

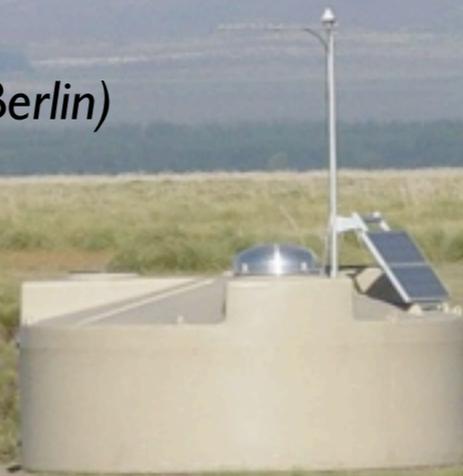
« RCUHE »



Les rayons cosmiques d'ultra-haute énergie et la
phénoménologie de leurs sources dans un cadre multi-messagers

Guillaume Decerprit

Argonne National Lab. (Chicago) / DESY (Berlin)



Les RCUHE et l'Observatoire Pierre Auger

Les RCUHE et
l'Observatoire
Pierre Auger

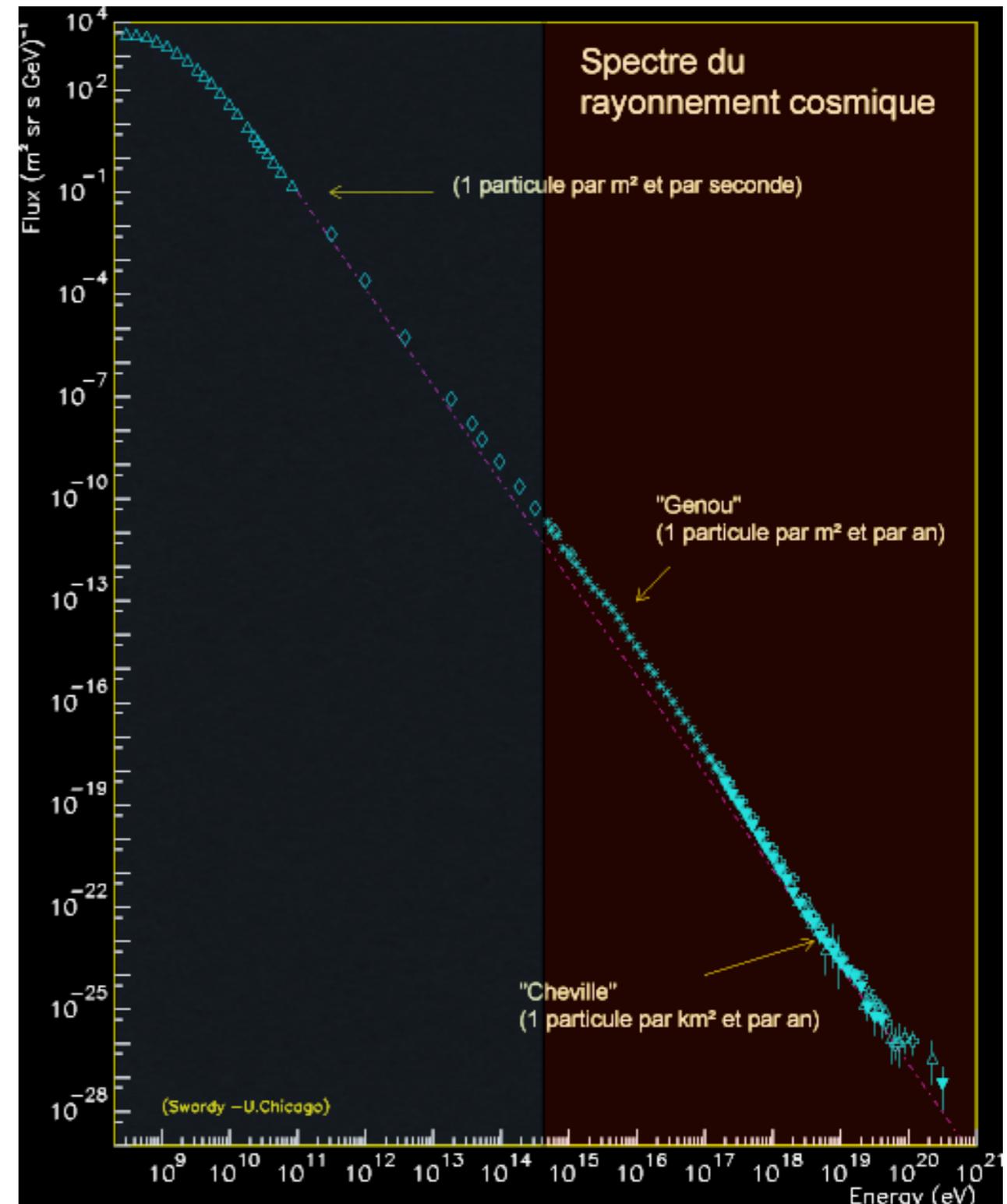
Le spectre
d'énergie et la
composition

Le spectre
angulaire

Les multi-
messagers

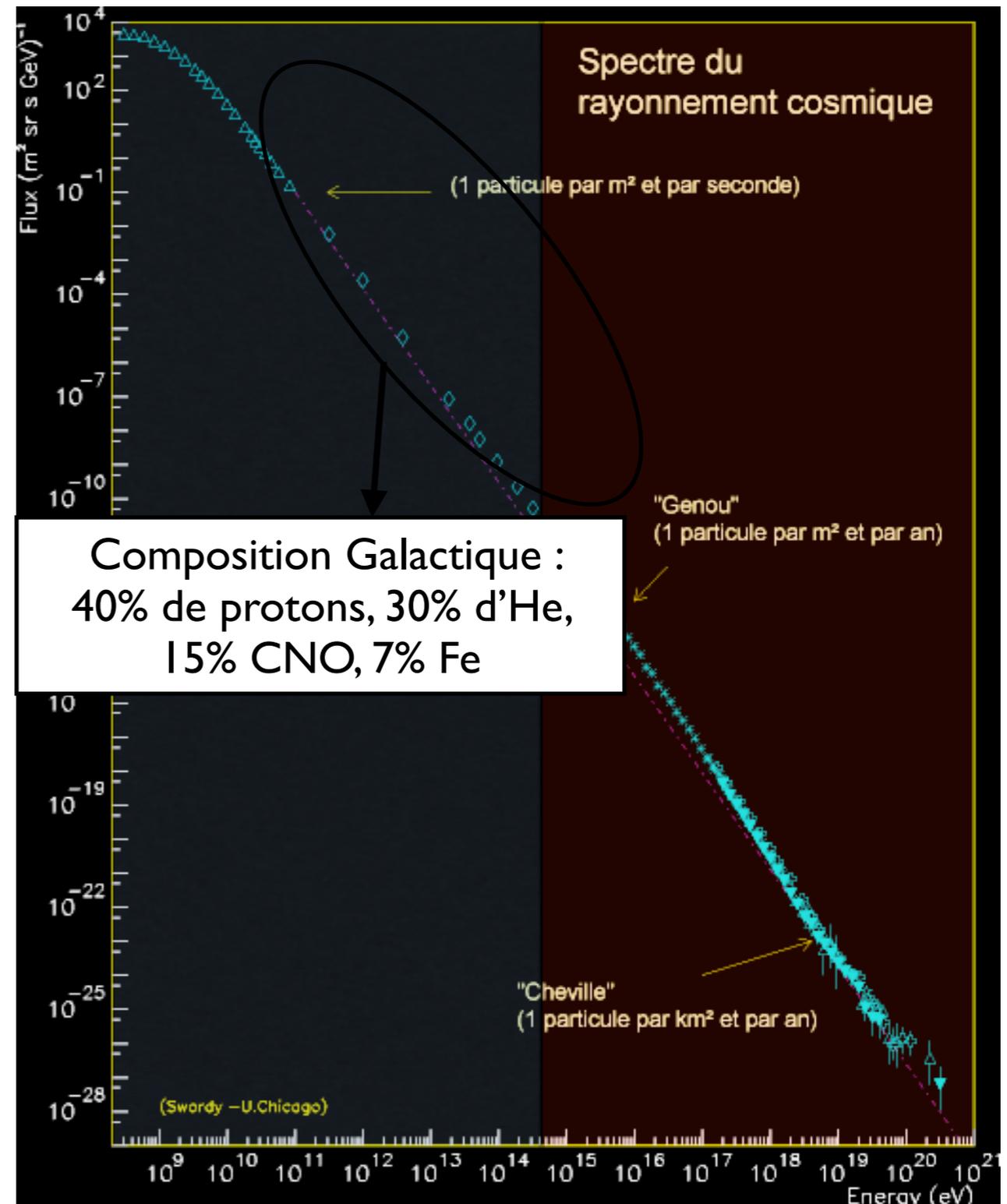
Que sont les Rayons Cosmiques ?

- Particules chargées (électrons, protons, noyaux)
- Spectre régulier : \sim loi de puissance sur > 12 ordres de grandeur en énergie et 32 en flux !
- Changements de pentes remarquables (genou, cheville)
- Qui sont les accélérateurs ?
- Origine Galactique est bien établie jusqu'à $\sim 10^{17}$ eV
 - paradigme : accélération par onde de choc (Reste de Supernovæ)
- Transition Galactique/extra-galactique ?
- Coupure du spectre : effet GZK ou coupure aux sources ?

