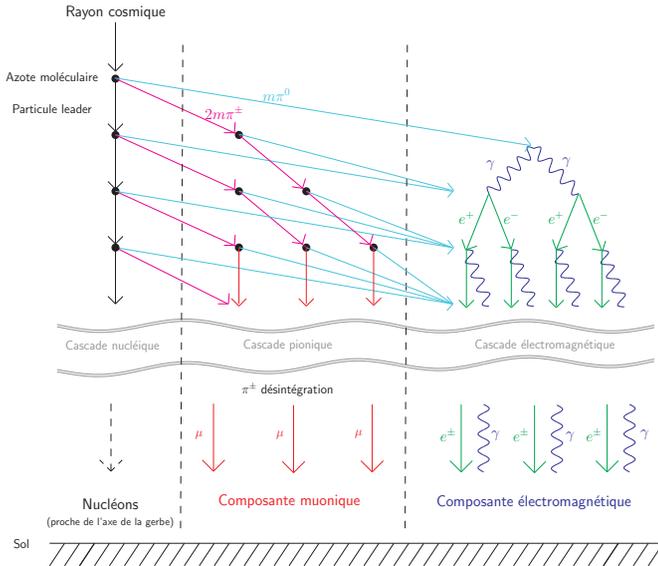
- pour des **primaires hadroniques**, le nombre de muons  $N_\mu \propto E^{0.93}$

$$\frac{N_\mu(A, Z, X)}{N_\mu(p)} = \frac{A \cdot (E/A)^{0.93}}{E^{0.93}} = A^{0.07}$$

→ en moyenne, 40% de muons de plus pour un noyau de fer / un proton

# Motivation

## ● Développement d'une gerbe atmosphérique



### ● La composante muonique comme estimateur de la composition

- pour des **primaires photons**  $\gamma$ , la gerbe est principalement EM

- pour des **primaires hadroniques**, le nombre de muons  $N_\mu \propto E^{0.93}$

$$\frac{N_\mu(A, Z, X)}{N_\mu(p)} = \frac{A \cdot (E/A)^{0.93}}{E^{0.93}} = A^{0.07}$$

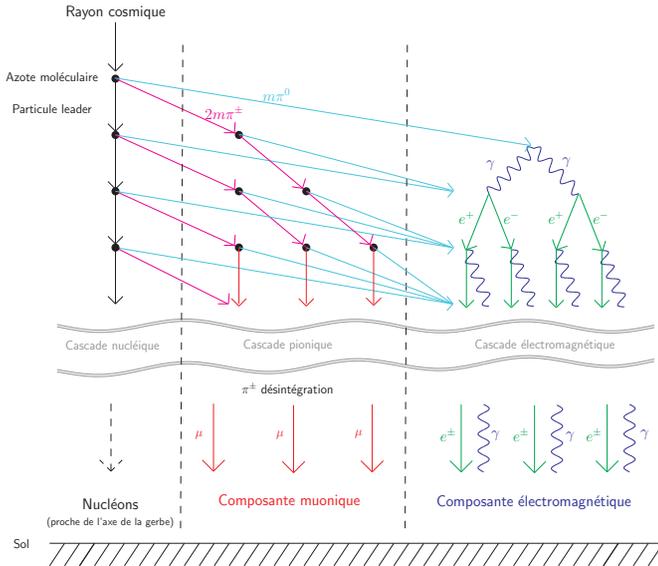
→ en moyenne, 40% de muons de plus pour un noyau de fer / un proton

### ● La composante muonique comme indicateur du développement hadronique de la gerbe

- étant donné que les muons résultent de l'ultime interaction  $\pi^\pm - \text{air}$ , leur production est sensible aux paramètres hadroniques tels que la **multiplicité** ou l'**inélasticité** des interactions

# Motivation

## ● Développement d'une gerbe atmosphérique



## ● La composante muonique comme estimateur de la composition

- pour des **primaires photons**  $\gamma$ , la gerbe est principalement EM

- pour des **primaires hadroniques**, le nombre de muons  $N_\mu \propto E^{0.93}$

$$\frac{N_\mu(A, Z, X)}{N_\mu(p)} = \frac{A \cdot (E/A)^{0.93}}{E^{0.93}} = A^{0.07}$$

→ en moyenne, 40% de muons de plus pour un noyau de fer / un proton

## ● La composante muonique comme indicateur du développement hadronique de la gerbe

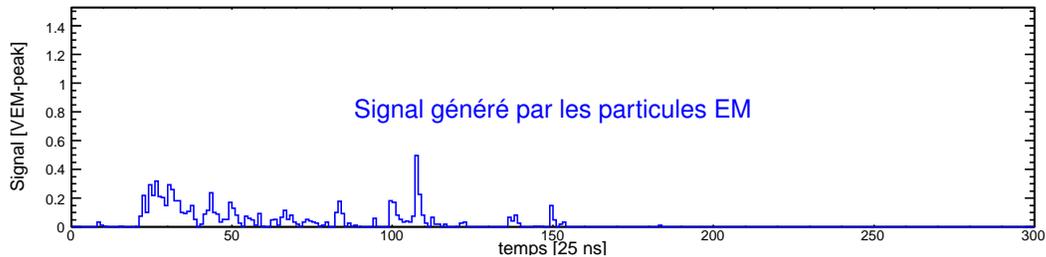
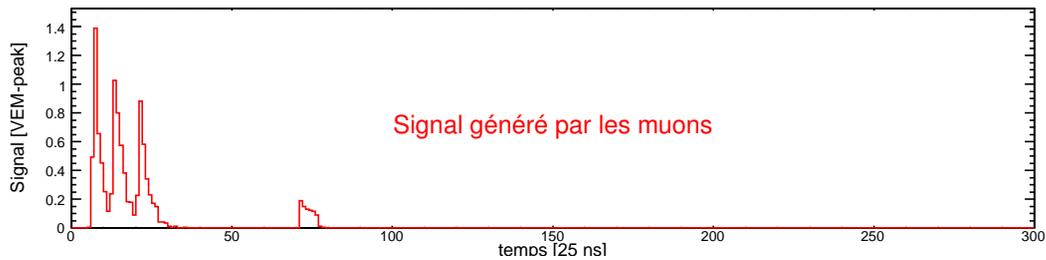
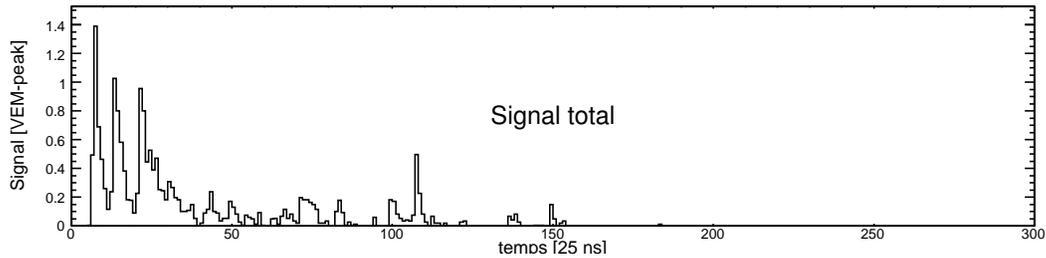
- étant donné que les muons résultent de l'ultime interaction  $\pi^\pm - \text{air}$ , leur production est sensible aux paramètres hadroniques tels que la **multiplicité** ou l'**inélasticité** des interactions

→ le signal mesuré au sein des cuves relève d'un mélange de **particules EM** résultant des premiers stades de développement de la gerbe ainsi que de muons issus de la dernière interaction

# Position du problème

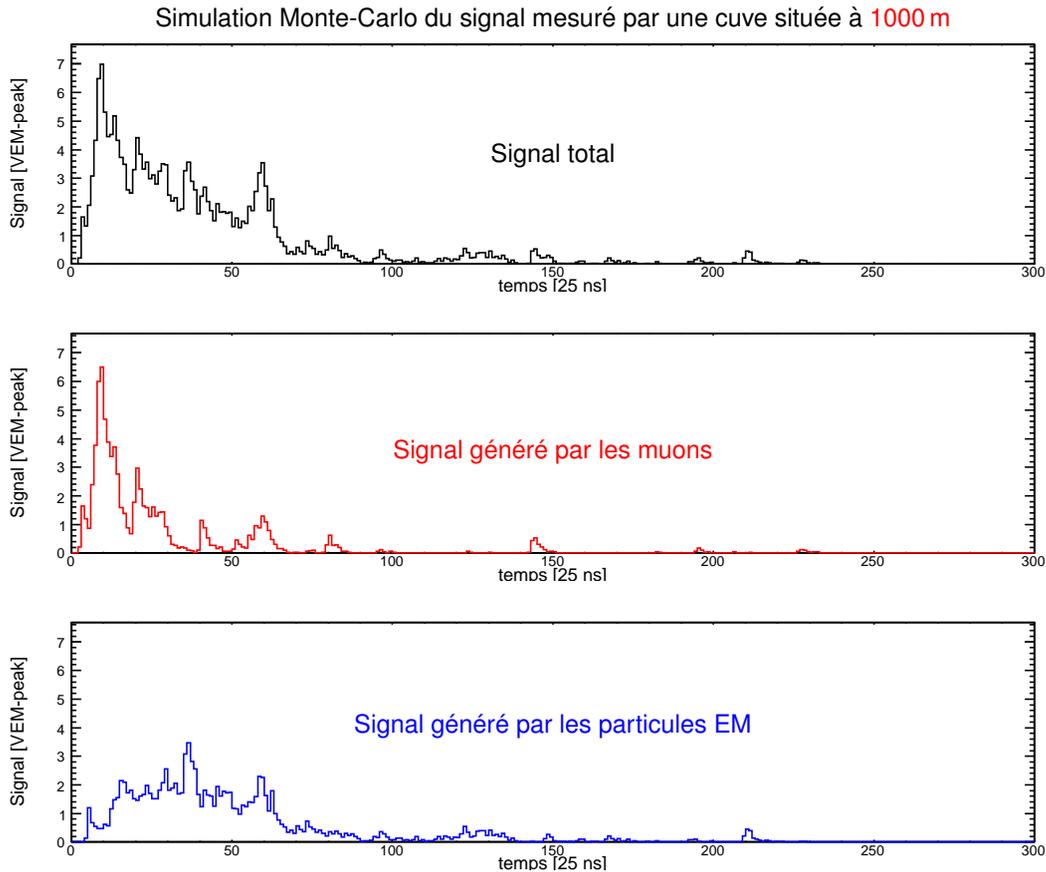
- Étude des signaux mesurés par les stations au sol

Simulation Monte-Carlo du signal mesuré par une cuve située à 1500 m



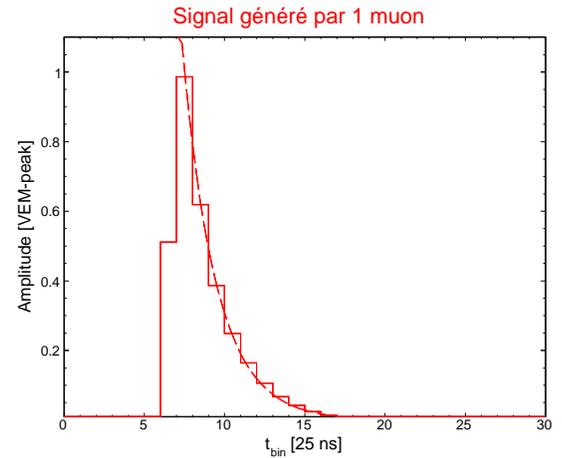
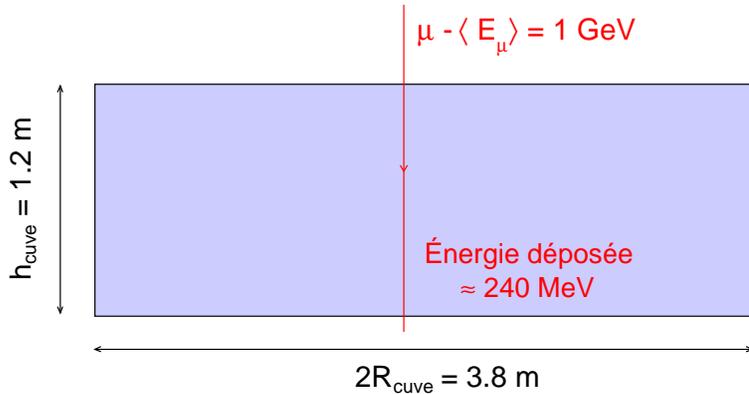
# Position du problème

- Étude des signaux mesurés par les stations au sol



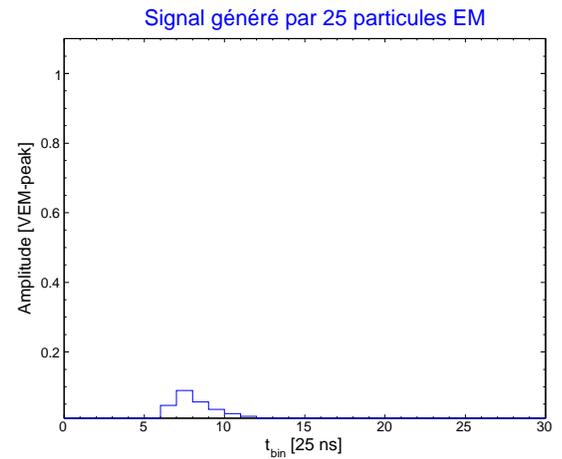
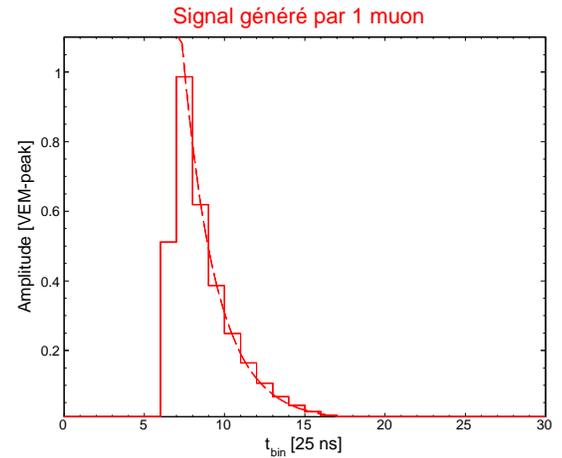
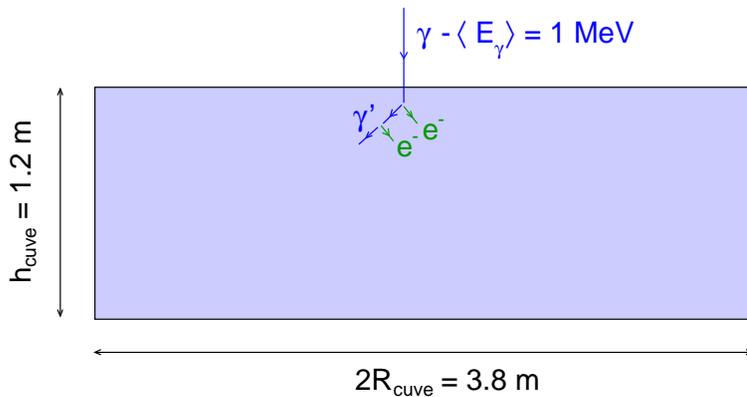
# Principe de la méthode des sauts

- Caractéristiques du signal généré par particule



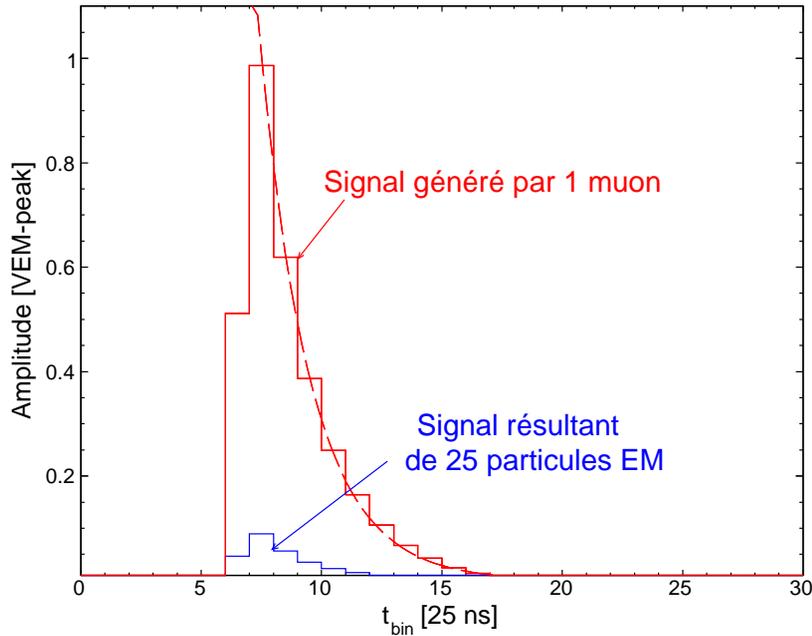
# Principe de la méthode des sauts

- Caractéristiques du signal généré par particule



# Principe de la méthode des sauts

- Caractéristiques du signal généré par particule



- de par leurs distributions respectives en énergie

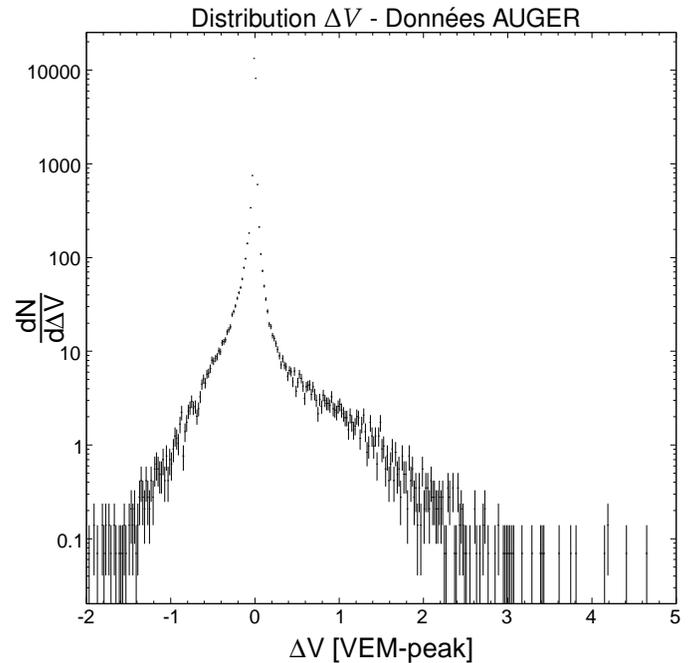
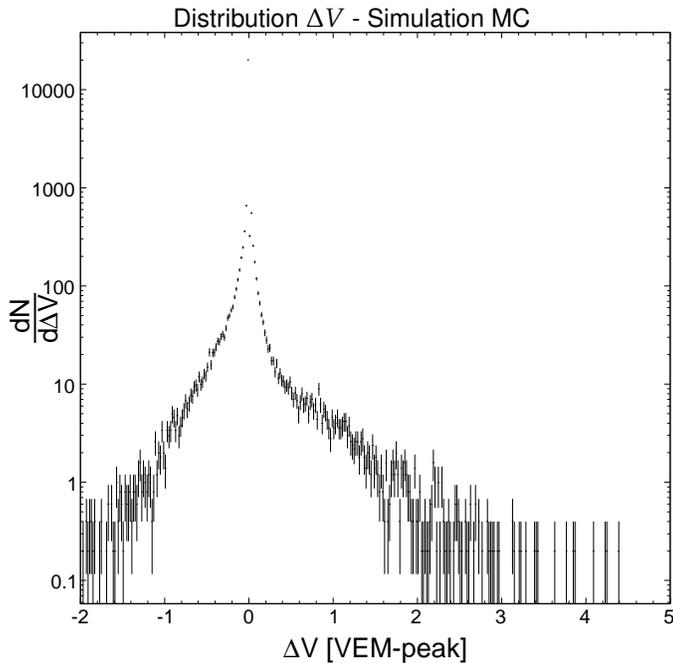
↪ les muons génèrent, en moyenne, des signaux plus intenses

↪ les particules EM, bien que plus nombreuses, se comportent comme un fond diffus

# Principe de la méthode des sauts

- La méthode des sauts
  - En chaque temps  $t_i$ , nous évaluons la dérivée  $\Delta V$  du signal définie selon

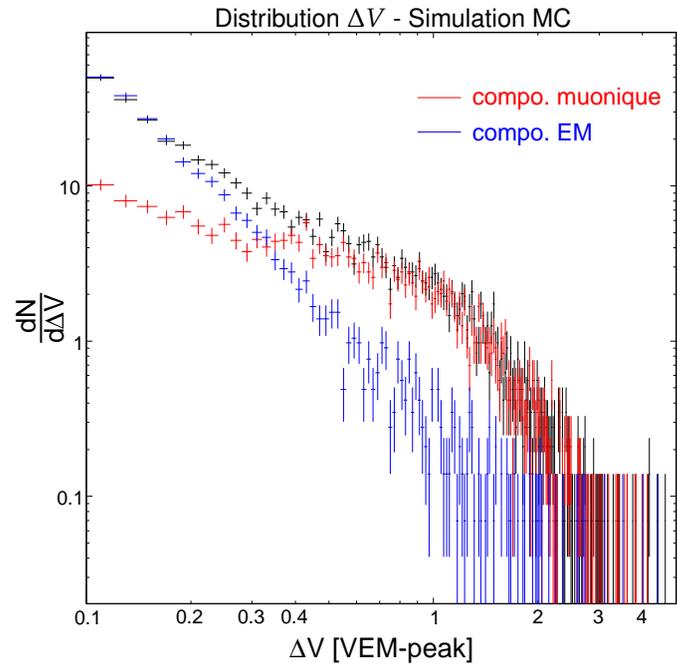
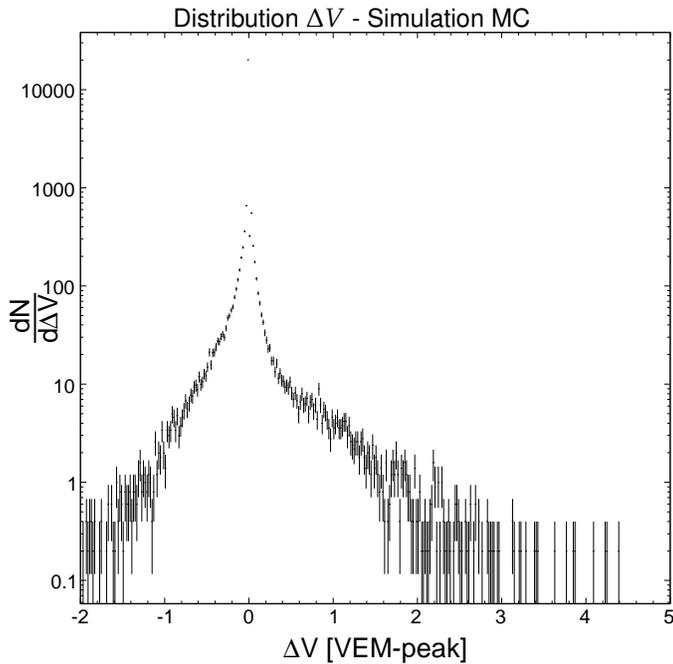
$$\Delta V(t_i) = V(t_{i+1}) - V(t_i)$$



# Principe de la méthode des sauts

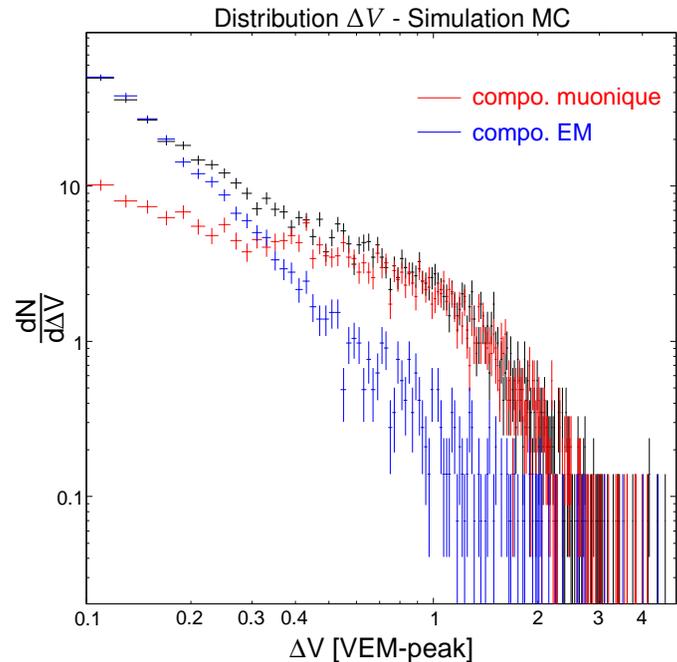
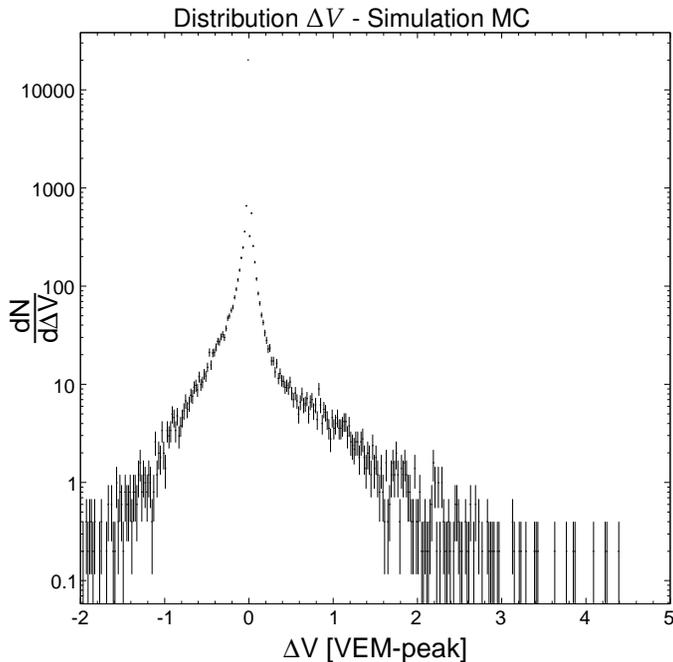
- La méthode des sauts
  - En chaque temps  $t_i$ , nous évaluons la dérivée  $\Delta V$  du signal définie selon

$$\Delta V(t_i) = V(t_{i+1}) - V(t_i)$$



# Principe de la méthode des sauts

- La méthode des sauts
  - L'asymétrie du profil, mise en évidence à la fois sur les données et sur la simulation, est portée par la composante muonique
  - La quantité  $\Delta V$  se révèle donc un estimateur sensible à la composante muonique



# Détails de la méthode des sauts

- Estimation du nombre de muons dans une cuve

$$N_{\mu}^{\text{est.}}(R, \theta, E) = \eta(R, \theta, E) \times \underbrace{\sum_{\Delta V \geq \Delta V_{\text{th.}}} \Delta V(t_i)}_{\text{mesuré dans la cuve}}$$

# Détails de la méthode des sauts

- Estimation du nombre de muons dans une cuve

$$N_{\mu}^{\text{est.}}(R, \theta, E) = \eta(R, \theta, E) \times \underbrace{\sum_{\Delta V \geq \Delta V_{\text{th.}}} \Delta V(t_i)}_{\text{mesuré dans la cuve}}$$

- Évaluation du **facteur correctif**  $\eta(R, \theta, E)$ 
  - développement d'une **approche globale** basée principalement sur **les données AUGER**
  - à **ultra-haute énergie** et **proche de l'axe de la gerbe**, utilisation de **simulations MC**

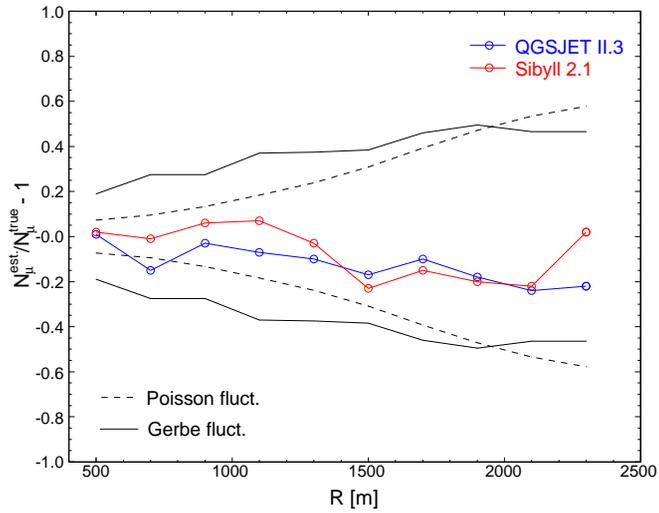
# Détails de la méthode des sauts

- Estimation du nombre de muons dans une cuve

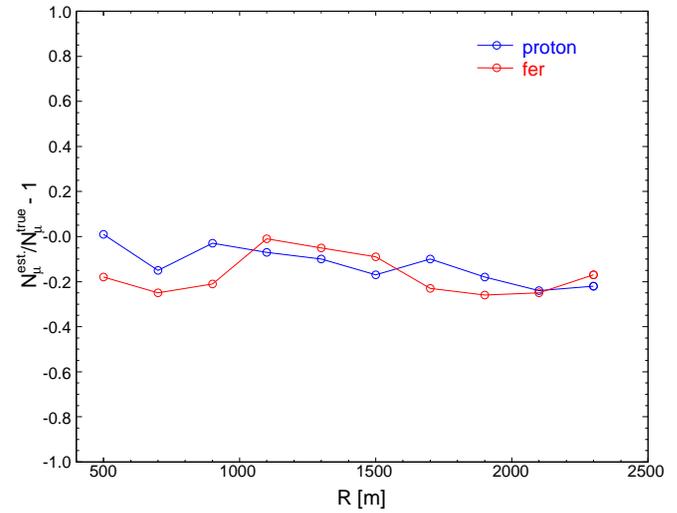
$$N_{\mu}^{\text{est.}}(R, \theta, E) = \eta(R, \theta, E) \times \underbrace{\sum_{\Delta V \geq \Delta V_{\text{th.}}} \Delta V(t_i)}_{\text{mesuré dans la cuve}}$$

- Évaluation du **facteur correctif**  $\eta(R, \theta, E)$ 
  - développement d'une **approche globale** basée principalement sur **les données AUGER**
  - à **ultra-haute énergie** et **proche de l'axe de la gerbe**, utilisation de **simulations MC**
- Détermination des **effets systématiques** et **résolution** sur le nombre de muons
  - **modèles hadroniques**, **simulateurs de cuves**, **hypothèses sur la nature du primaire**

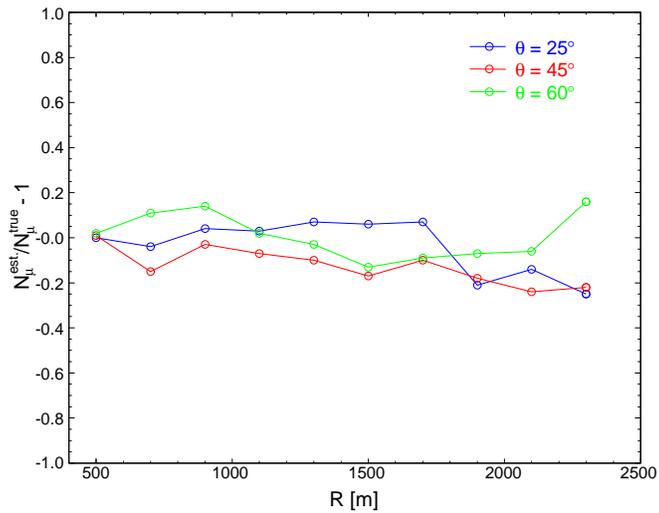
Biais - Modèles hadroniques



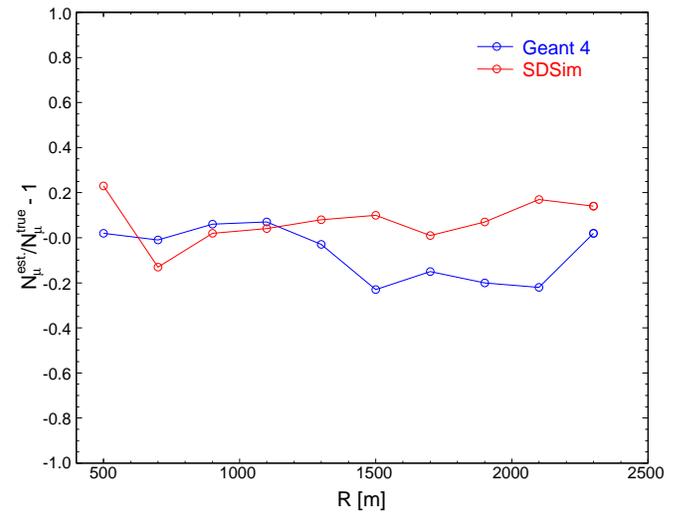
Biais - Nature primaire



Biais - Angle zénithal



Biais - Simulateur cuve



# Détails de la méthode des sauts

- Estimation du nombre de muons dans une cuve

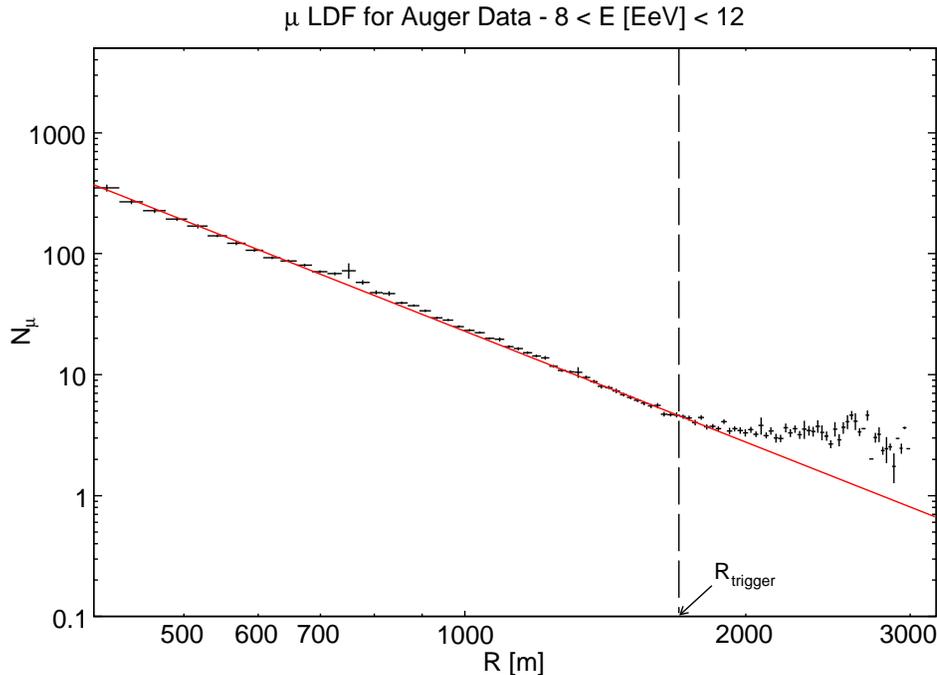
$$N_{\mu}^{\text{est.}}(R, \theta, E) = \eta(R, \theta, E) \times \underbrace{\sum_{\Delta V \geq \Delta V_{\text{th.}}} \Delta V(t_i)}_{\text{mesuré dans la cuve}}$$

- Évaluation du **facteur correctif**  $\eta(R, \theta, E)$ 
  - développement d'une **approche globale** basée principalement sur **les données AUGER**
  - à **ultra-haute énergie** et **proche de l'axe de la gerbe**, utilisation de **simulations MC**
- Détermination des **effets systématiques** et **résolution** sur le nombre de muons
  - **modèles hadroniques**, **simulateurs de cuves**, **hypothèses sur la nature du primaire**
  - résolution du même ordre de grandeur que **les fluctuations statistiques**

$$N_{\mu}^{\text{est.}}(R, E, \theta) = \eta(R, E) \times \sum_{\Delta V \geq \Delta V_{\text{th.}}} \Delta V(t_i) \pm 20\% \text{ (syst.)} \pm \sqrt{N_{\mu}^{\text{est.}}} \text{ (stat.)}$$

# Distribution latérale du nombre de muons

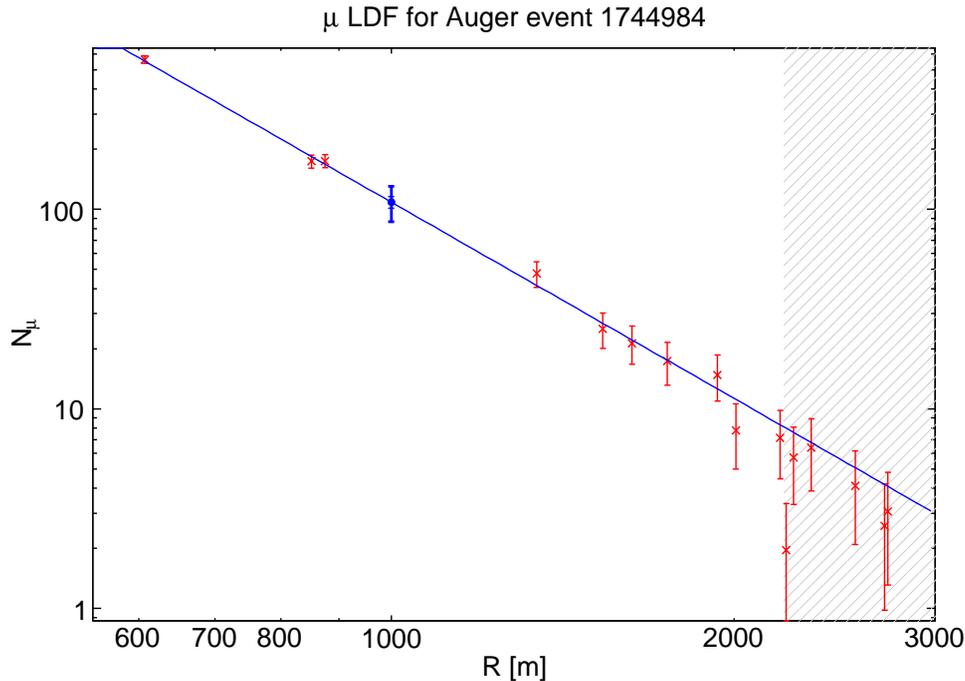
- Ajustement de la distribution latérale muonique ( $\mu$  LDF)