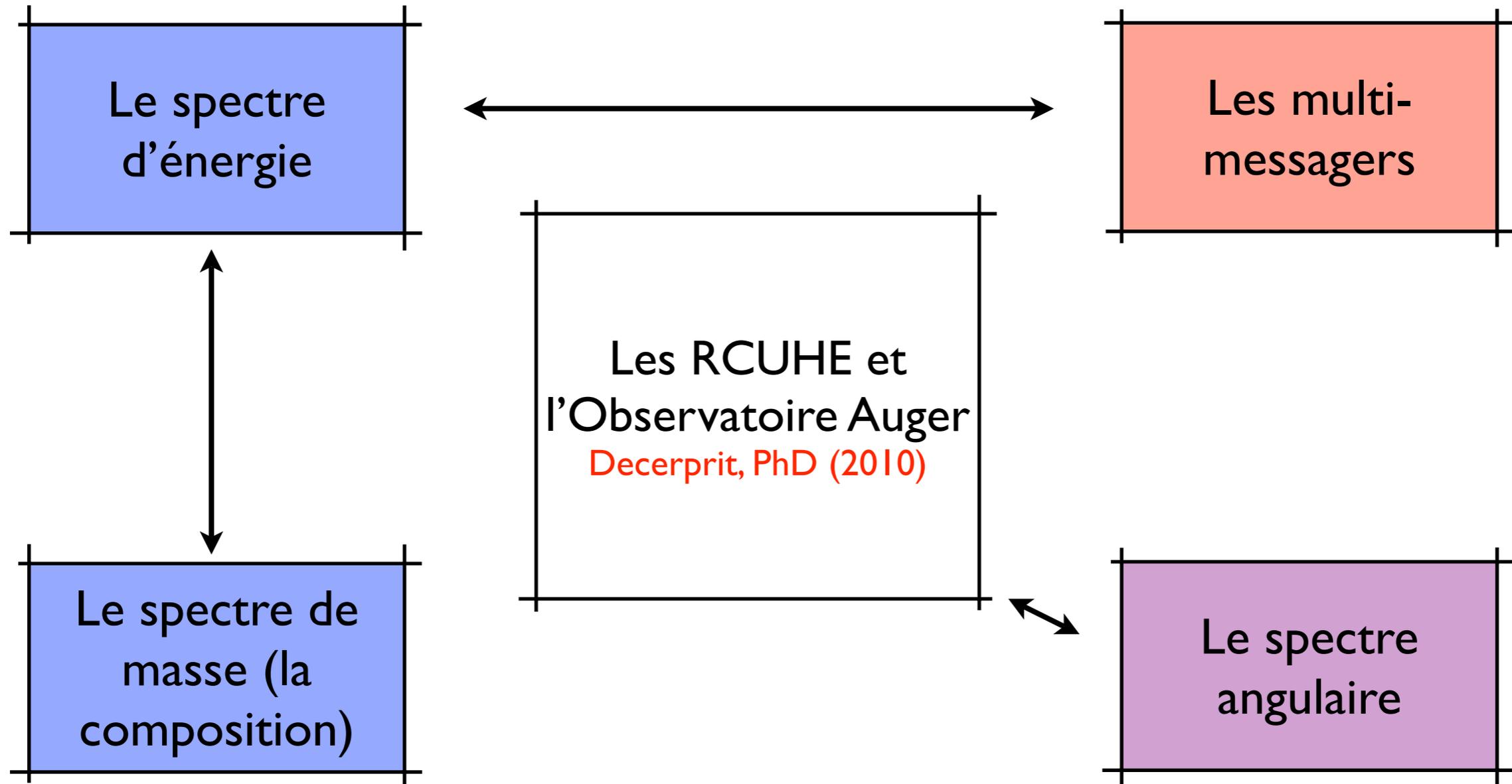


Que sont les Rayons Cosmiques ?

- Particules chargées (électrons, protons, noyaux)
- Spectre régulier : \sim loi de puissance sur > 12 ordres de grandeur en énergie et 32 en flux !
- Changements de pentes remarquables (genou, cheville)
- Qui sont les accélérateurs ?
- Origine Galactique est bien établie jusqu'à $\sim 10^{17}$ eV
- \longrightarrow paradigme : accélération par onde de choc (Reste de Supernovæ)
- Transition Galactique/extra-galactique ?
- Coupure du spectre : effet GZK ou coupure aux sources ?



Axes d'études

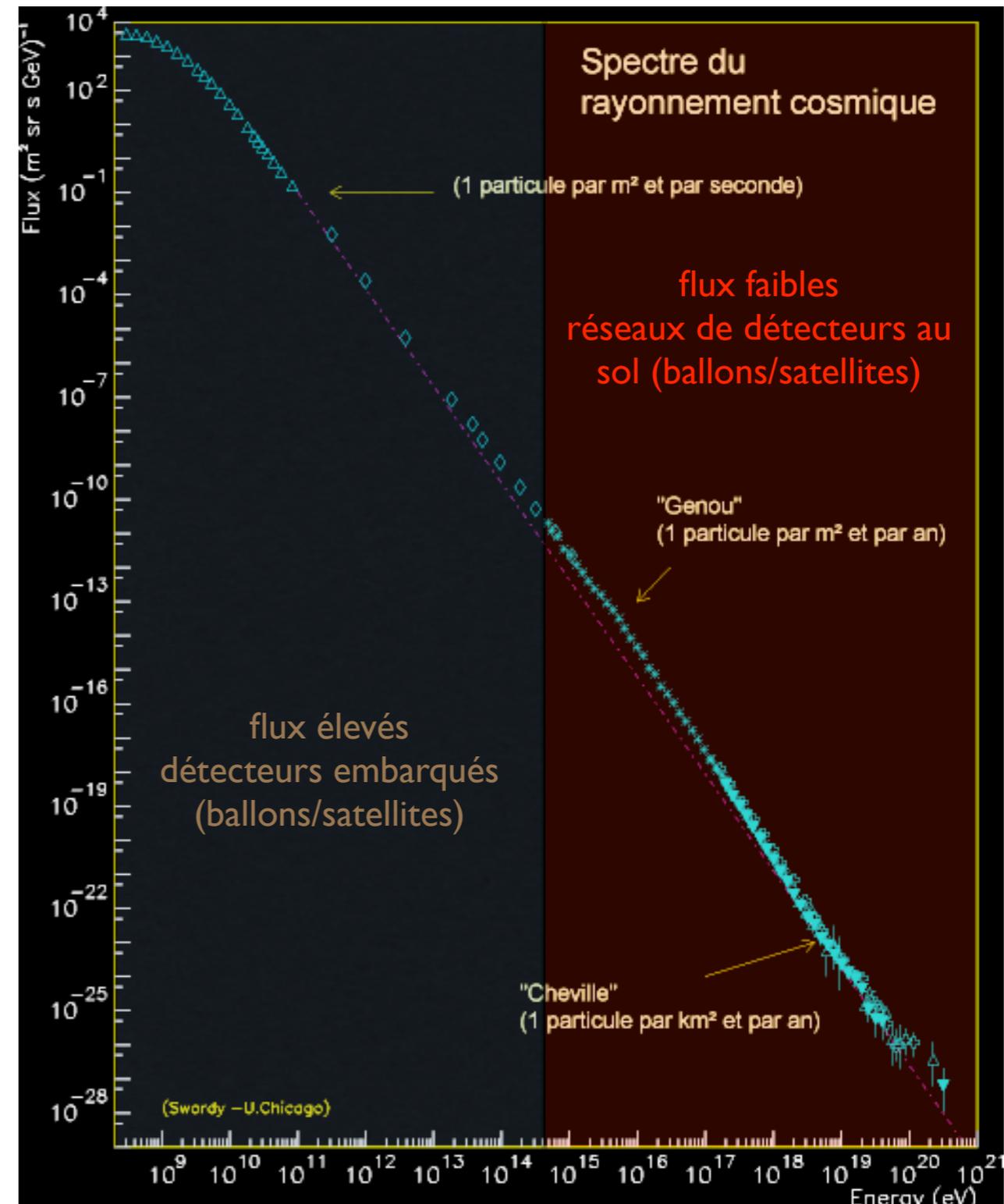


Pourquoi nous ne sommes pas encore au chômage

- **Difficultés astrophysiques :**
 - particules chargées dans un Univers magnétisé
 - physique des objets astrophysiques n'est pas connue en détails
- **Difficultés théoriques et expérimentales :**
 - énergies non reproductibles sur Terre,
 - incertitudes sur modèles hadroniques pour le développement des gerbes

Piéger un Rayon Cosmique

- À «basse énergie» ($< 10^{14-15}$ eV), flux élevés
→ domaine des détecteurs embarqués sur satellites ou ballons atmosphériques
- À haute énergie ($> 10^{14-15}$ eV), flux faibles, on détecte les gerbes atmosphériques
→ domaine des détecteurs de gerbes et détecteurs de fluorescence
- Aux plus hautes énergies ($> 10^{19.5}$ eV), flux très faibles ($< 1 \text{ km}^{-2} \cdot \text{siècle}^{-1}$), les **RCUHE**
→ domaine des réseaux géants de détecteurs

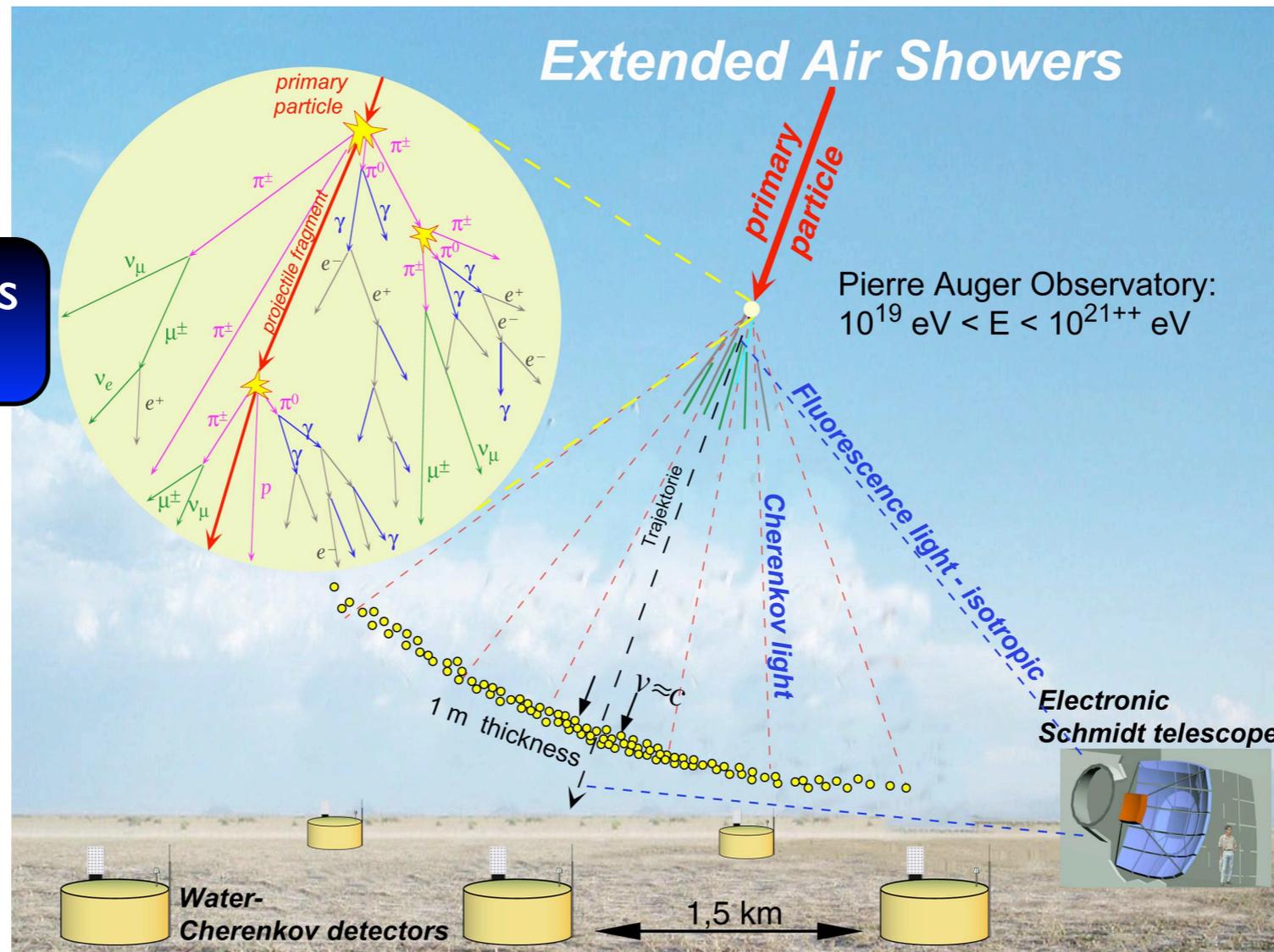


Piéger un RCUHE

- Les « détecteurs de RCUHE » détectent les gerbes atmosphériques initiées par les RCUHE
- Reconstruction des paramètres physiques de la gerbe atmosphérique

Particules secondaires mesurées

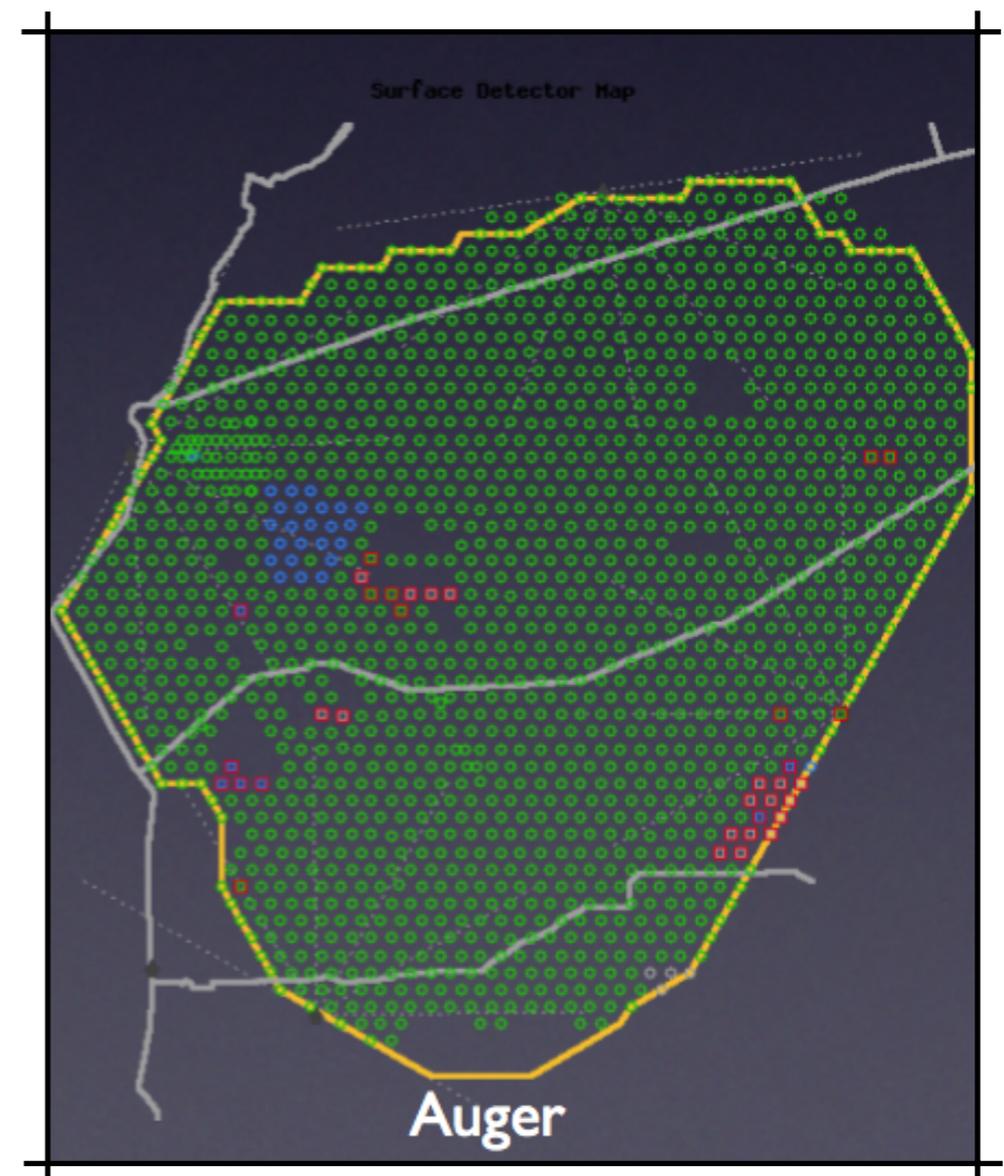
détecteurs de surface



détecteurs de fluorescence

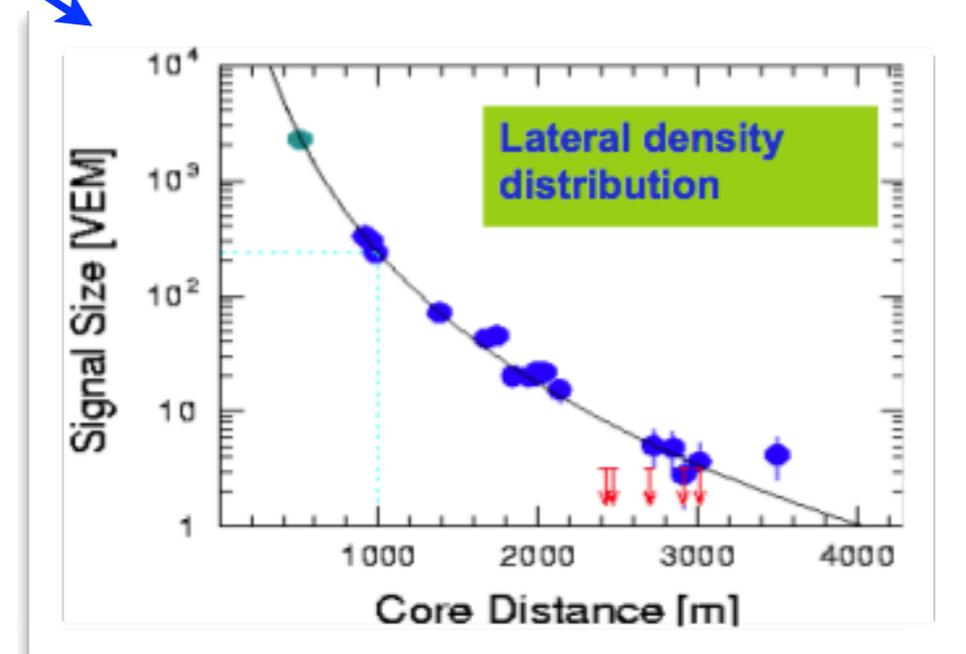
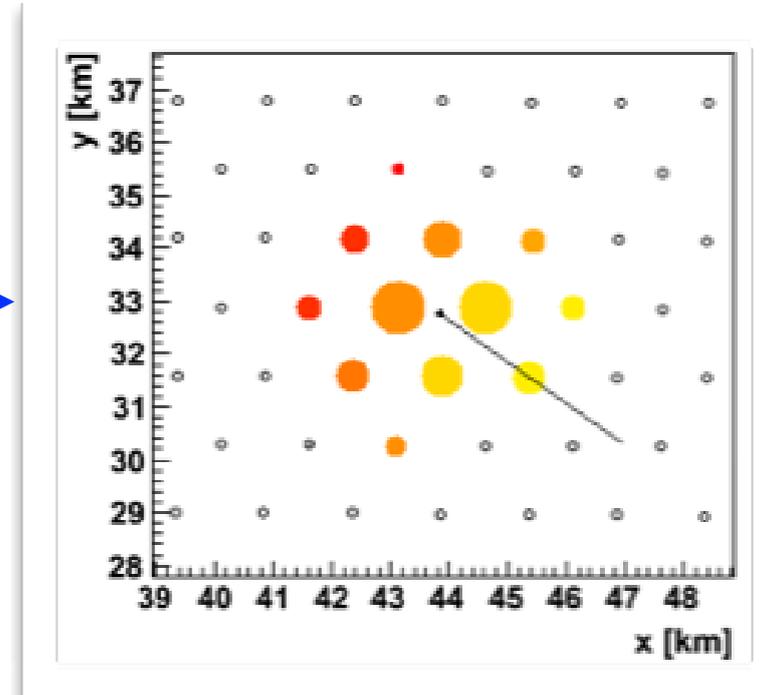
Détecteurs de surface

- Échantillonnage de la gerbe créée par le RCUHE au sol avec des détecteurs individuels
- Surface totale et espacement des détecteurs sont fonctions des énergies considérées
 - ▶ KASCADE (10^{15} - 10^{17} eV): 40 000 m², 252 détecteurs, espacement 13 m
 - ▶ Auger (10^{18} - 10^{20} eV): 3000 km², 1660 détecteurs, espacement 1500 m
- Scintillateurs (KASCADE, AGASA)
- Cuves Tcherenkov à eau (Haverah Park, Auger)