- les stations biaisées par le seuil de déclenchement ne sont pas prises en compte
- pour chaque événement, ajustement de la  $\mu$  LDF selon une loi de puissance  
→ détermination du nombre de muons à 1000 m

# Distribution latérale du nombre de muons

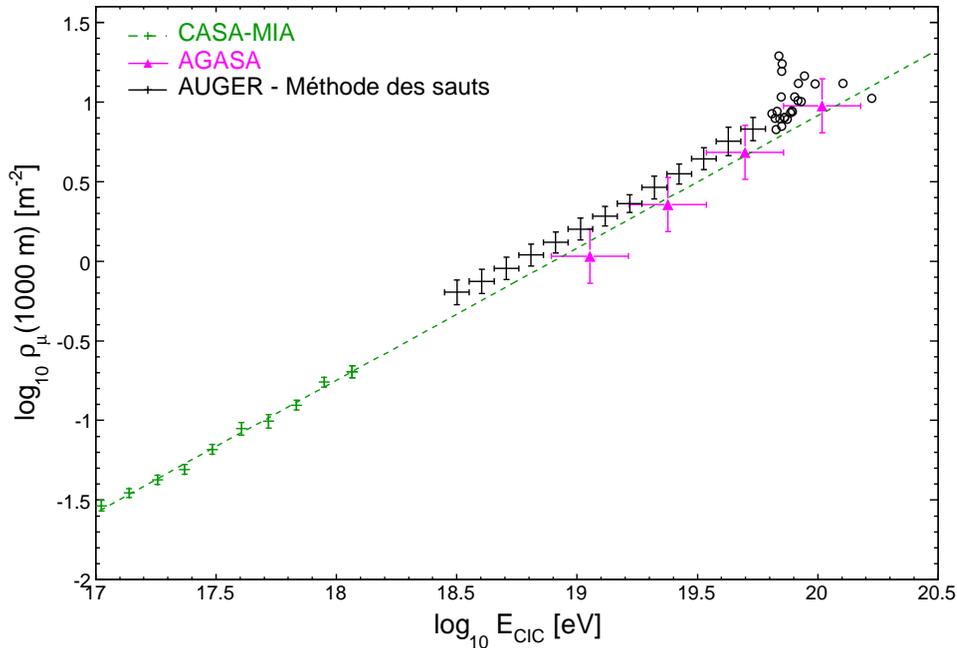
- Ajustement de la distribution latérale muonique ( $\mu$  LDF)



- les stations biaisées par le seuil de déclenchement ne sont pas prises en compte
- pour chaque événement, ajustement de la  $\mu$  LDF selon une loi de puissance  
→ détermination du nombre de muons à 1000 m

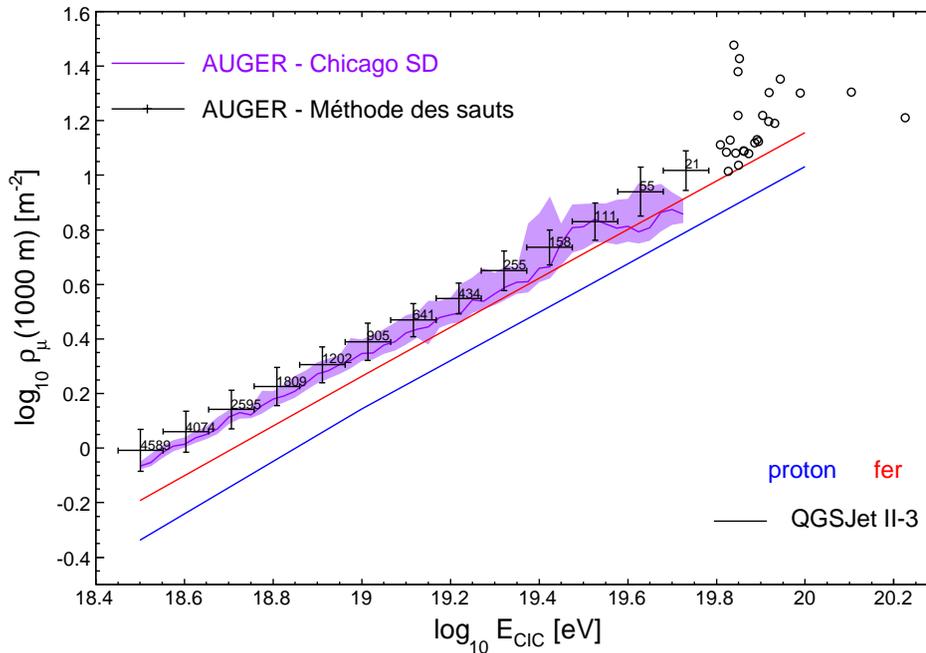
# Résultats sur la composition

- Comparaison avec les résultats des expériences AGASA et CASA-MIA
  - AGASA : 27 scintillateurs abrités sous un toit de plomb/fer :  $E_\mu \geq 500 \text{ MeV} / \cos\theta$
  - CASA-MIA : 16 scintillateurs enfouis sous 3 mètres de terre :  $E_\mu \geq 850 \text{ MeV} / \cos\theta$



# Résultats sur la composition

- Comparaison avec des études indépendantes menées au sein de l'OPA
  - Méthode de Chicago : paramétrisation du signal EM à 1000 m de l'axe de la gerbe *via* les simulations Monte-Carlo et s'appuyant sur le fait que  $S_{EM}$  varie peu / modèles hadroniques

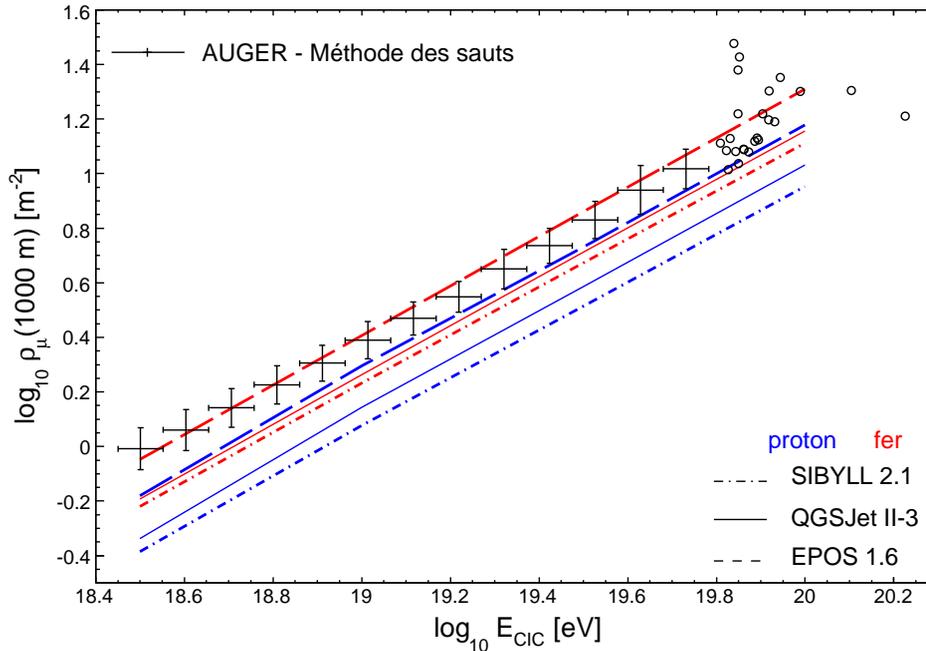


# Résultats sur la composition

- Comparaison avec les prédictions de différents modèles hadroniques
  - les différences de production muonique entre modèles relève principalement de l'estimation de **la multiplicité des interactions** (QGSJET/SIBYLL) ou de **la production de (anti)-baryons** (EPOS)

# Résultats sur la composition

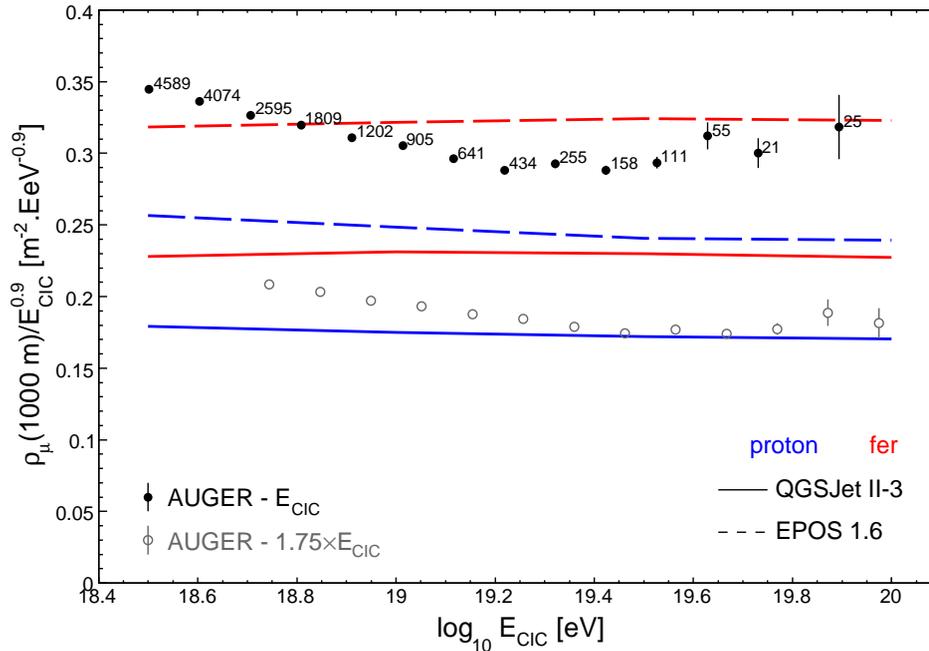
- Comparaison avec les prédictions de différents modèles hadroniques



- les résultats déduits des données de l'Observatoire Pierre Auger indiquent un excès notable de muons vis-à-vis de modèles "traditionnels" (QGSJET/SIBYLL)

# Résultats sur la composition

- Comparaison avec les prédictions de différents modèles hadroniques

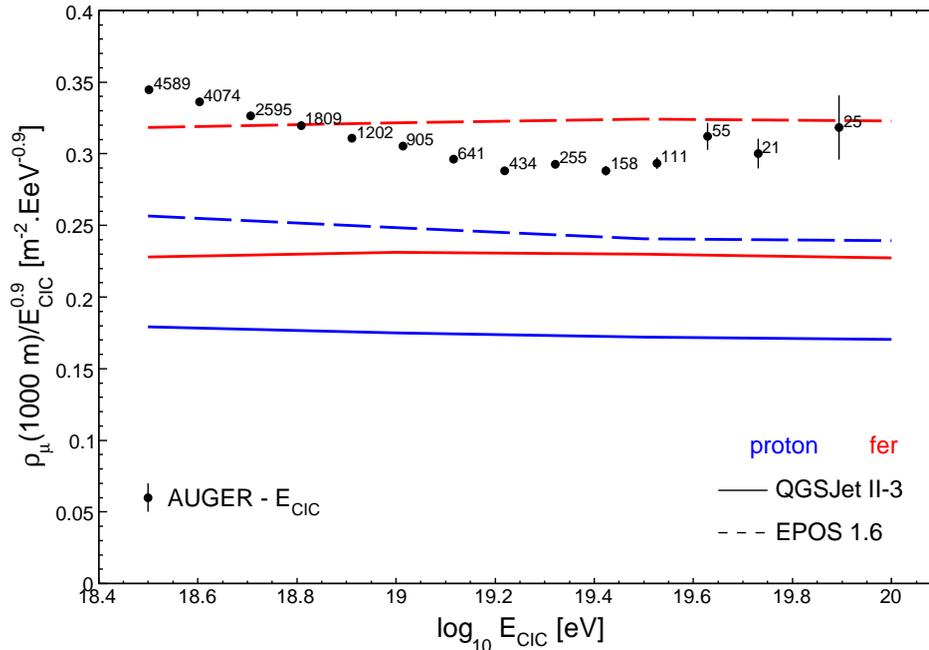


- si une éventuelle sous-estimation de l'énergie des gerbes permettrait de réduire les écarts entre données/simu., l'augmentation requise ( $\geq 50\%$ ) est toutefois au delà des incertitudes estimées pour l'énergie (22%)

# Synthèse sur l'analyse de la composition

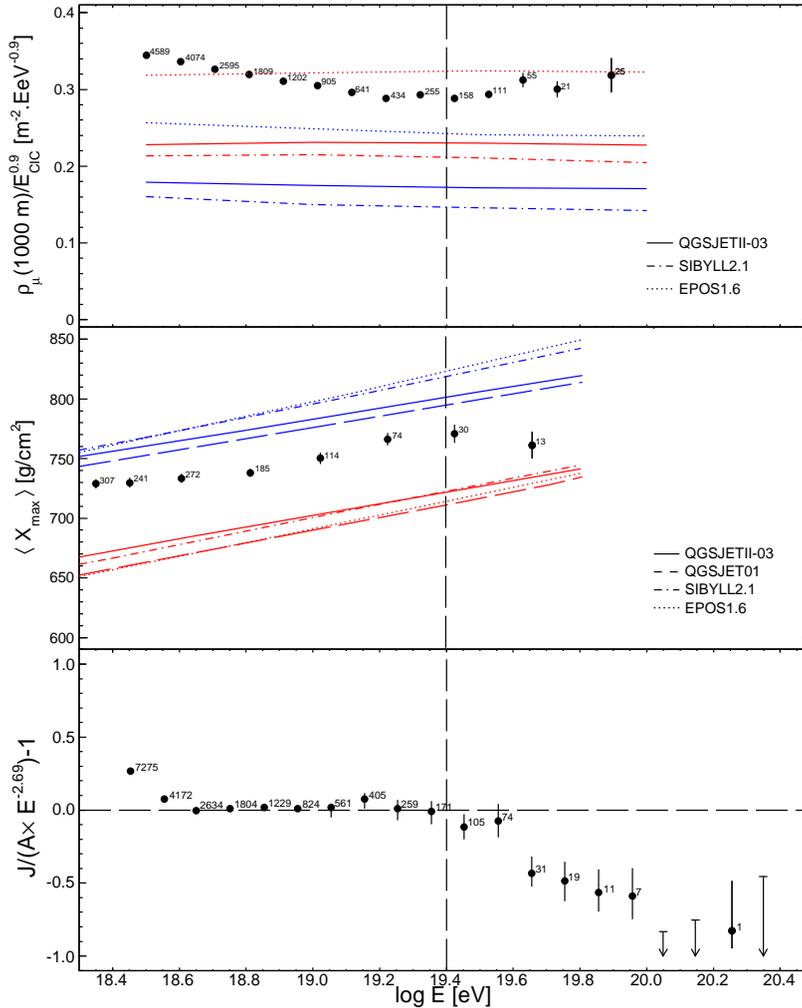
- la mesure du nombre de muons dérivée de la méthode des sauts est, aux incertitudes près, **compatible** avec **les données "scintillateurs" d'expériences antérieures et des études indépendantes menées au sein de l'OPA**
- la comparaison avec les simulations Monte-Carlo met en évidence **un excès significatif de muons** relativement aux prédictions des modèles hadroniques
- **une augmentation de l'énergie des gerbes** est toutefois **insuffisante** pour expliquer à elle seule le désaccord données/simulations  $\Rightarrow$  **un traitement plus fin des interactions hadroniques semble donc nécessaire**

# Synthèse sur l'analyse de la composition



- l'évolution du nombre de muons en fonction de l'énergie, **typiquement suivant  $E^{0.8}$** , indique vraisemblablement **une transition d'une composante lourde vers une composante plus légère dans la région 3 – 25 EeV**. Au delà, le spectre se durcit, ce qui peut traduire **le changement d'une composition légère vers une composition plus lourde**

# Synthèse sur l'analyse de la composition



→ Mesure du nombre de muons

→ Mesure de la profondeur  $X_{\text{max}}$

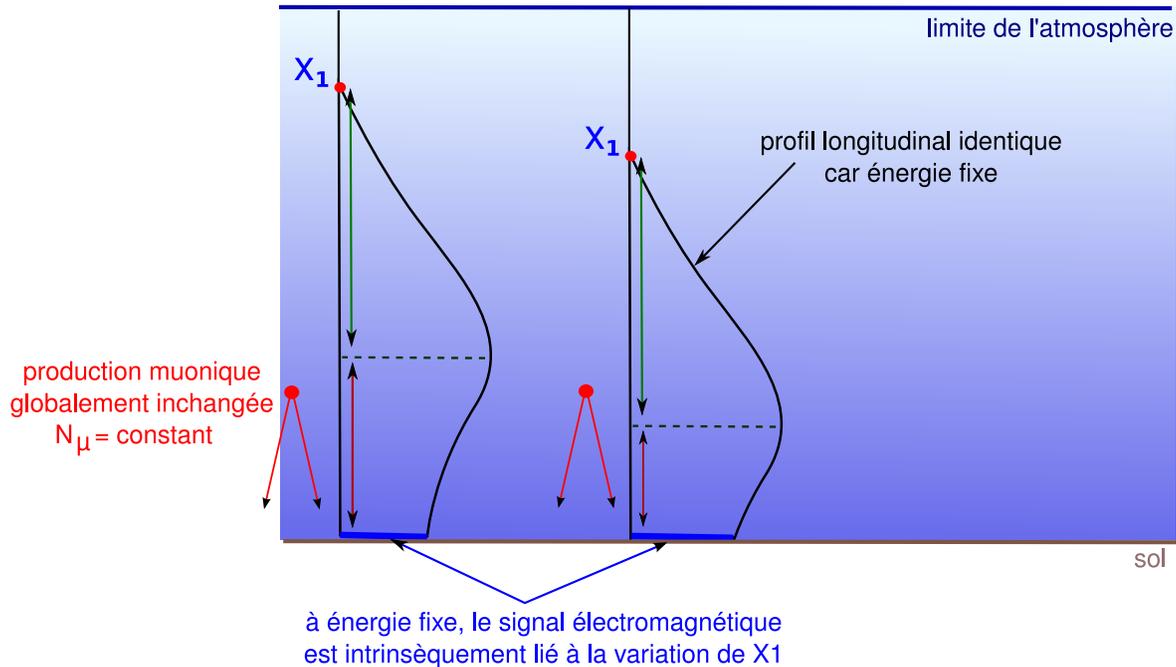
→ Mesure du flux de RCUEs

# Plan de l'exposé

- Problématiques liées aux RCUHEs
- L'Observatoire Pierre Auger : un détecteur hybride
- Étude de la composition des gerbes : comptage des muons
- Mesure de **la section efficace rayon cosmique-air**
  - Principe de la mesure & détermination de  $\sigma_{\text{RC-air}}$
- Conclusions et perspectives

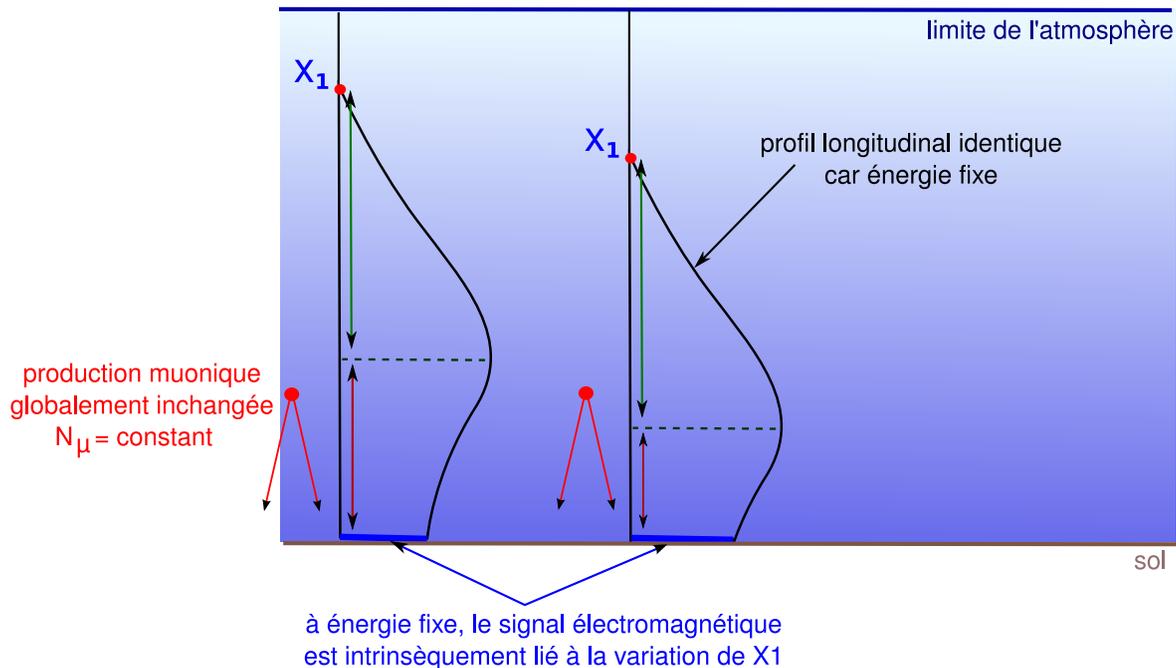
# Principe de la mesure de $\sigma_{RC-air}$

- Comparaison des signaux muonique et EM pour une énergie donnée



# Principe de la mesure de $\sigma_{RC-air}$

- Comparaison des signaux muonique et EM pour une énergie donnée

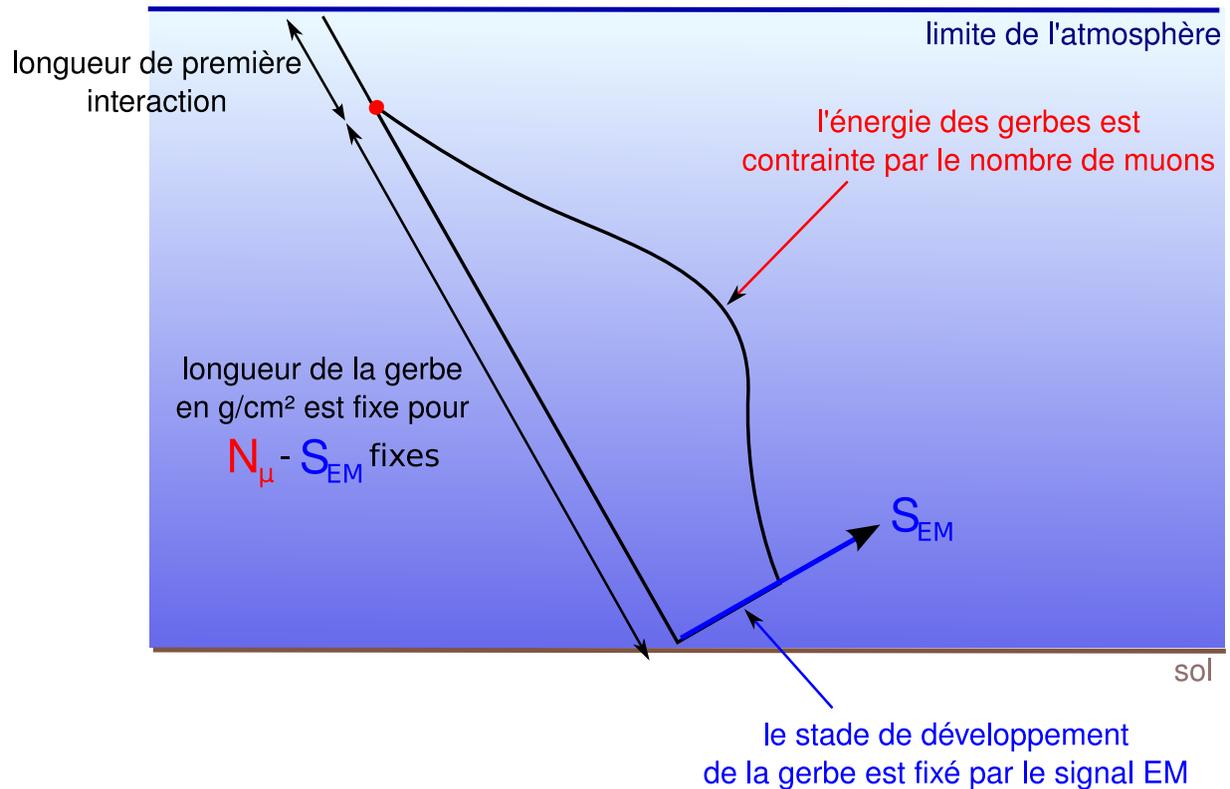


↪ le signal EM, intrinsèquement lié à la longueur de première interaction, définit l'âge de la gerbe

↪ le nombre de muons est relativement insensible à la variation de  $X_1$  : estimateur de l'énergie

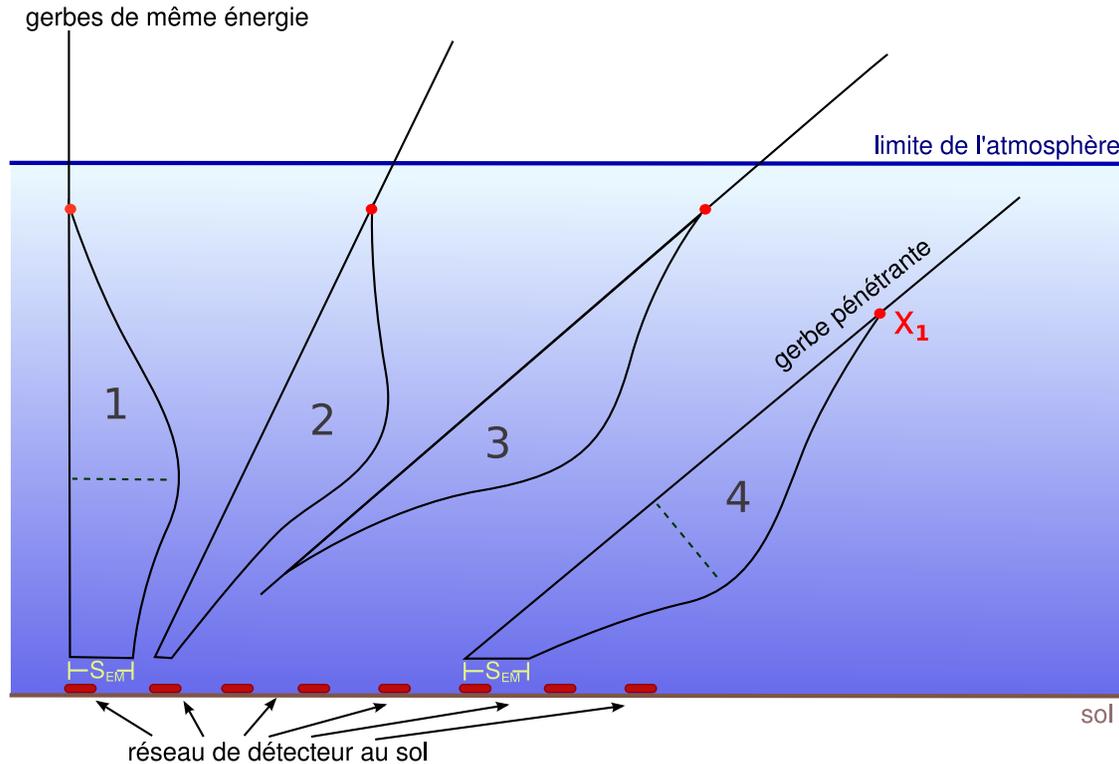
# Principe de la mesure de $\sigma_{RC-air}$

- Comparaison des signaux muonique et EM pour une énergie donnée



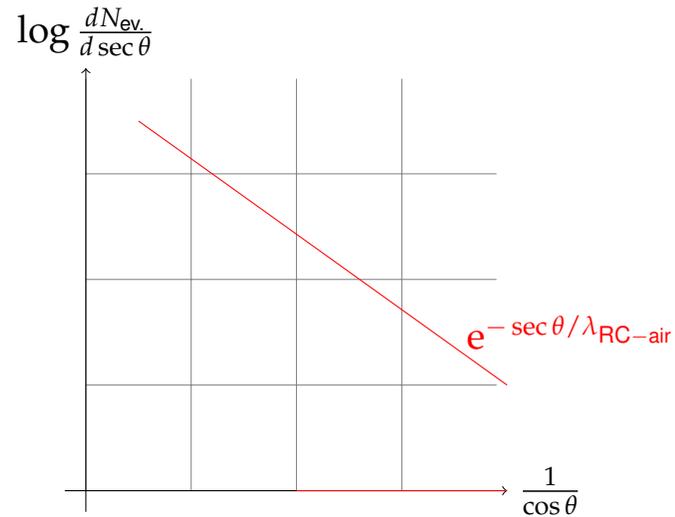
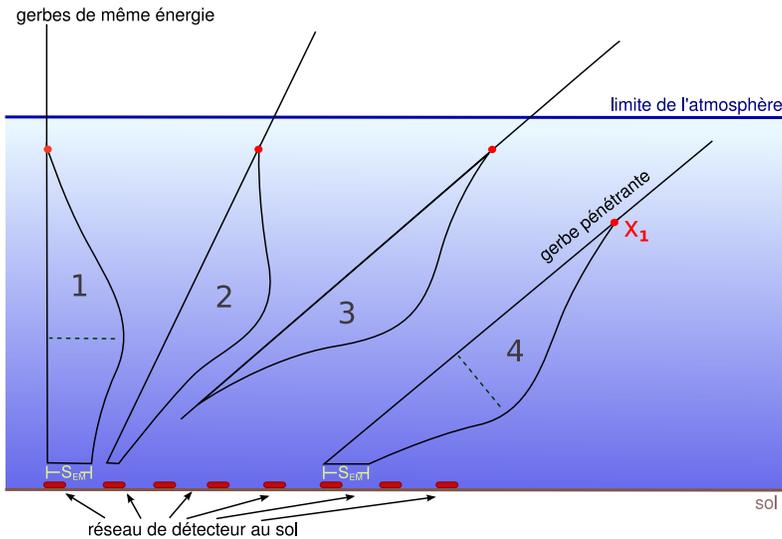
# Principe de la mesure de $\sigma_{RC-air}$

- Variation du nombre d'événements en fonction de l'angle zénithal



# Principe de la mesure de $\sigma_{RC-air}$

- Variation du nombre d'événements en fonction de l'angle zénithal



→ à conditions fixes *i.e.*  $N_\mu - S_{EM}$  donnés, le taux de gerbes remplissant ces contraintes est exponentiellement décroissant en fonction de la profondeur d'atmosphère traversée soit  $\propto 1 / \cos \theta \equiv$  distribution des valeurs de  $X_1$

# Application de la méthode aux données

- Détails de la procédure
  - hypothèse : le flux de RCUHEs est isotrope  $\rightarrow dN/d \cos^2 \theta = \text{constante}$
  - le nombre de muons à 1000 m est fixé  $\rightarrow$  sélection de l'énergie des gerbes
  - le signal EM  $S_{EM} \simeq S_{\text{tot.}} - N_{\mu}$  est contraint afin d'imposer le stade de développement de la gerbe
    - ♣ l'application d'un seuil élevé sur le signal EM implique la sélection de gerbe type "proton" ♣

# Application de la méthode aux données

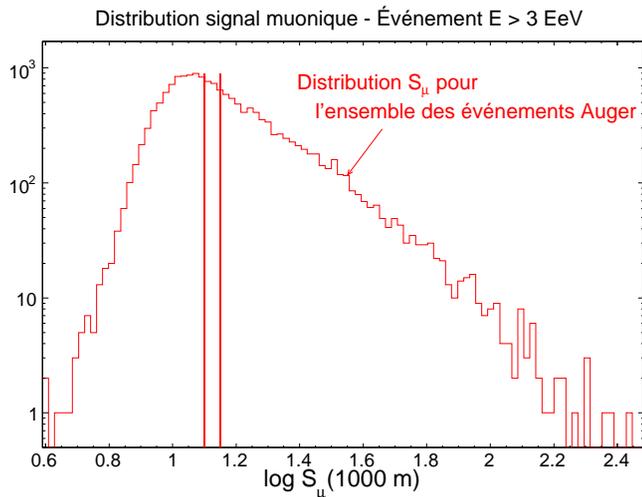
- Détails de la procédure

- hypothèse : le flux de RCUHEs est isotrope  $\rightarrow dN/d \cos^2 \theta = \text{constante}$

- le nombre de muons à 1000 m est fixé  $\rightarrow$  sélection de l'énergie des gerbes

- le signal EM  $S_{EM} \simeq S_{tot.} - N_{\mu}$  est contraint afin d'imposer le stade de développement de la gerbe

♣ l'application d'un seuil élevé sur le signal EM implique la sélection de gerbe type "proton" ♣



Sélection de l'énergie des gerbes

# Application de la méthode aux données

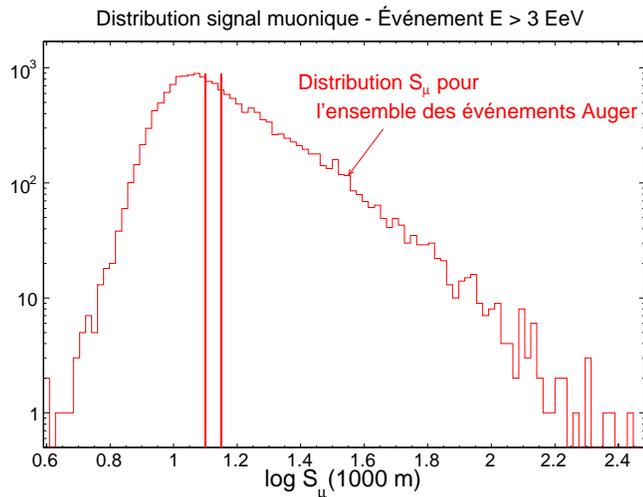
- Détails de la procédure

- hypothèse : le flux de RCUHEs est isotrope  $\rightarrow dN/d \cos^2 \theta = \text{constante}$

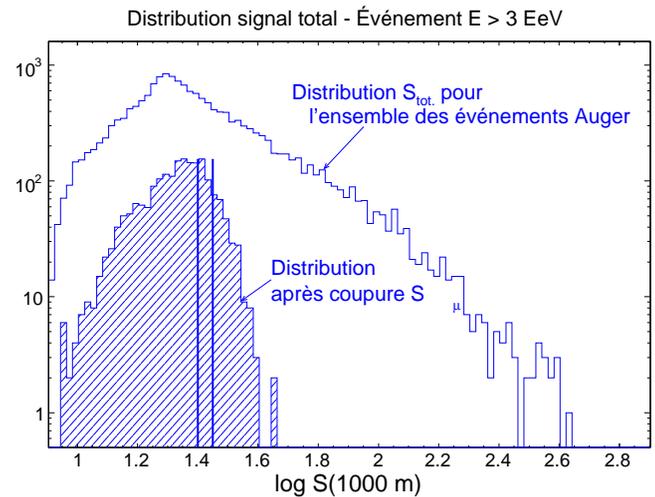
- le nombre de muons à 1000 m est fixé  $\rightarrow$  sélection de l'énergie des gerbes

- le signal EM  $S_{EM} \simeq S_{tot.} - N_{\mu}$  est contraint afin d'imposer le stade de développement de la gerbe

♣ l'application d'un seuil élevé sur le signal EM implique la sélection de gerbe type "proton" ♣



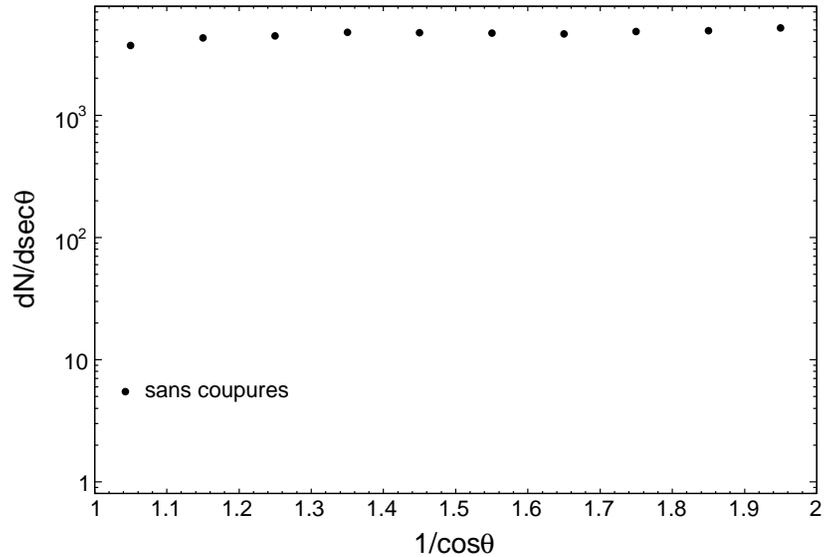
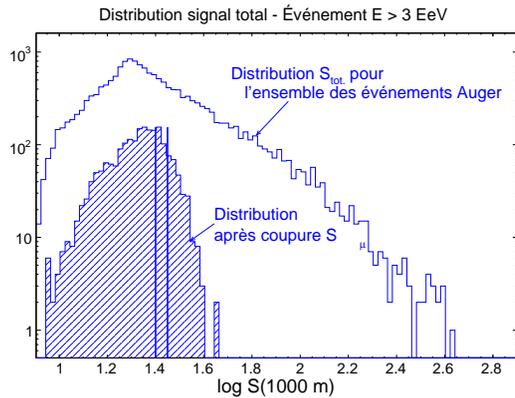
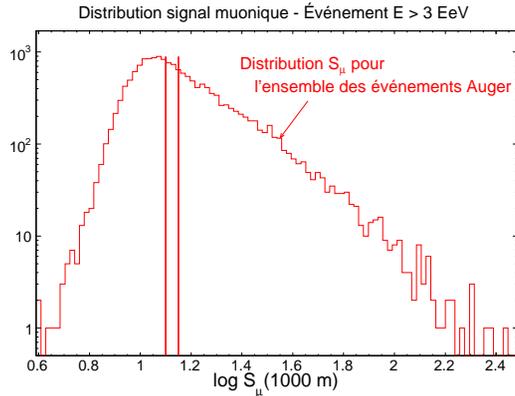
Sélection de l'énergie des gerbes