Détecteurs de surface

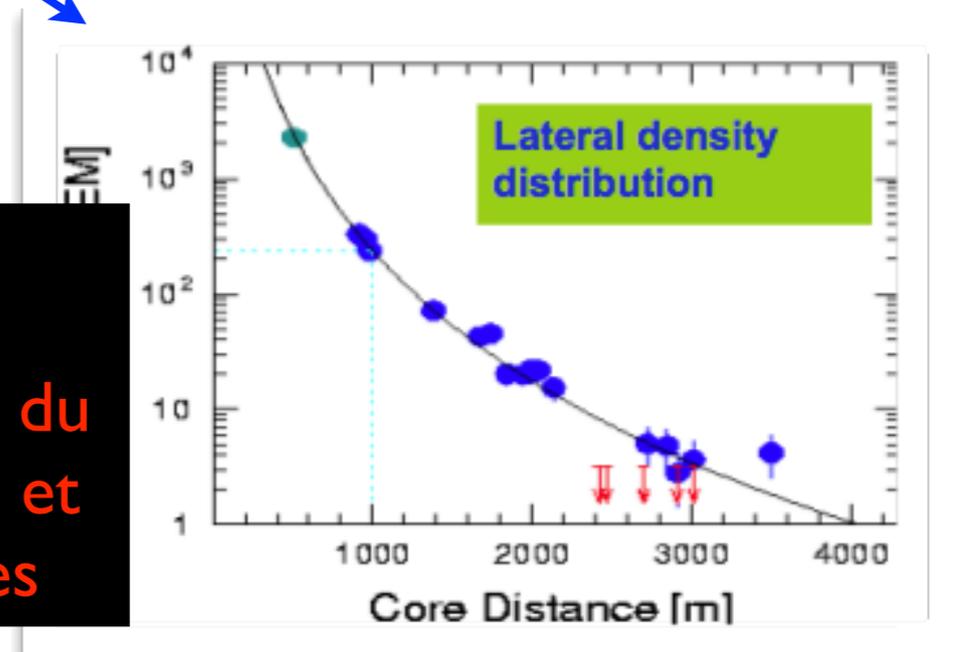
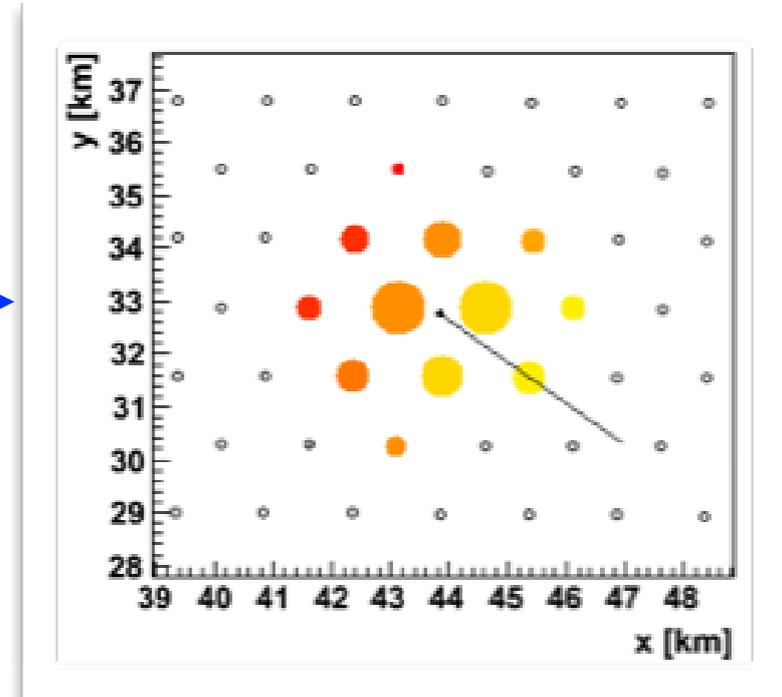
- Les méthodes de reconstruction des gerbes permettent d'obtenir :
 - la direction d'arrivée du RCUHE grâce à la structure temporelle de l'événement;
 - l'énergie du RCUHE primaire grâce à l'intensité du signal des cuves;
 - la nature du RCUHE primaire grâce à la structure de la gerbe.
- L'acceptance est géométrique



Détecteurs de surface

- Les méthodes de reconstruction des gerbes permettent d'obtenir :

- la direction d'arrivée du RCUHE grâce à la structure temporelle de l'événement;
- l'énergie du RCUHE primaire grâce à l'intensité du signal des cuves;
- la nature du RCUHE primaire grâce à la structure de la gerbe.



- L'acceptance est g

Inconvénient :
la relation entre signal et énergie du primaire est issue de simulations et dépend de modèles hadroniques

Détecteurs de fluorescence

- Détectent la lumière UV émise par l'azote excité par les paires e^+e^-
- Proportionnelle au nombre de particules électromagnétiques dans la gerbe, et donc à l'énergie du primaire
- Seulement les nuits sans Lune, cycle utile limité (~12%)
- Technique imposée par *Fly's eye* dans les années 80
- Incertitude principale : fluorescence yield
- Mesure calorimétrique, indépendante des modèles hadroniques



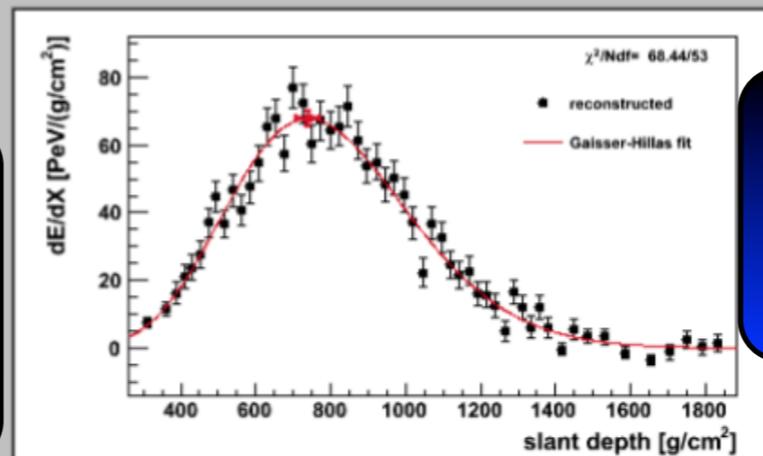
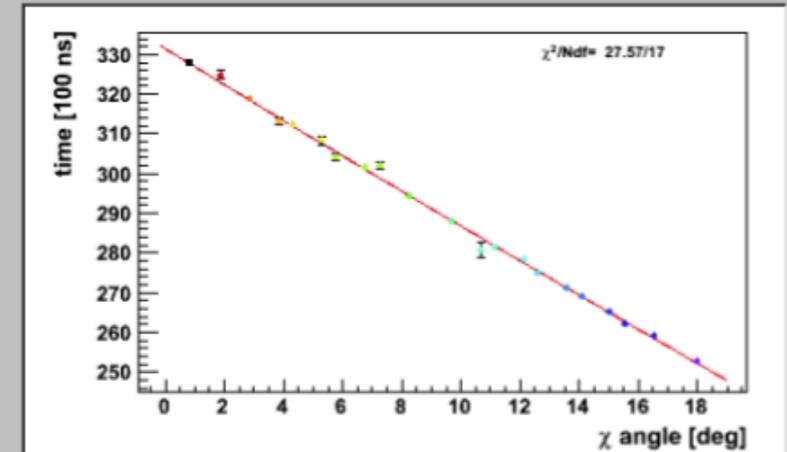
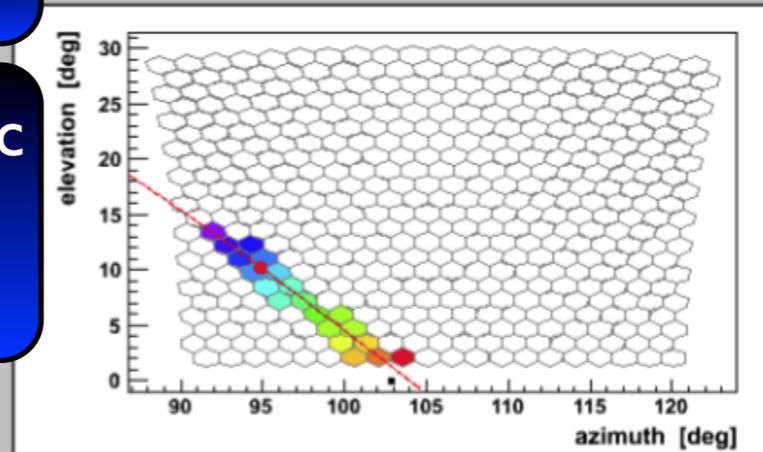
Détecteurs de fluorescence

- Une image UV du développement de la gerbe est prise par les photomultiplicateurs contenus dans chaque pixel

Reconstruction de la...

...géométrie de la gerbe avec l'évolution temporelle du déclenchement des pixels

...composition du primaire à l'aide de la profondeur du maximum de développement (X_{\max})



...énergie du primaire par intégration du profil du signal

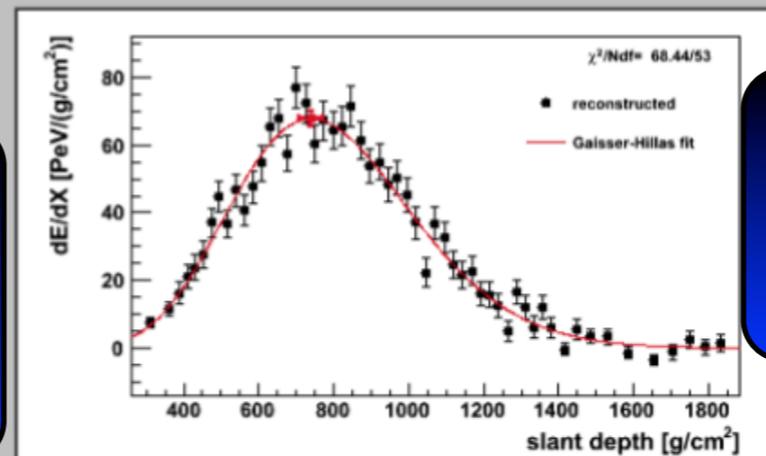
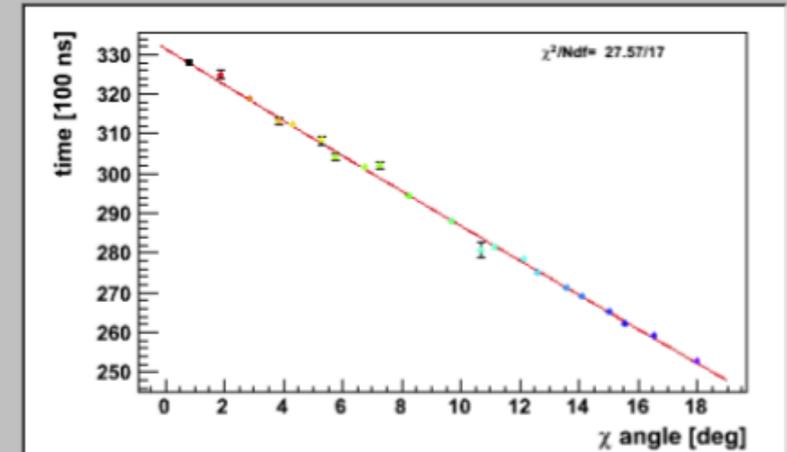
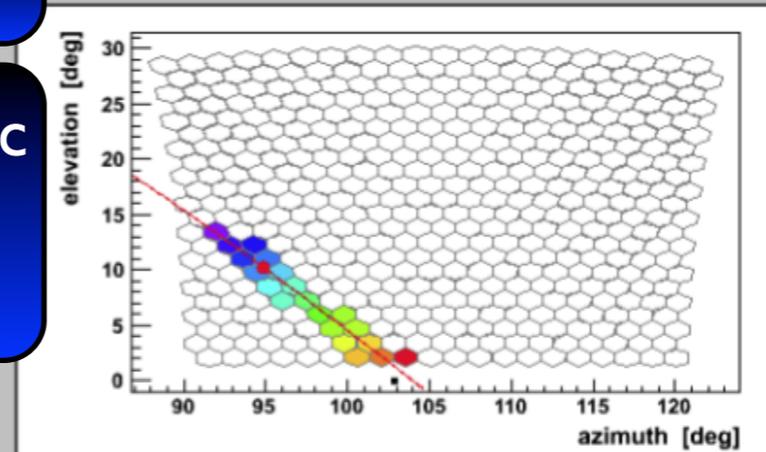
Détecteurs de fluorescence

- Une image UV du développement de la gerbe est prise par les photomultiplicateurs contenus dans chaque pixel

Reconstruction de la...

...géométrie de la gerbe avec l'évolution temporelle du déclenchement des pixels

...composition du primaire à l'aide de la profondeur du maximum de développement (X_{\max})



...énergie du primaire par intégration du profil du signal

Inconvénient :

l'acceptance dépend de l'énergie

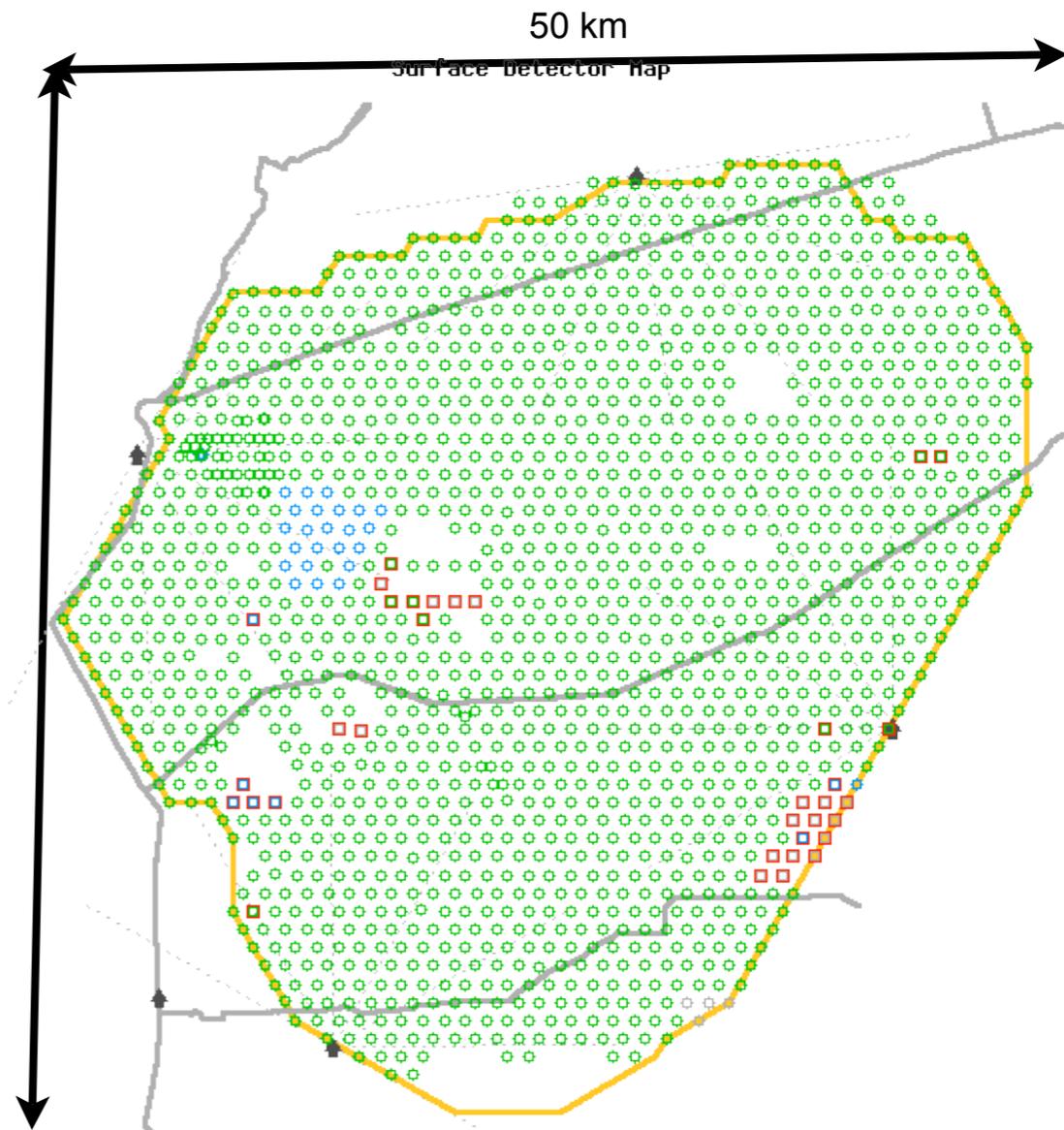
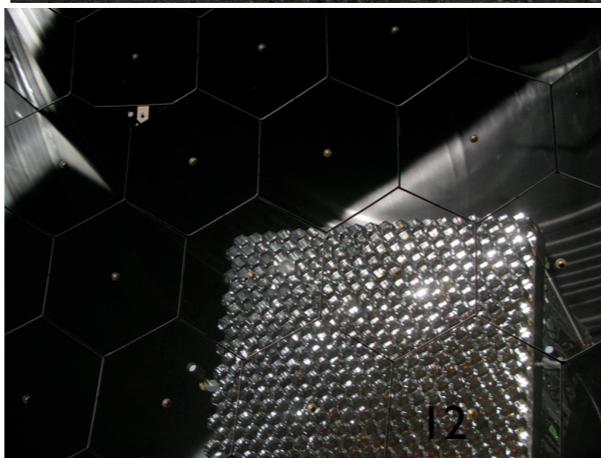
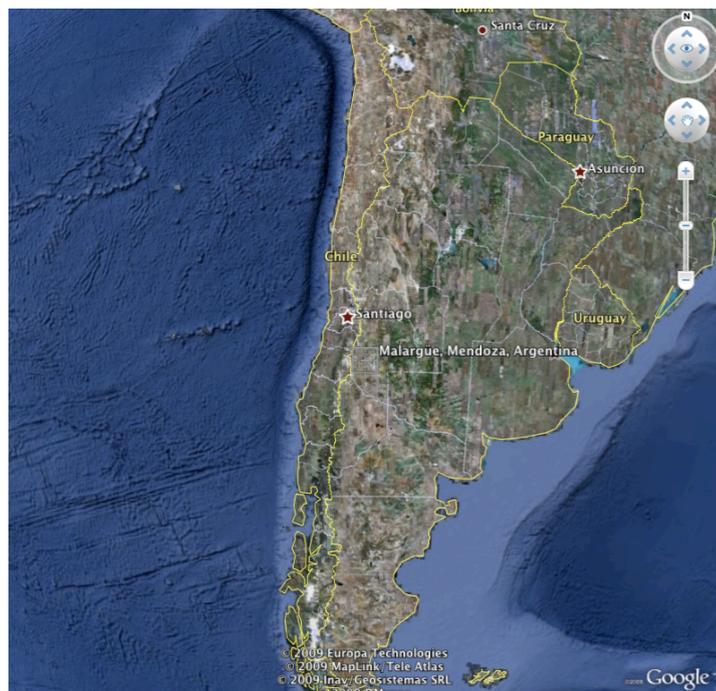
L'observatoire Pierre Auger :