Sélection de l'âge des gerbes

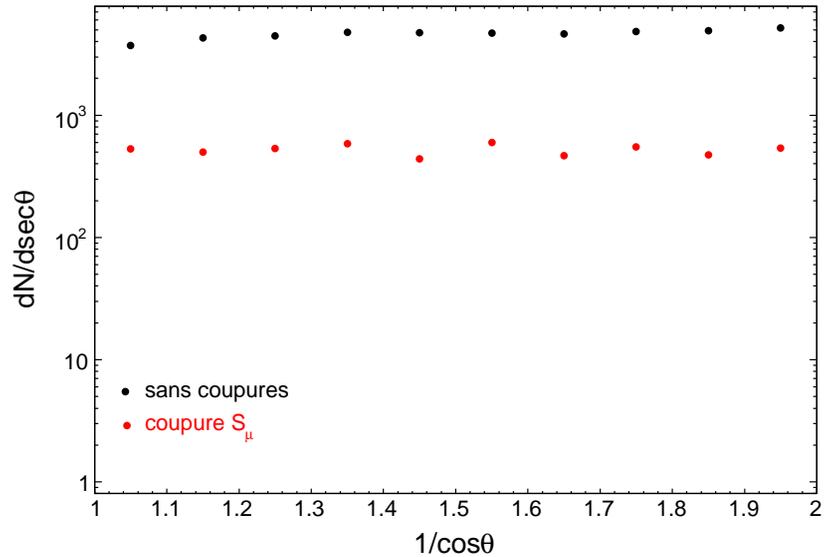
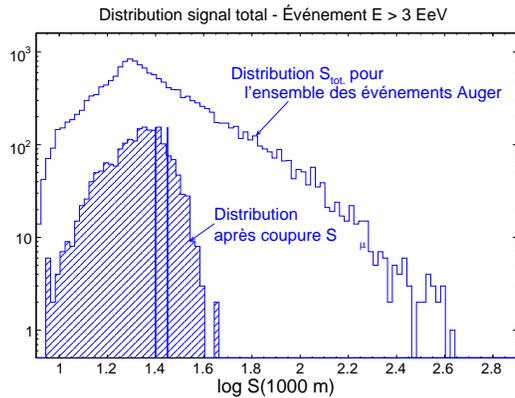
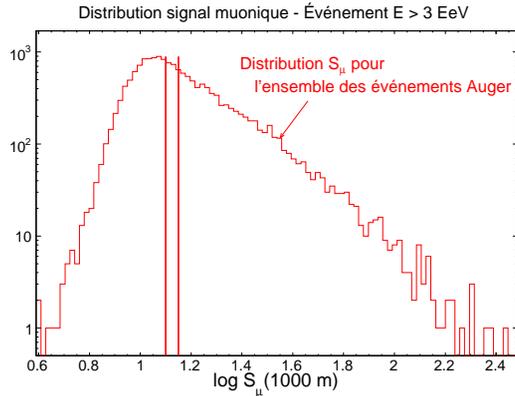
# Application de la méthode aux données

- Détails de la procédure



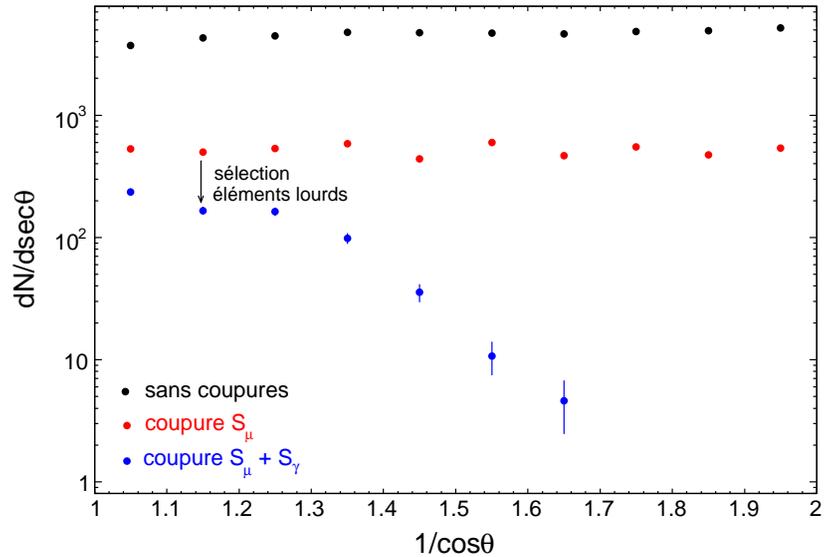
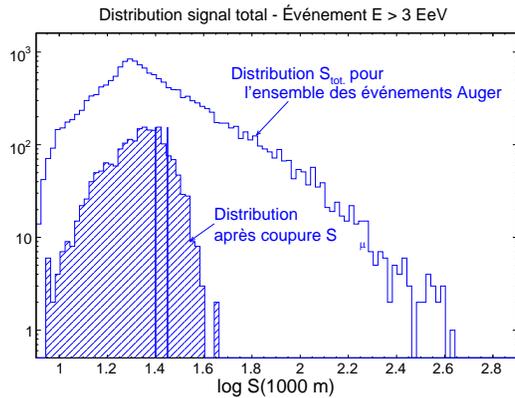
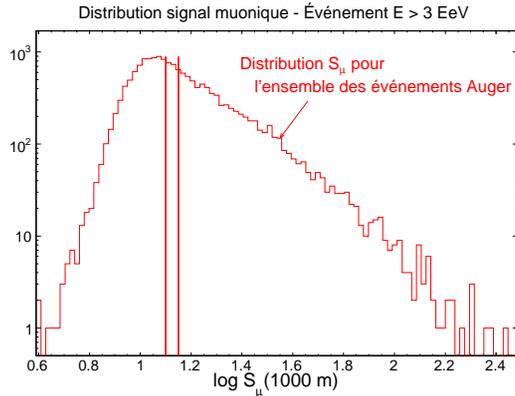
# Application de la méthode aux données

- Détails de la procédure



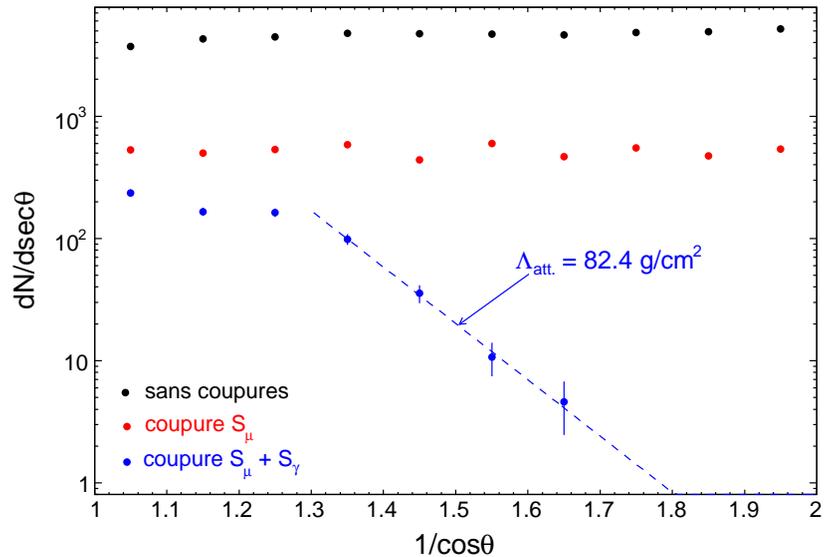
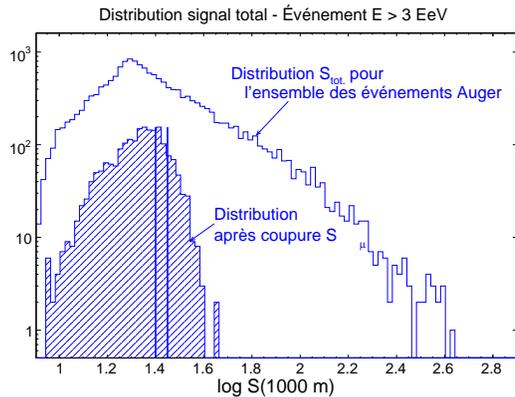
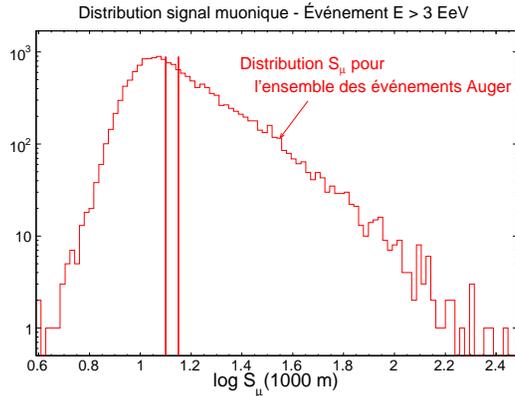
# Application de la méthode aux données

- Détails de la procédure



# Application de la méthode aux données

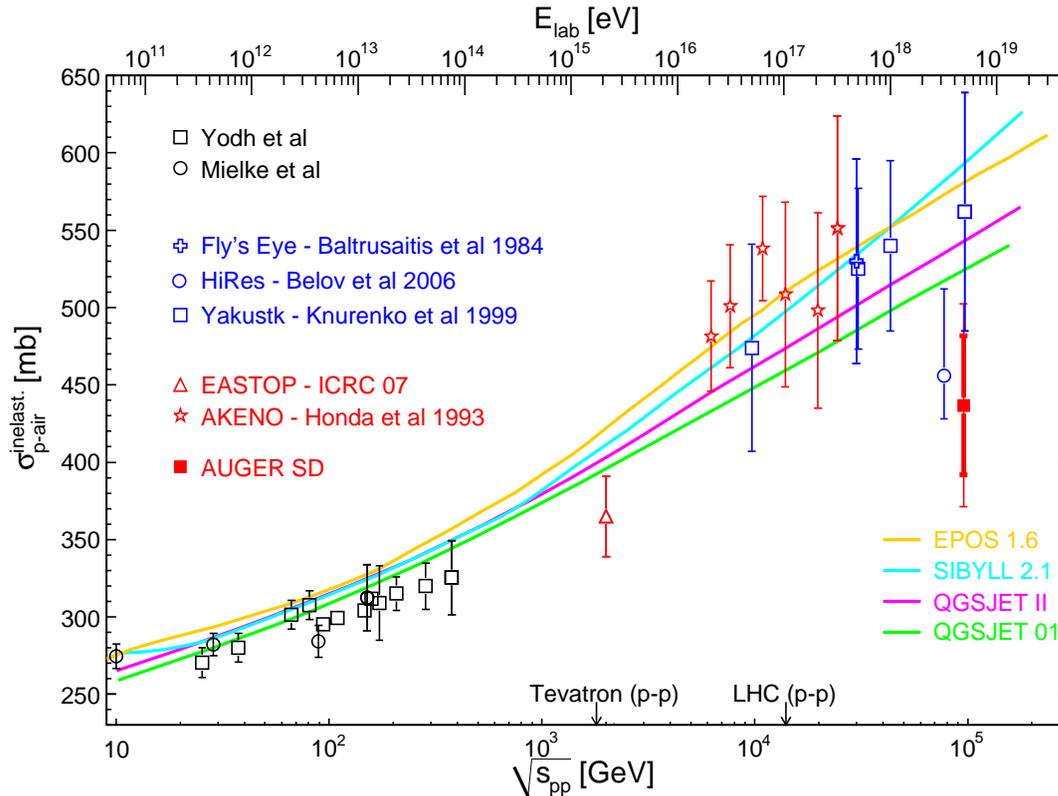
- Détails de la procédure



$$\sigma_{p-air} = \frac{\langle m_{air} \rangle}{\Lambda_{att.}} \times \underbrace{\text{facteur } k}_{\text{biais de la méthode}}$$

# Application de la méthode aux données

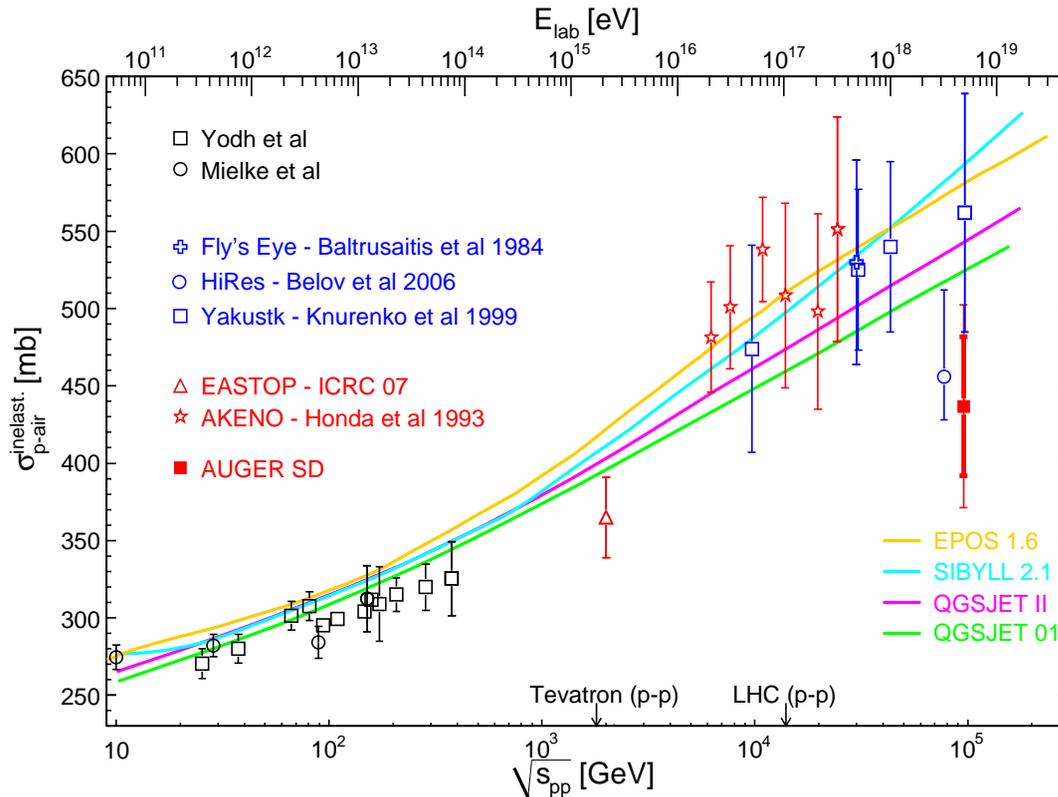
- Mesure préliminaire de  $\sigma_{p\text{-air}}$



$$\sigma_{p\text{-air}}(E = 4.7 \text{ EeV}) = 437 \text{ mb} \pm 45 \text{ mb (stat.)} \pm 65 \text{ mb (syst.)}$$

# Application de la méthode aux données

- Mesure préliminaire de  $\sigma_{p\text{-air}}$



→ les résultats de cette étude semblent indiquer **une relative stabilité de  $\sigma_{p\text{-air}}$**  à la différence de **l'évolution énergétique prédite par les modèles hadroniques**

# Synthèse & perspectives

- Bilan des résultats expérimentaux
  - la composition du RCUHEs semble successivement **s'alléger entre 3 – 25 EeV** puis **s'alourdir au delà**, ce qui combiné à la mesure de  $X_{\max}$  conforterait l'hypothèse "noyaux lourds" pour expliquer l'origine de **l'atténuation du flux**
  - la mesure **préliminaire** de  $\sigma_{p-\text{air}}$  semble indiquer **une relative stabilité** de la probabilité d'interaction au delà de  $\sim 1 \text{ EeV}$

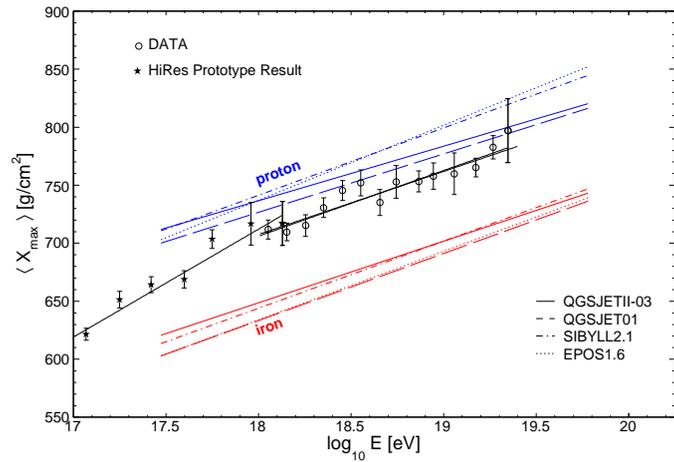
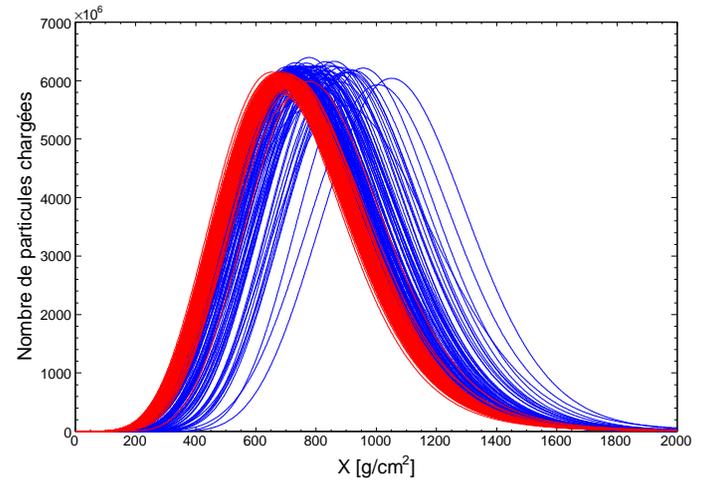
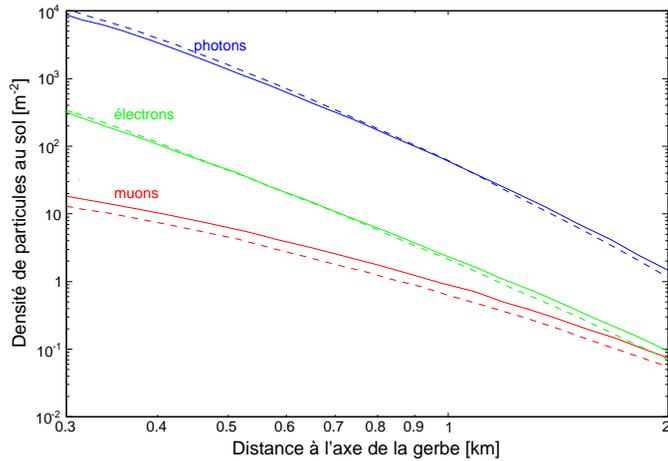
# Synthèse & perspectives