la révolution hybride

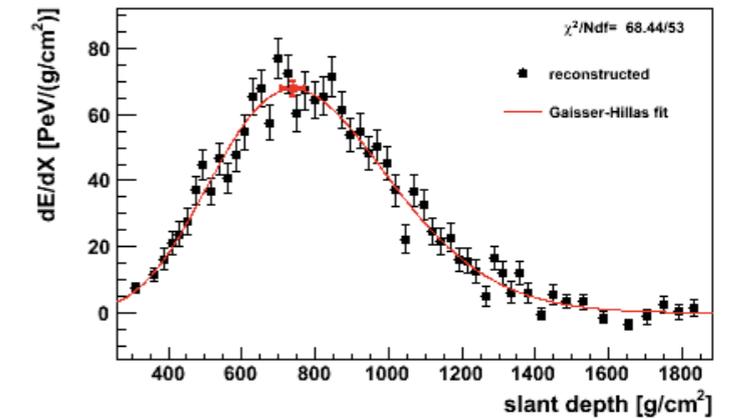
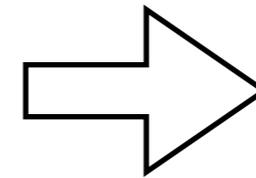
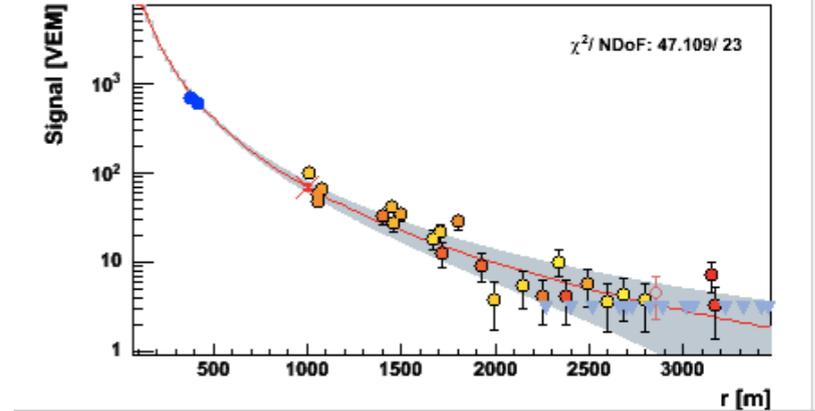
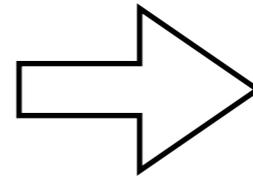
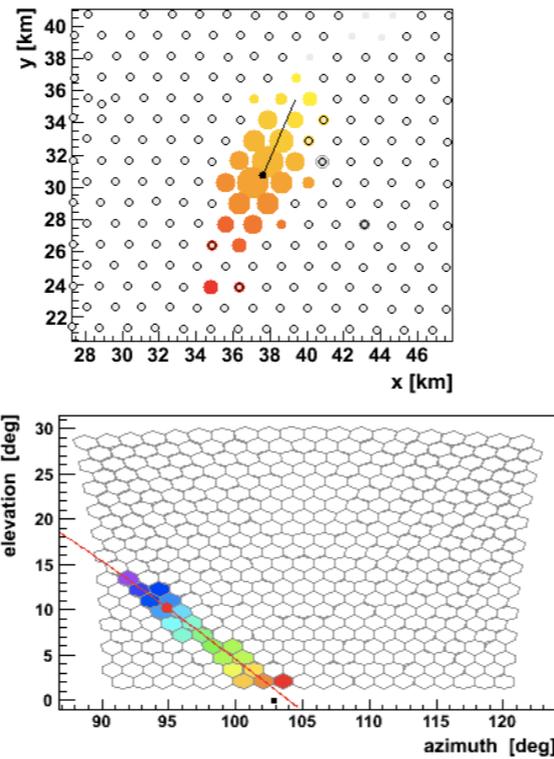
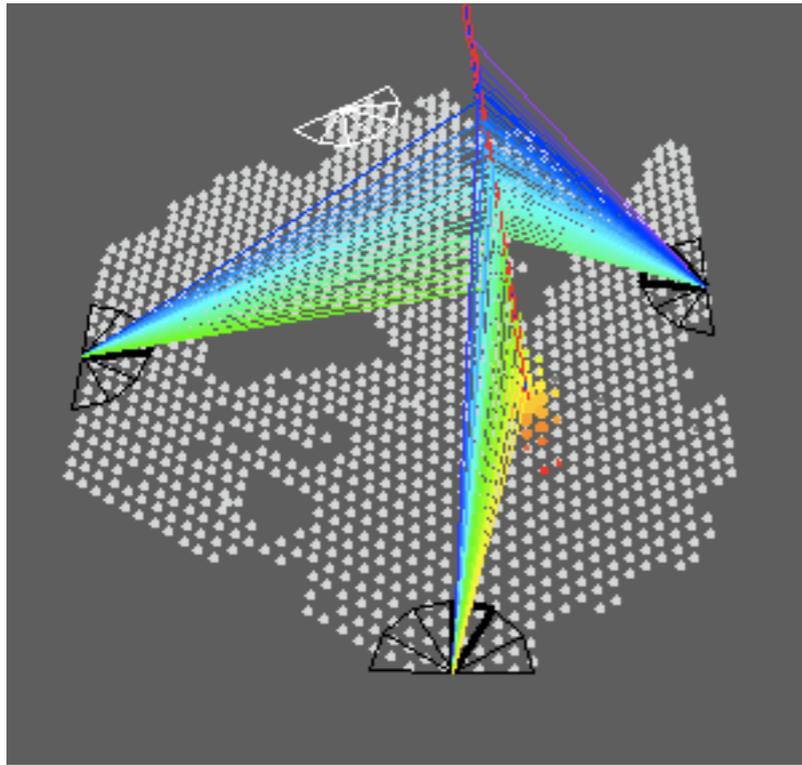
- Situé à Malargüe (Argentine, 1400 m a.s.l)
- 1600 Cuves Tcherenkov à eau, espacement 1500 m
→ surface couverte au sol par le réseau : 3000 km²
- 4 détecteurs de fluorescence observent le réseau

Surface immense pour une statistique inédite au-delà de 10^{19} eV

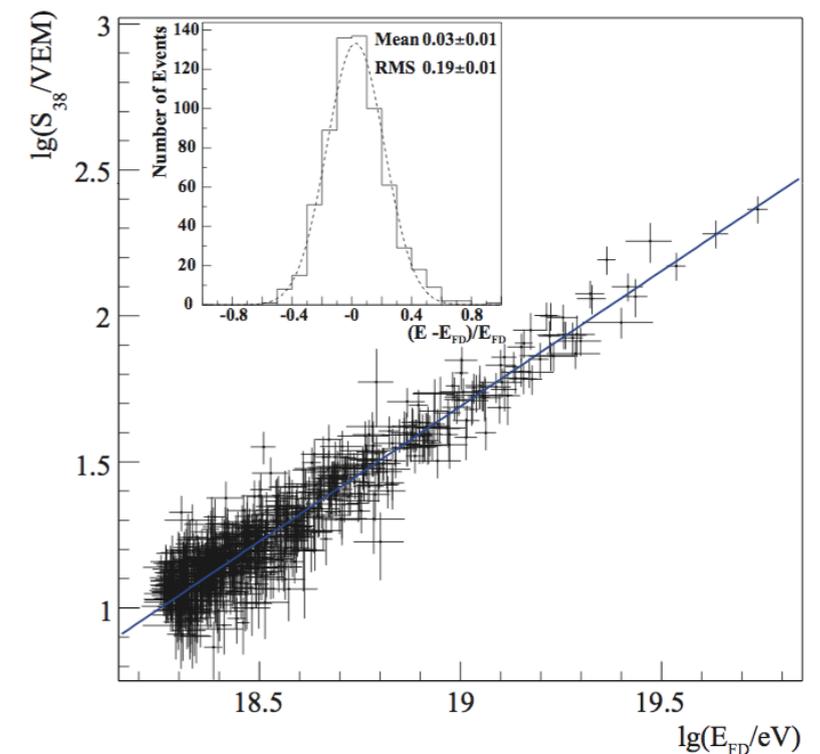
➔ Détection hybride pour une meilleure compréhension de la physique des gerbes



L'observatoire Pierre Auger



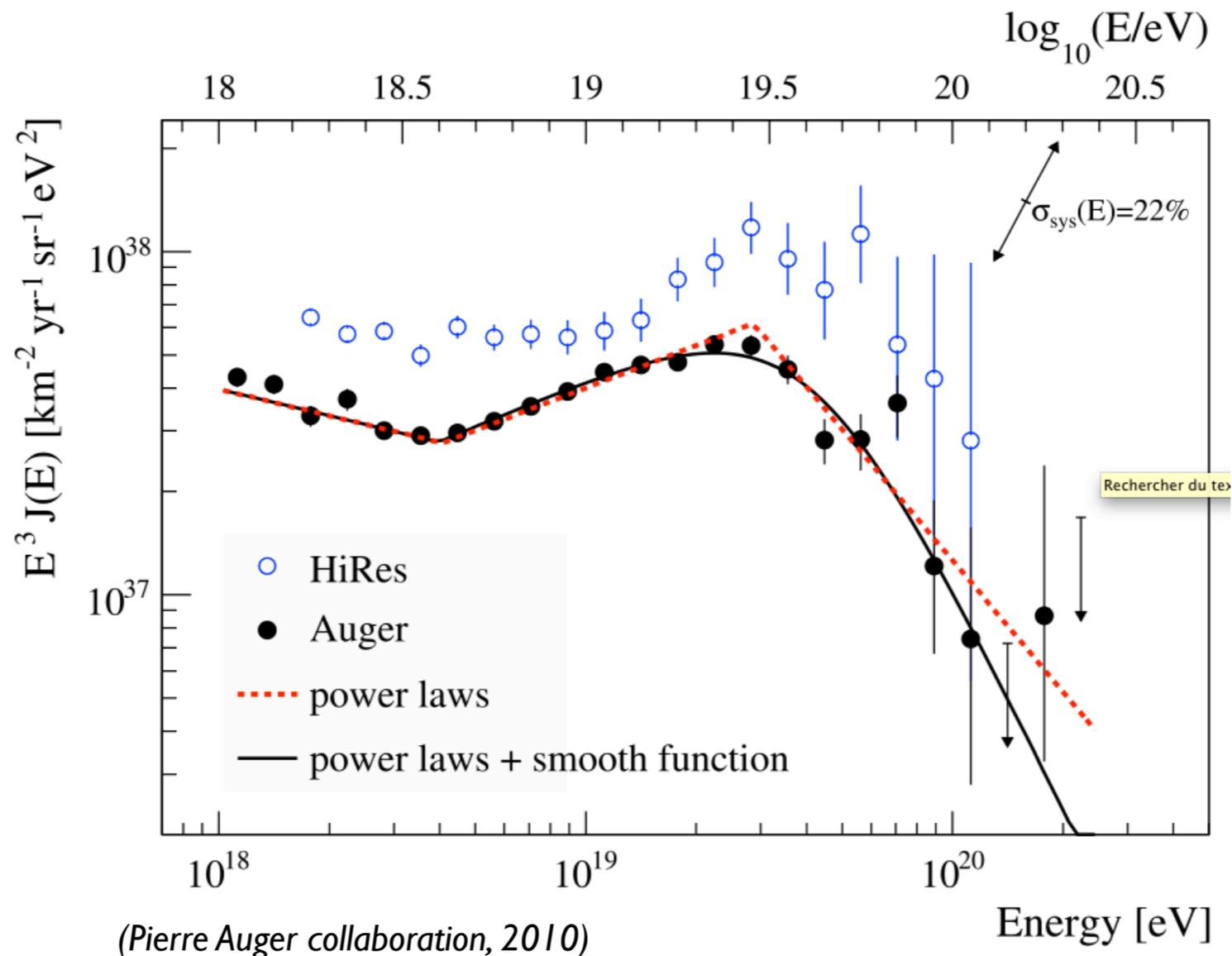
- On peut calibrer la relation signal/énergie avec les événements hybrides
 - ▶ Le SD donne le S_{1000}
 - ▶ Le FD donne une mesure calorimétrique de l'énergie
- Calibration sans utilisation des simulations
 - ▶ Pas de dépendance aux modèles hadroniques
 - ▶ Changement de composition pris en compte
 - ▶ Résolution mesurée



Résultats d'Auger : spectre d'énergie

AGASA → HiRes → Auger

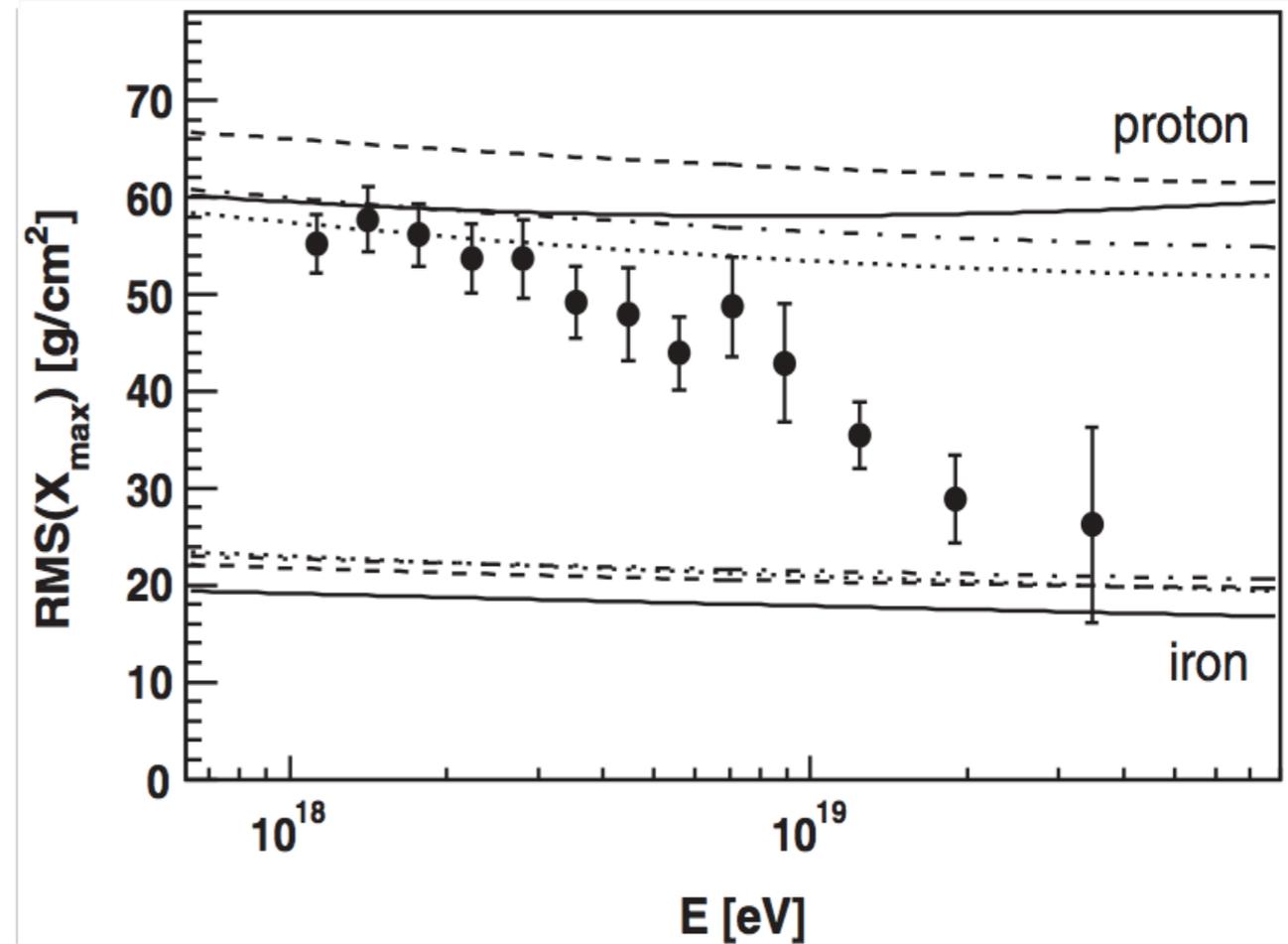
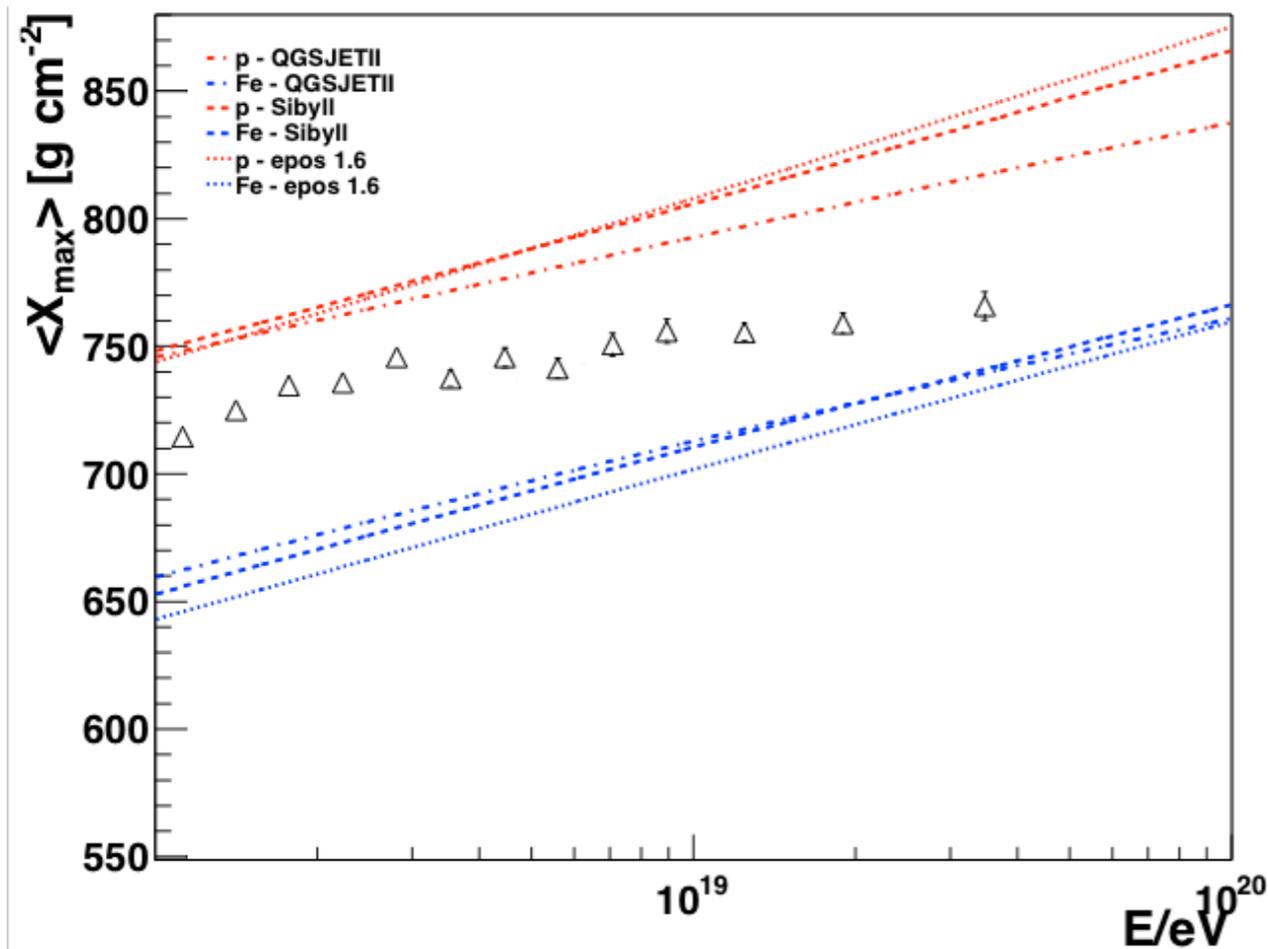
Caractéristiques
spectrales mesurées
à haute significativité