- Bilan des résultats expérimentaux
  - la composition du RCUHEs semble successivement **s'alléger entre 3 – 25 EeV** puis **s'alourdir au delà**, ce qui combiné à la mesure de  $X_{\max}$  conforterait l'hypothèse "noyaux lourds" pour expliquer l'origine de **l'atténuation du flux**
  - la mesure **préliminaire** de  $\sigma_{p-\text{air}}$  semble indiquer **une relative stabilité** de la probabilité d'interaction au delà de  $\sim 1 \text{ EeV}$
- Perspectives tirant partie de la méthode des sauts
  - utilisation du nombre de muons pour **déterminer l'énergie**
  - application à **l'étude des directions d'arrivées**
  - analyse indépendante **des signaux temporels muonique et électromagnétique**

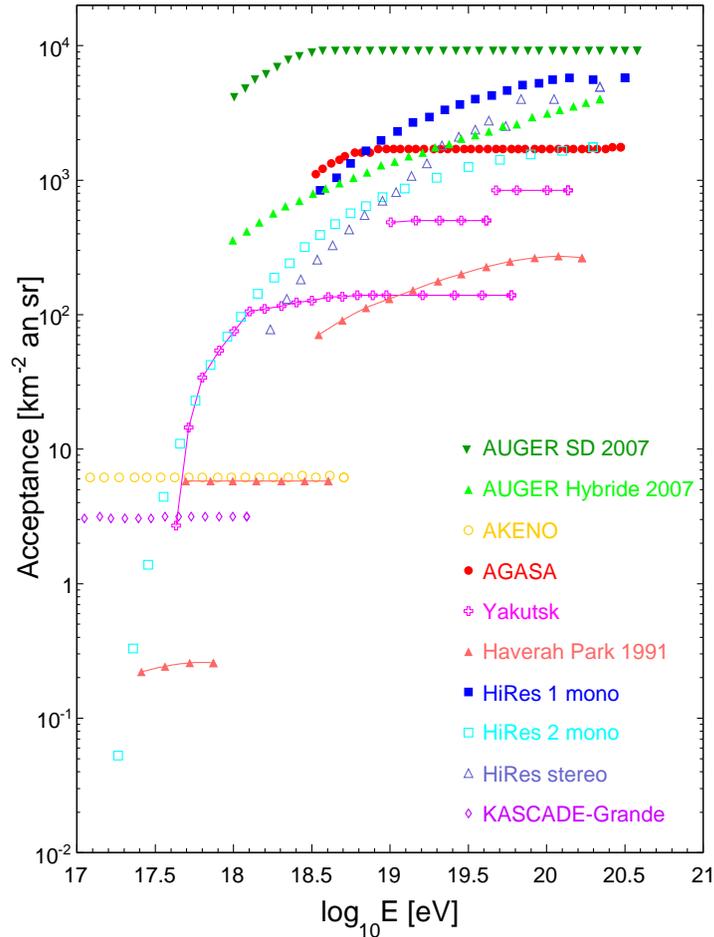
# Plan de l'exposé

- **Problématiques** liées aux RCUHEs
- L'Observatoire Pierre Auger : **un détecteur hybride**
- Étude de la composition des gerbes : **comptage des muons**
- Mesure de **la section efficace rayon cosmique-air**
- Conclusions et perspectives

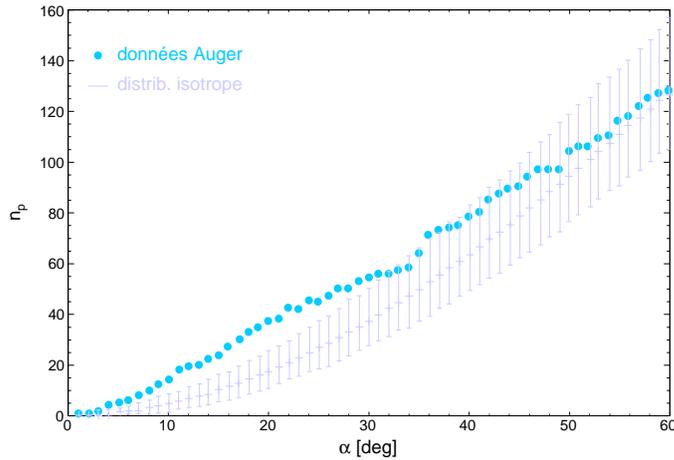
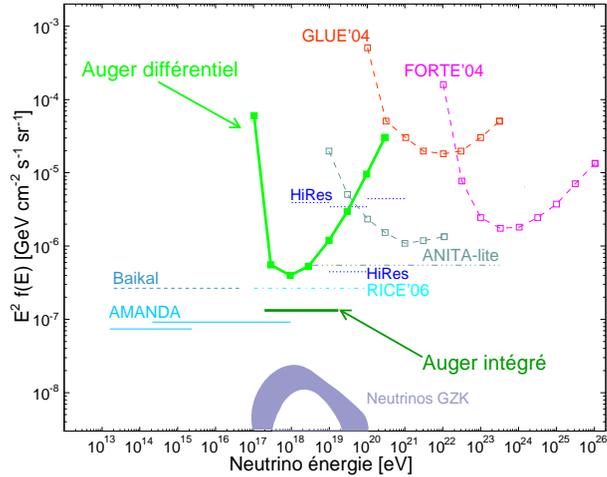
# Composition FD/SD



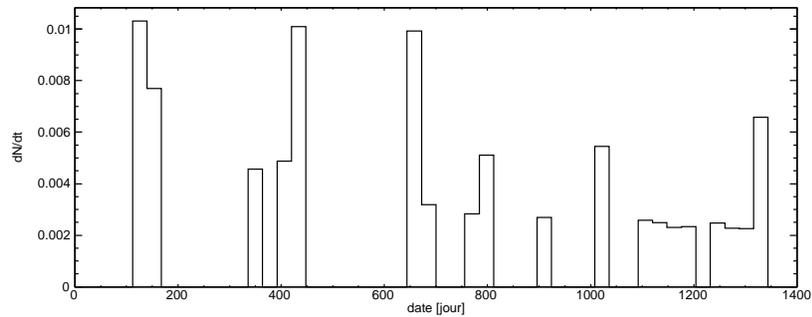
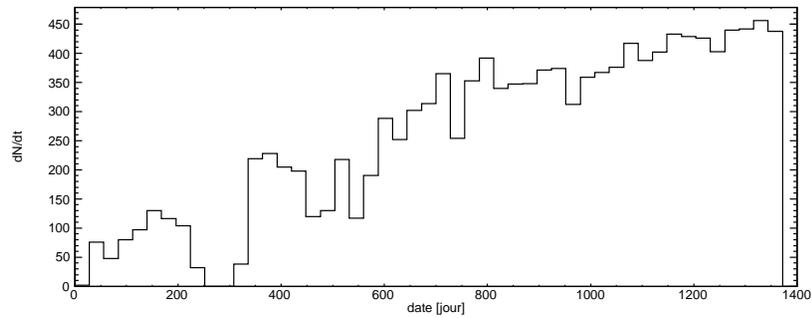
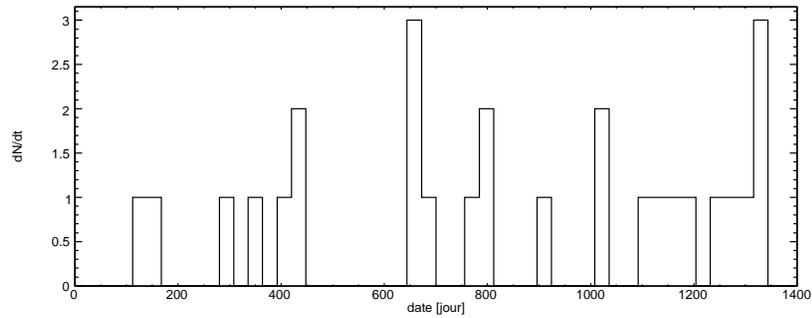
# Acceptance comparée



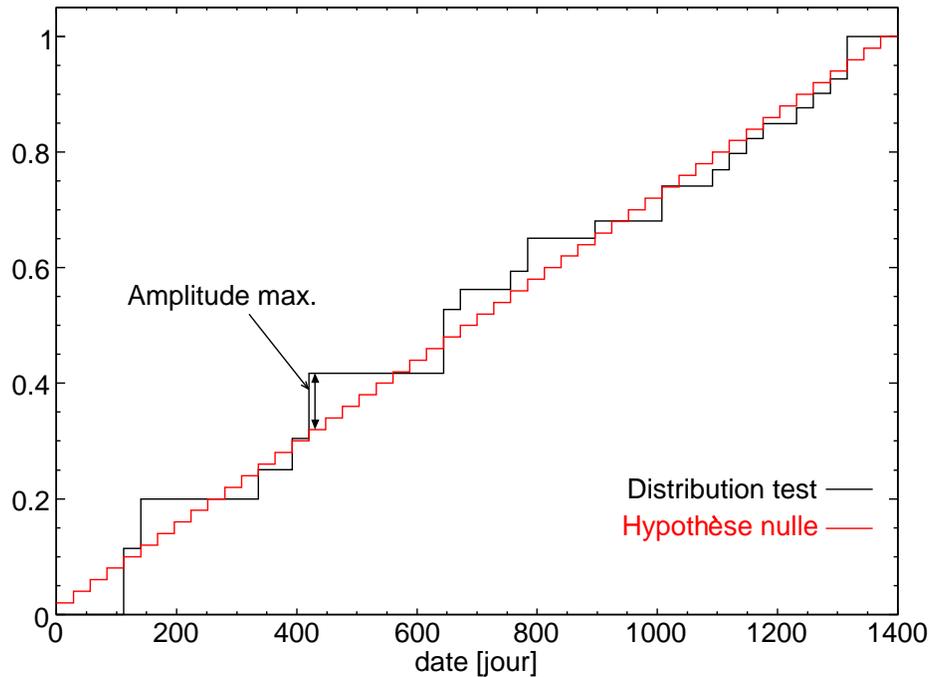
# Résultats complémentaires de l'OPA



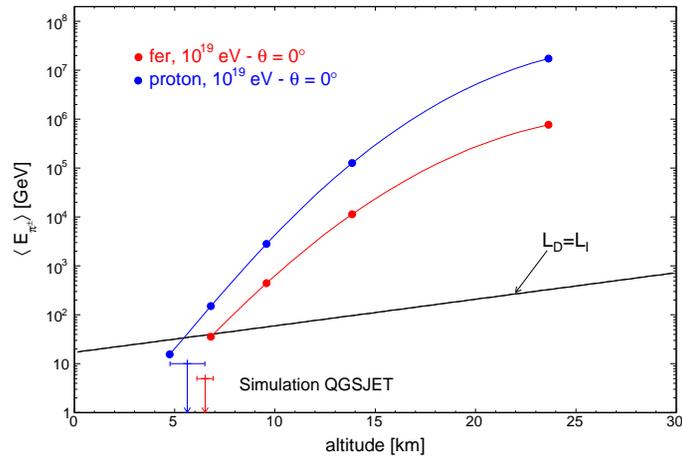
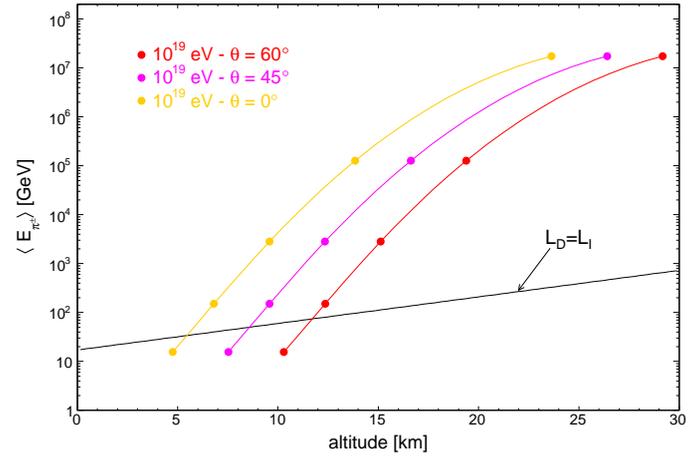
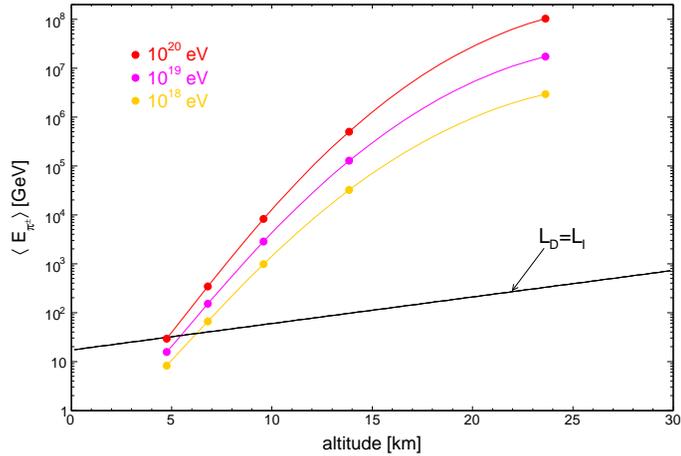
# Analyse des temps d'arrivées



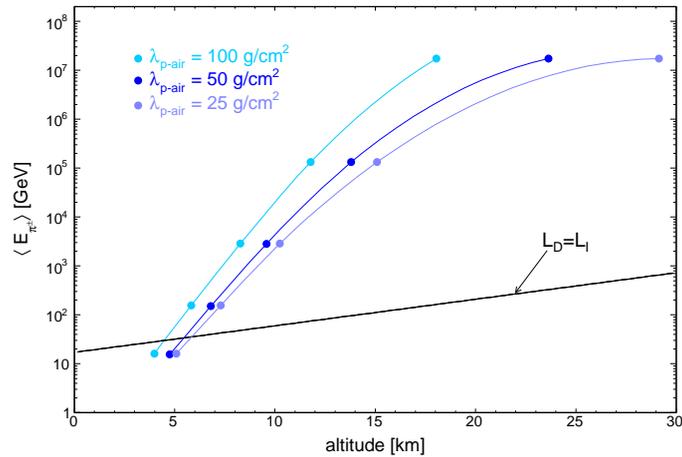
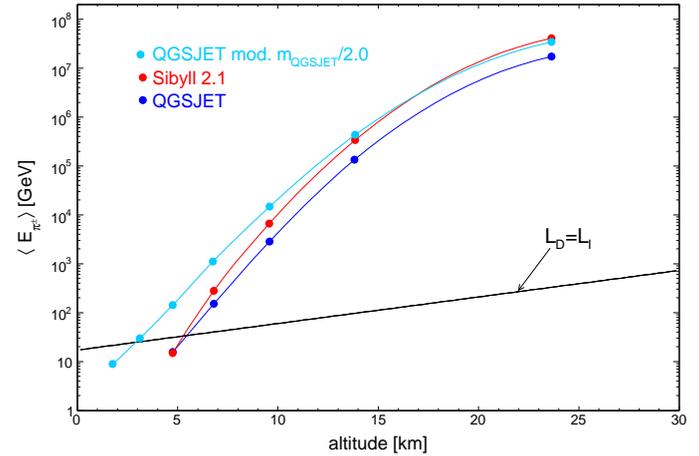
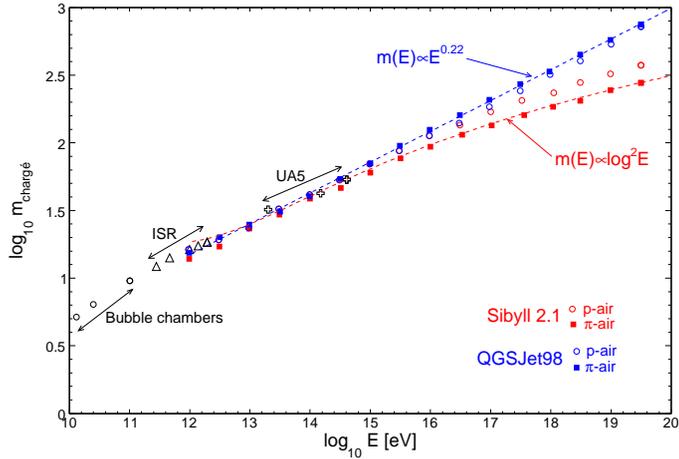
# Analyse des temps d'arrivées



# Phénoménologie de la production de muons



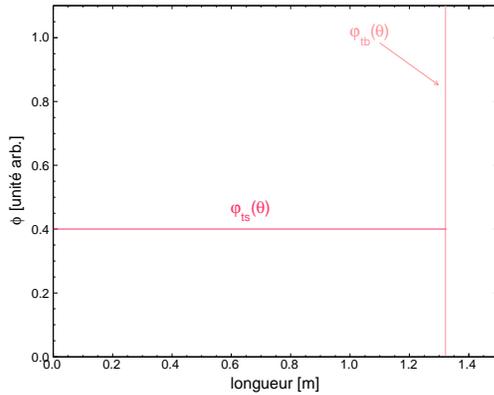
# Phénoménologie de la production de muons



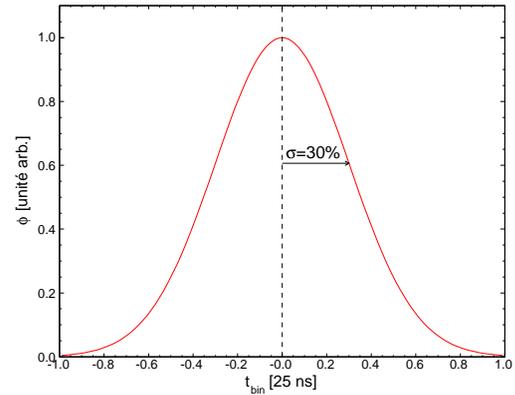
# Phénoménologie de la production de muons

Paramètres hadroniques		$\langle X_{\max} \rangle$	$\sigma_{X_{\max}}$	$N_{\mu}^{\text{total}}$
Multiplicité 1 <sup>ère</sup> interaction :	$m_1$ augmente	décroit	–	–
Multiplicité $n^{\text{ième}}$ interaction :	$m_n$ augmente	–	–	<b>augmente</b>
Section efficace :	$\sigma_{\text{RC-air}}$ décroît	<b>décroit</b>	décroît	augmente
Rapport $\pi^0/\pi^{\pm}$ :	100% neutres	–	–	<b>décroit</b>
Inélasticité $k$ :	$k$ augmente	–	–	décroit
Masse du primaire :	$A$ augmente	décroît	décroit	augmente
Énergie du primaire :	$E$ augmente	augmente	–	<b>augmente</b>

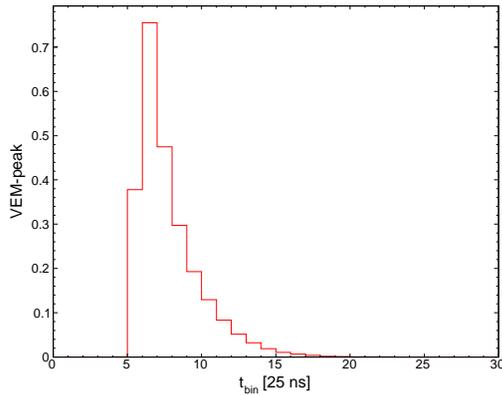
# Méthode des sauts



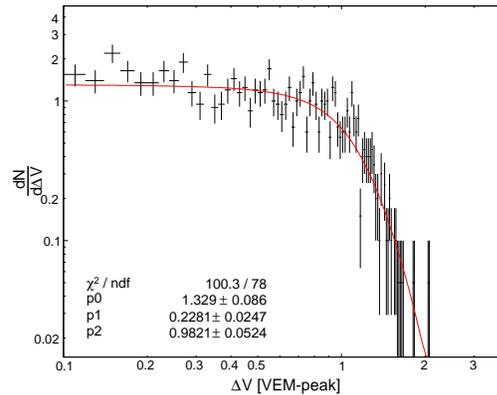
a) Distribution des longueurs



b) Résolution du détecteur

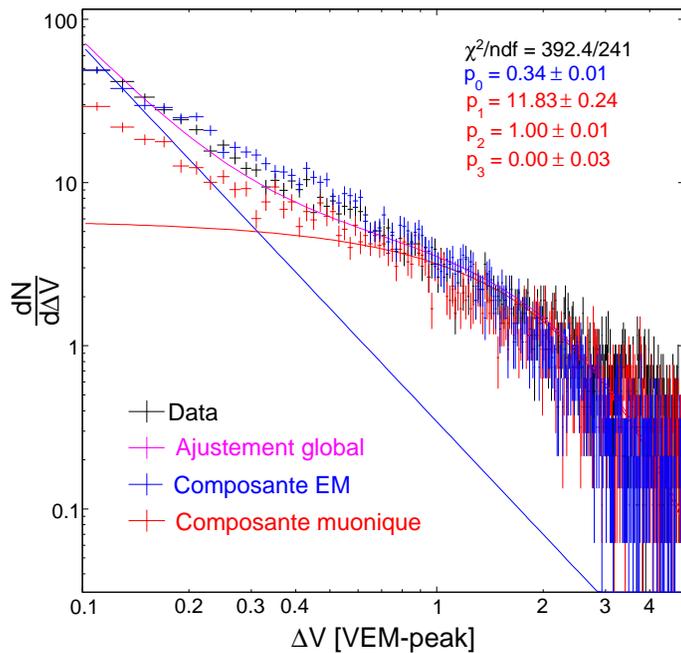


c) Profil moyen d'un muon

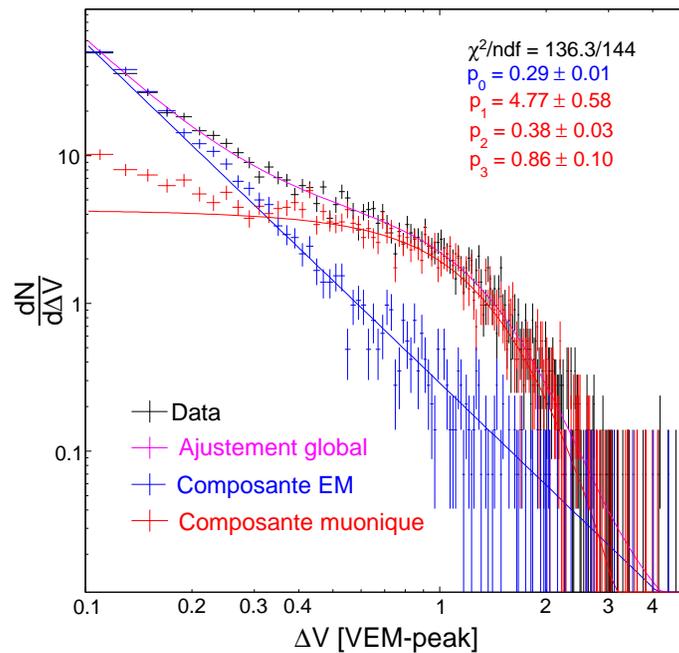


d) Distribution finale des sauts pour  $\theta = 25^\circ$

# Méthode des sauts

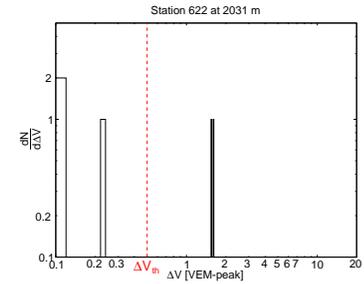
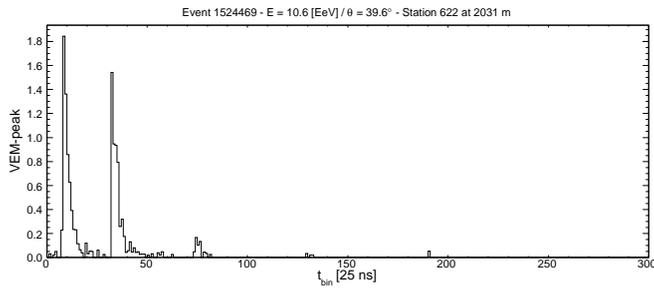
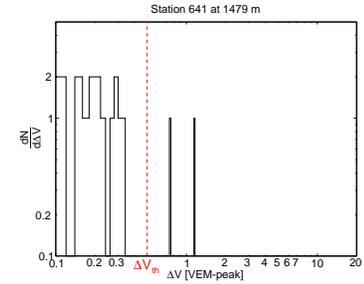
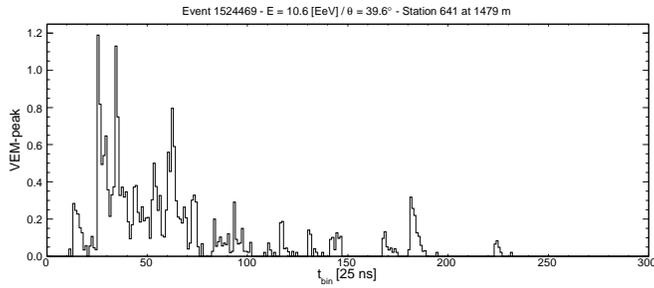
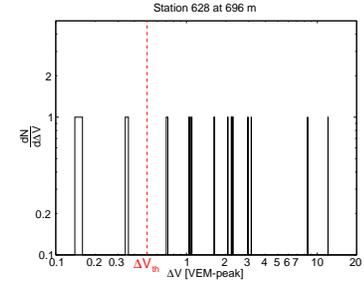
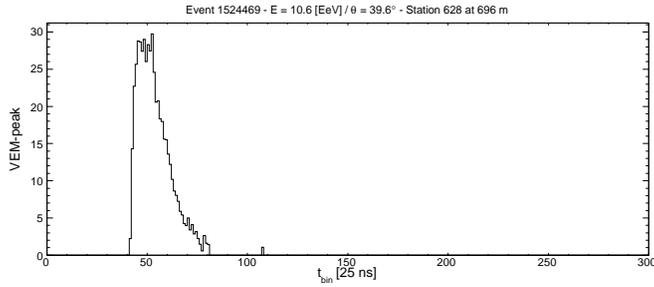


a)  $400 \text{ m} \leq R \leq 800 \text{ m}$

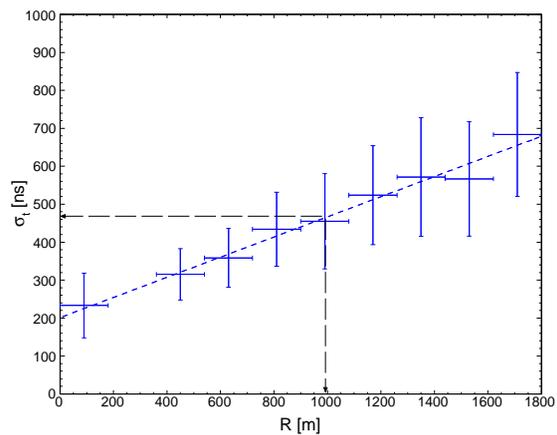
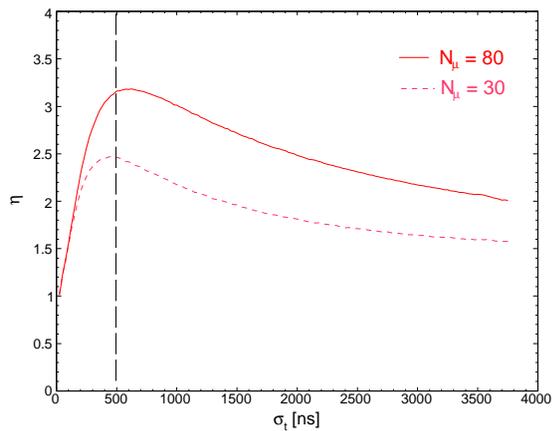
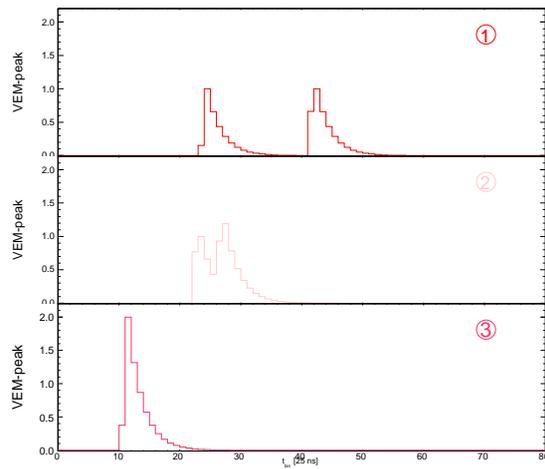
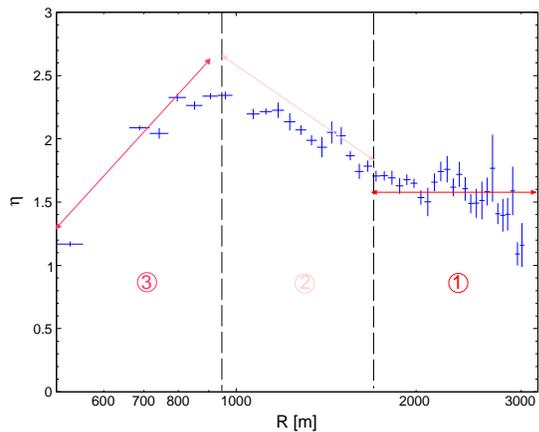


b)  $1200 \text{ m} \leq R \leq 1600 \text{ m}$

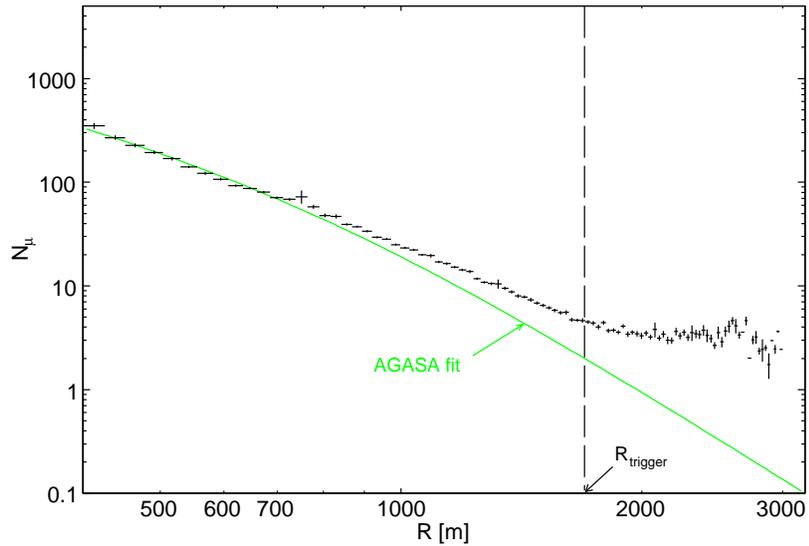
# Méthode des sauts



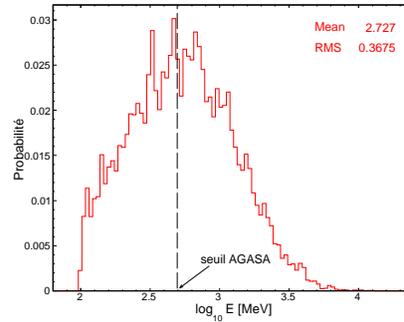
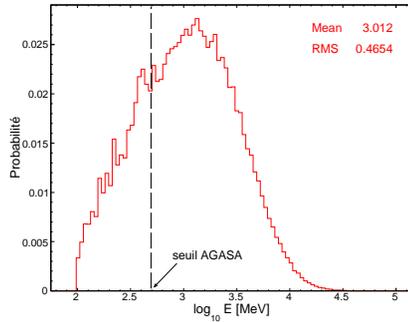
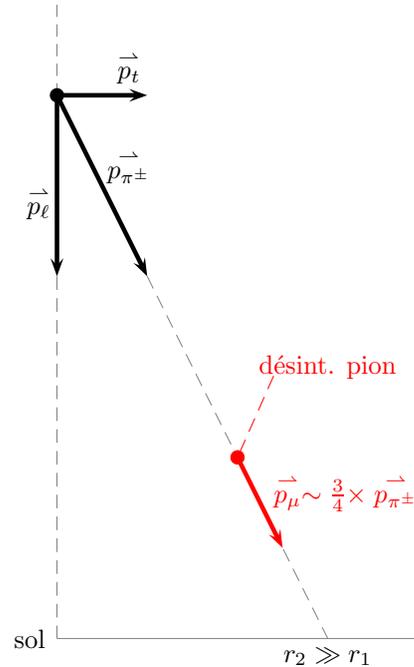
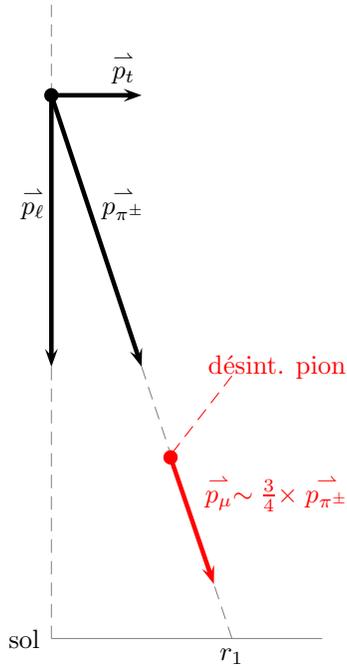
# Méthode des sauts



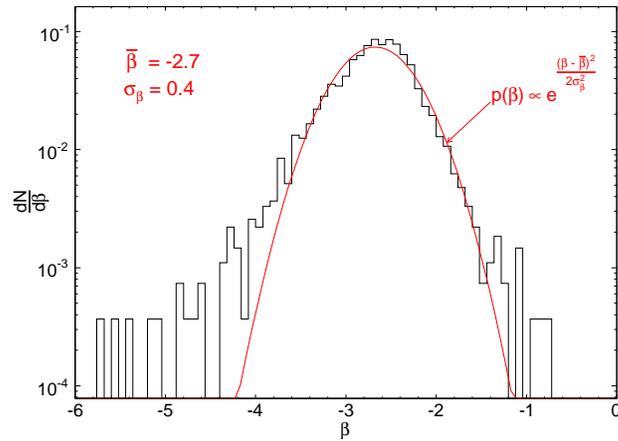
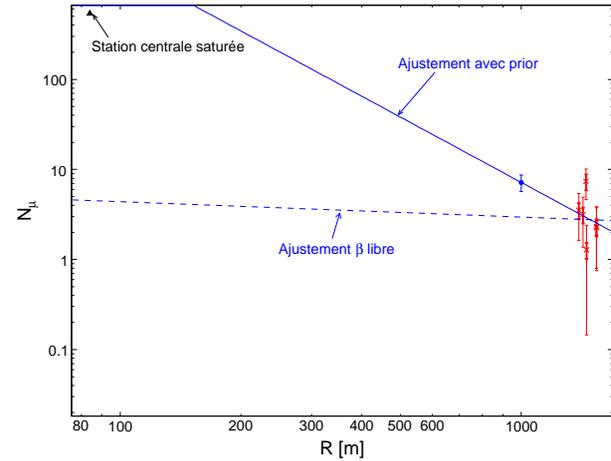
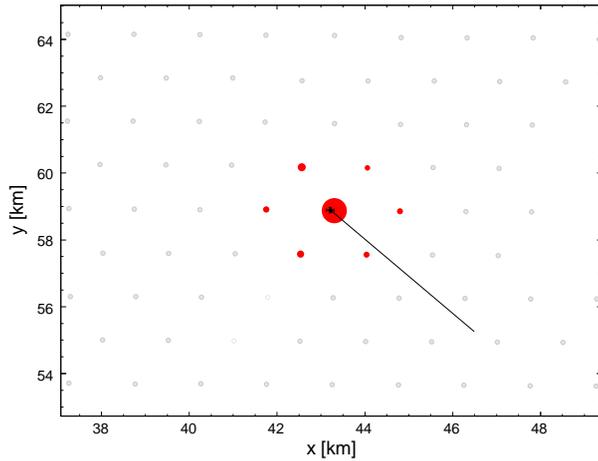
# Ajustement de $\mu$ LDF



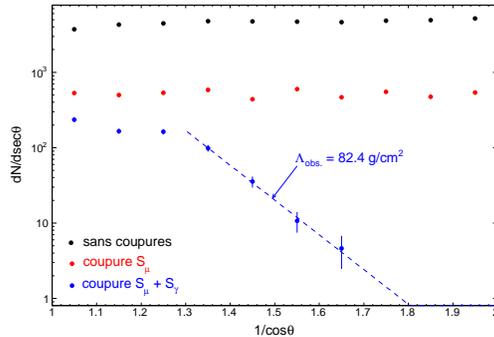
# Ajustement de $\mu$ LDF



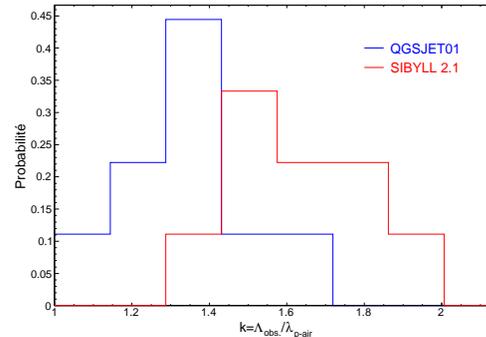
# Ajustement de $\mu$ LDF



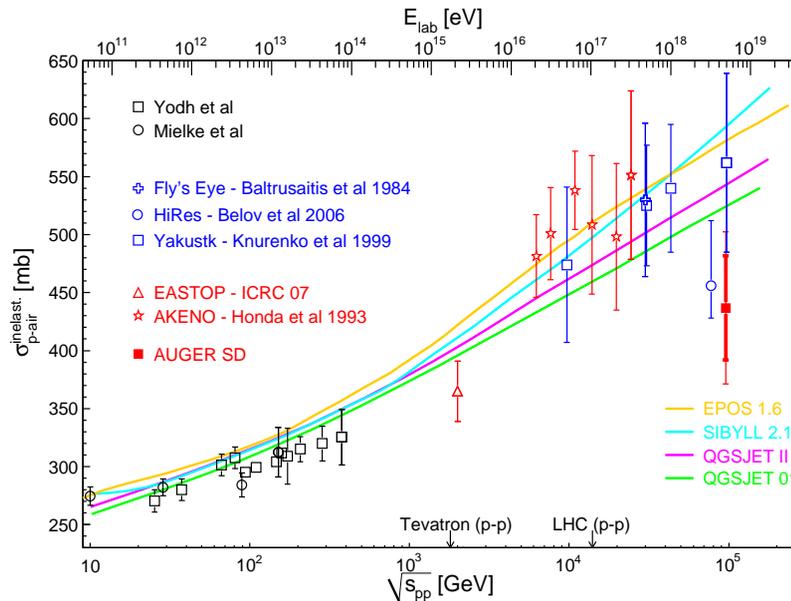
# Mesure de la section efficace $\sigma_{p-air}$



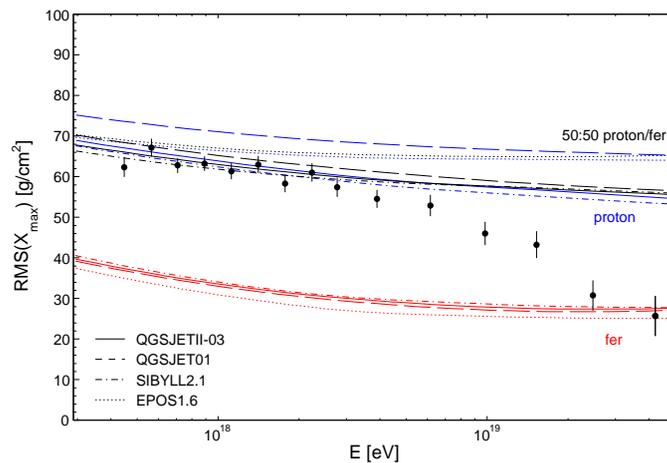
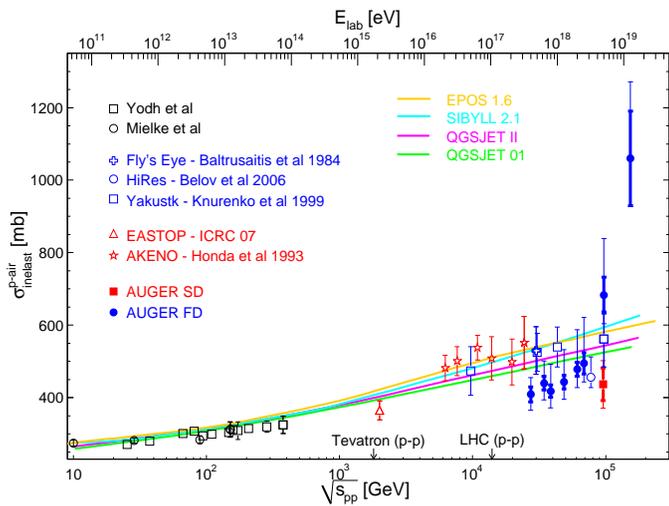
a) Détermination de  $\Lambda_{obs}$ .



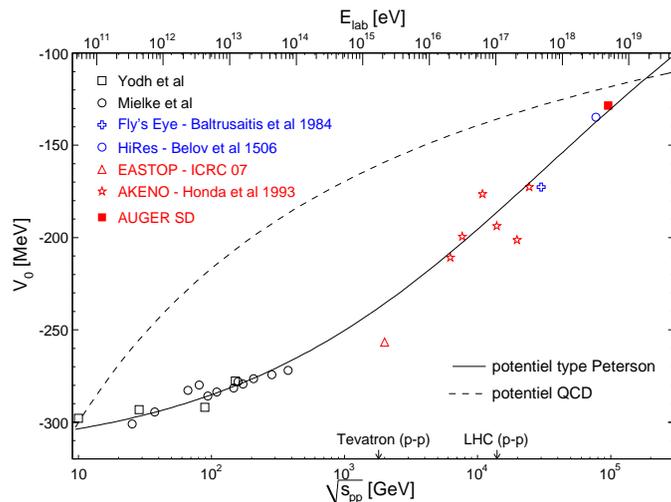
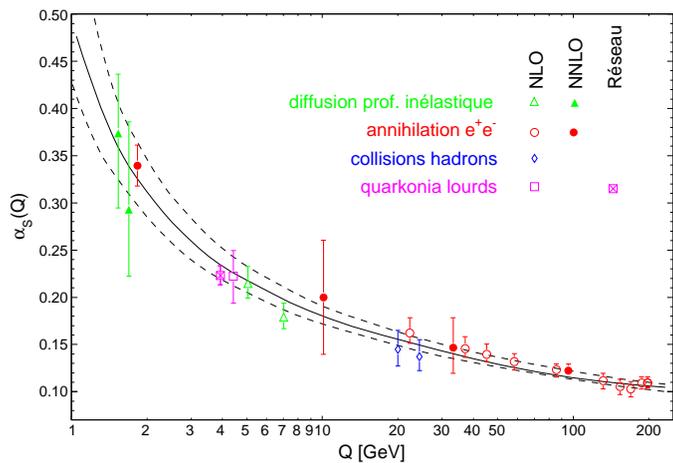
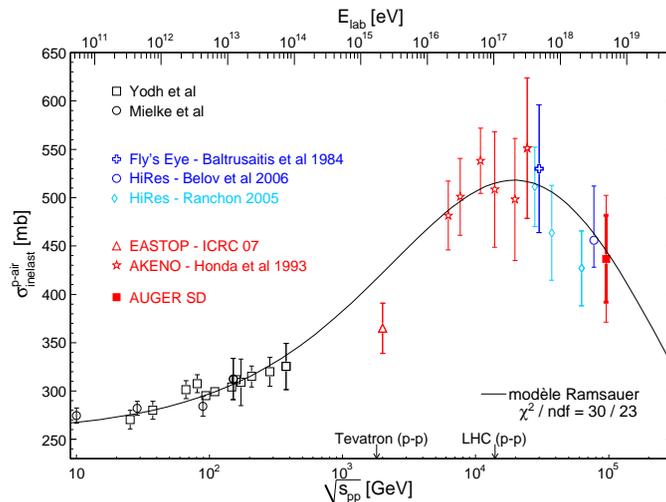
b) Détermination du facteur  $k$



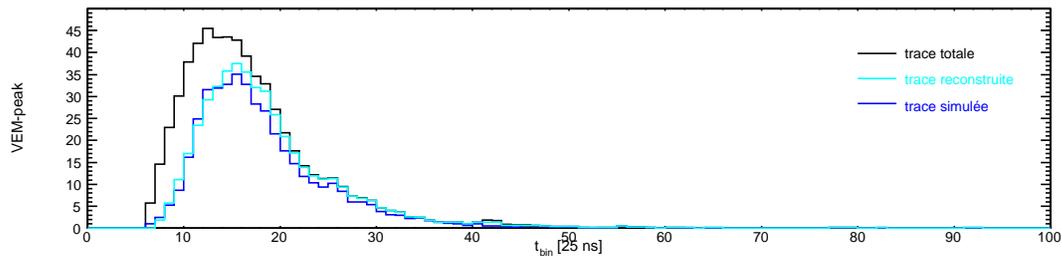
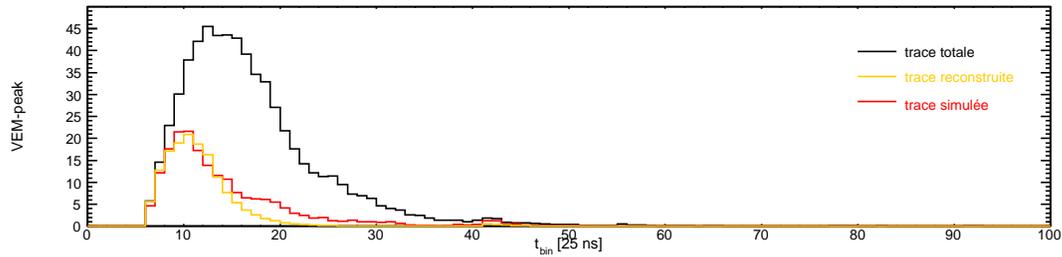
# Mesure de la section efficace $\sigma_{p-air}$



# Mesure de la section efficace $\sigma_{p-air}$ : effet Ramsauer

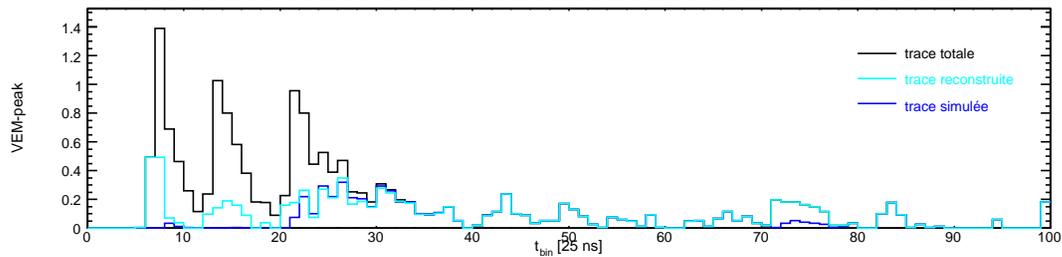
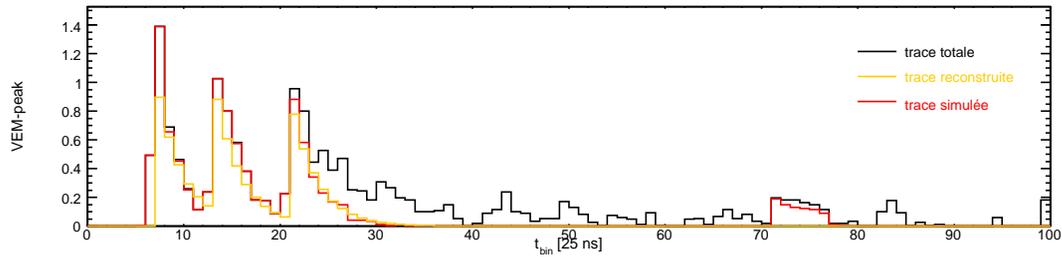


# Résultats complémentaires



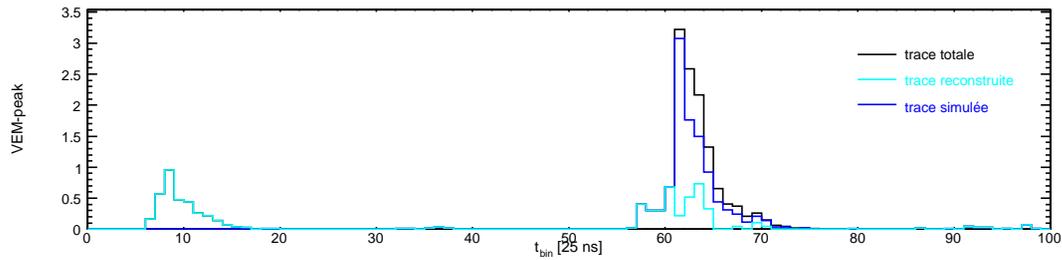
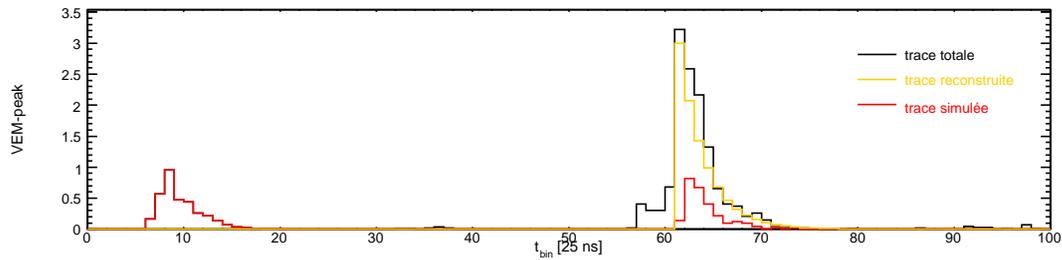
a) Station située à 537 m

# Résultats complémentaires



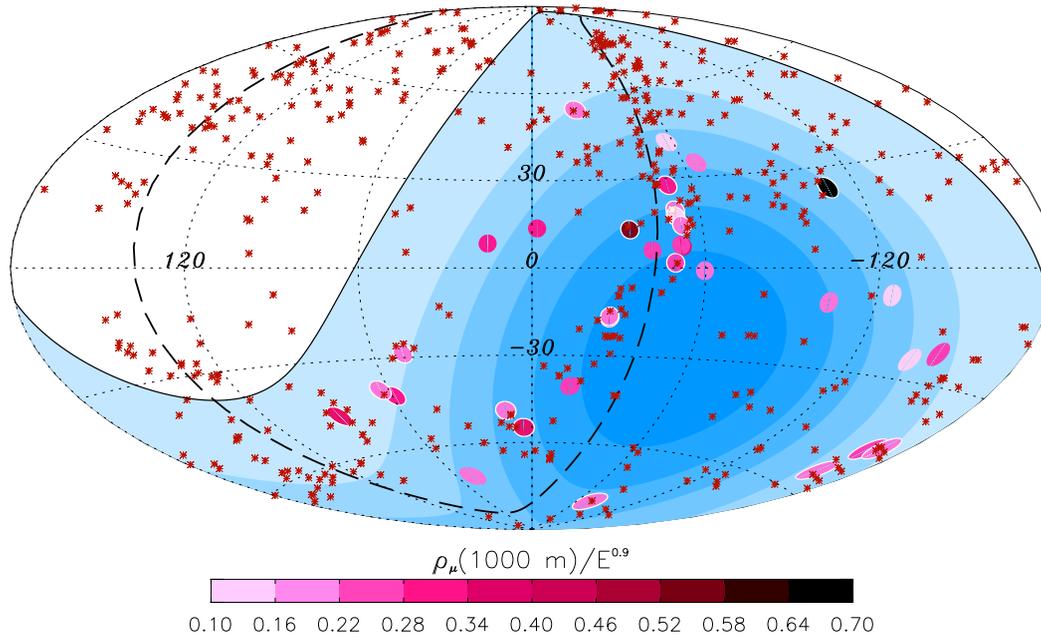
b) Station située à 1463 m

# Résultats complémentaires

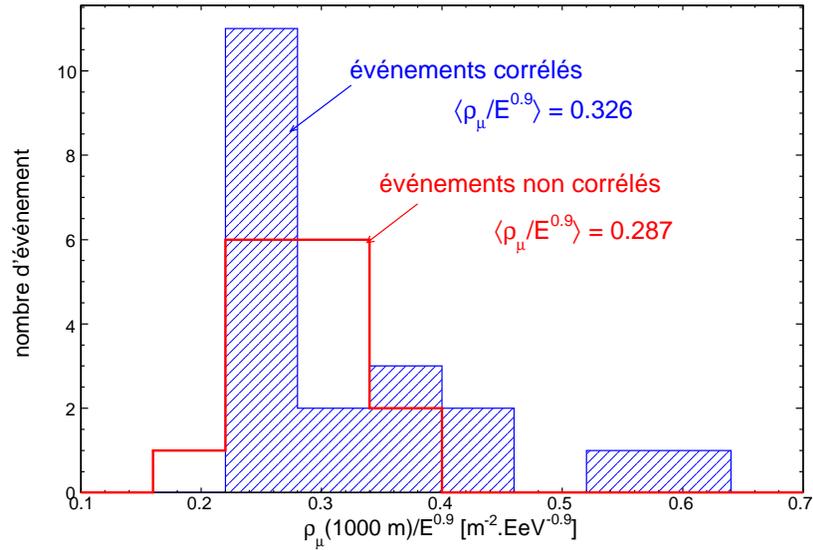


c) Station située à 2100 m

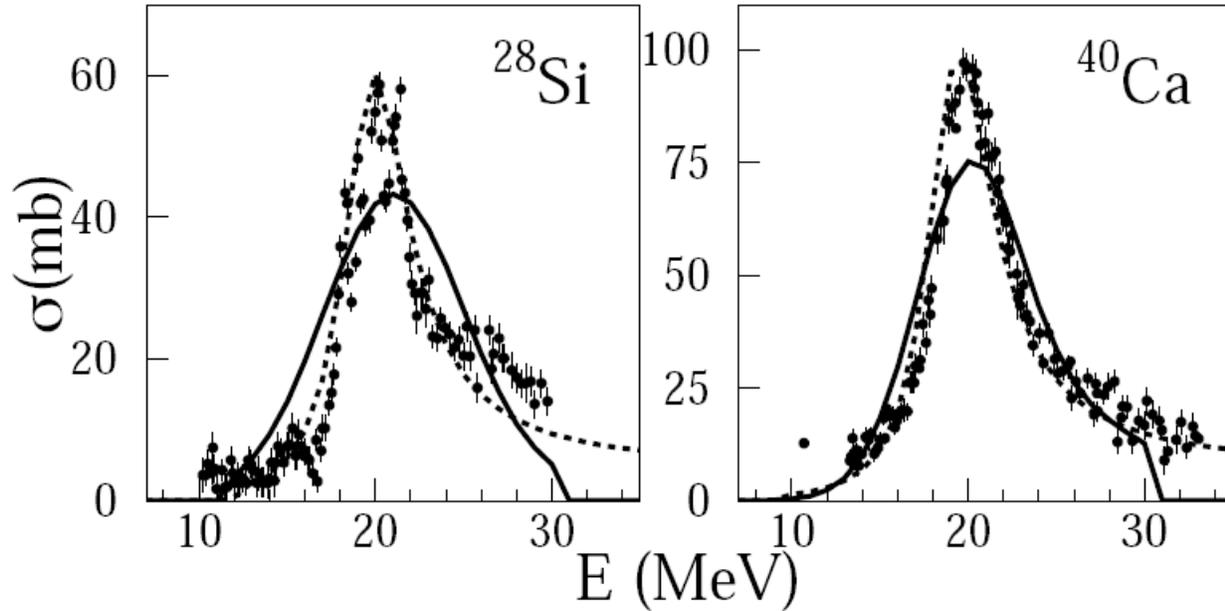
# Résultats complémentaires



# Résultats complémentaires



# Propagation de noyaux lourds



- Interaction noyaux + photons(2.7K) : fragmentation du noyau  $\rightarrow$  résonance géante dipolaire