69 événements >
55 EeV

Coupure
confirmée

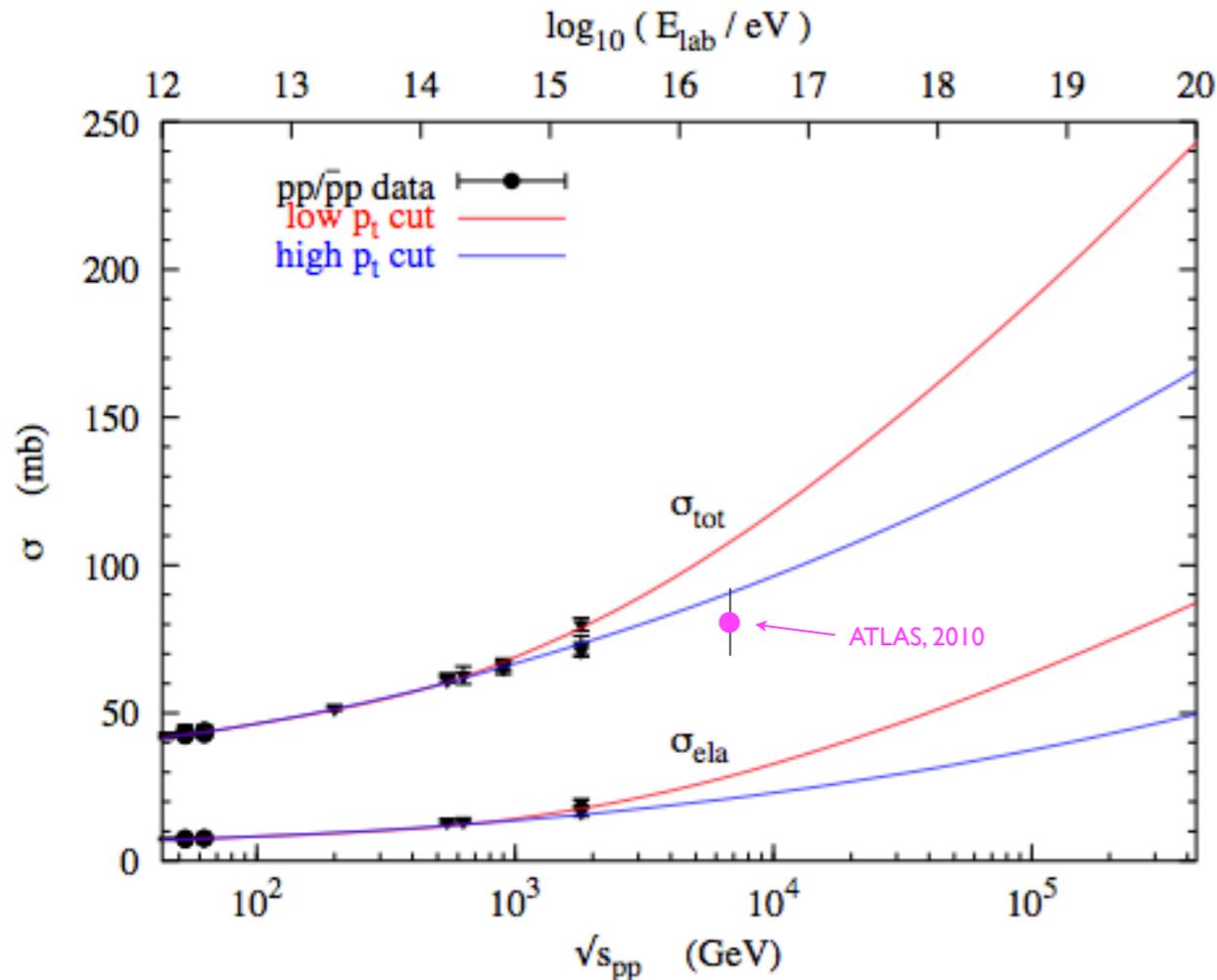
Résultats d'Auger : composition



(Pierre Auger collaboration, 2010)

- Composition mixte à toutes les énergies au-delà de 1 EeV
- Évolution plus pentue sous la cheville : transition Gal/extra-Gal ?
- Composition qui s'alourdit au-delà de 10 EeV
- Pourquoi ? Coupure dans l'accélération des protons à la source ? Nouvelle physique ?

Résultats du LHC : contraintes

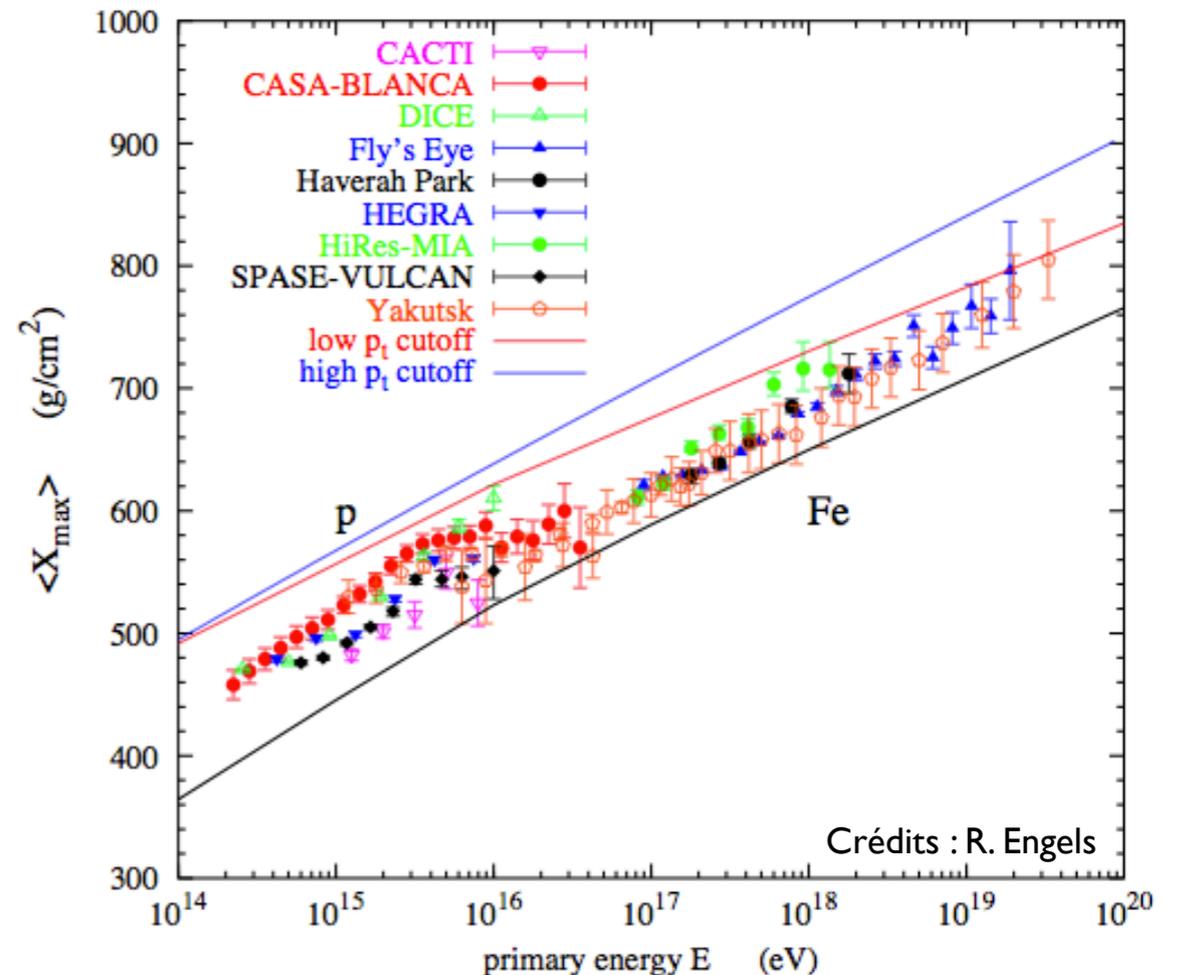


- Sections efficaces d'interaction proton-proton inélastique à $\sqrt{s} = 7$ TeV mesurées par ATLAS :
- Modèles : différence faible à 7 TeV mais...
- QGSJET II.03 et SIBYLL 2.1 → extrapolations section efficace trop élevée

- Implications sur la physique des gerbes atmosphériques

IMPLICATIONS RCUHE :

Favorise une composition lourde aux plus hautes énergies !



Crédits : R. Engels

Le spectre d'énergie et la composition

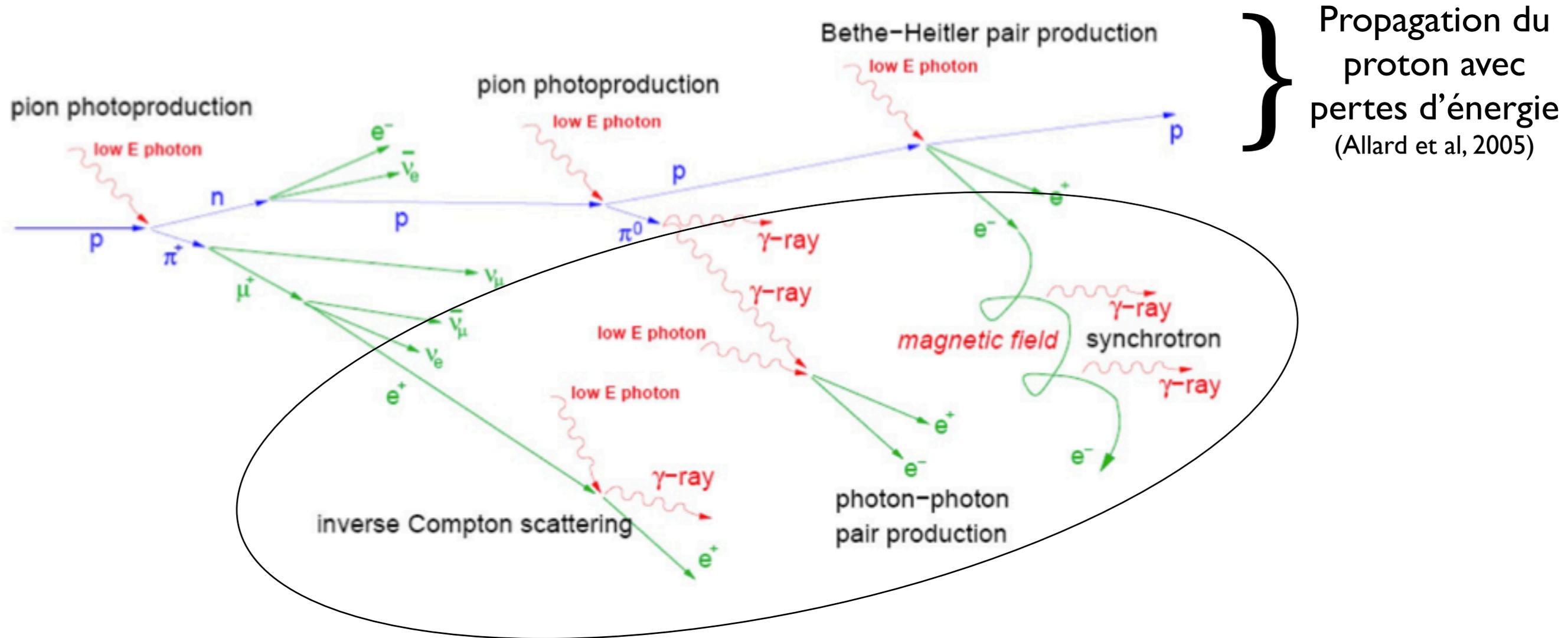
Les RCUHE et l'Observatoire Pierre Auger

Le spectre d'énergie et la composition

Le spectre angulaire

Les multi-messagers

Propagation des RCUHE



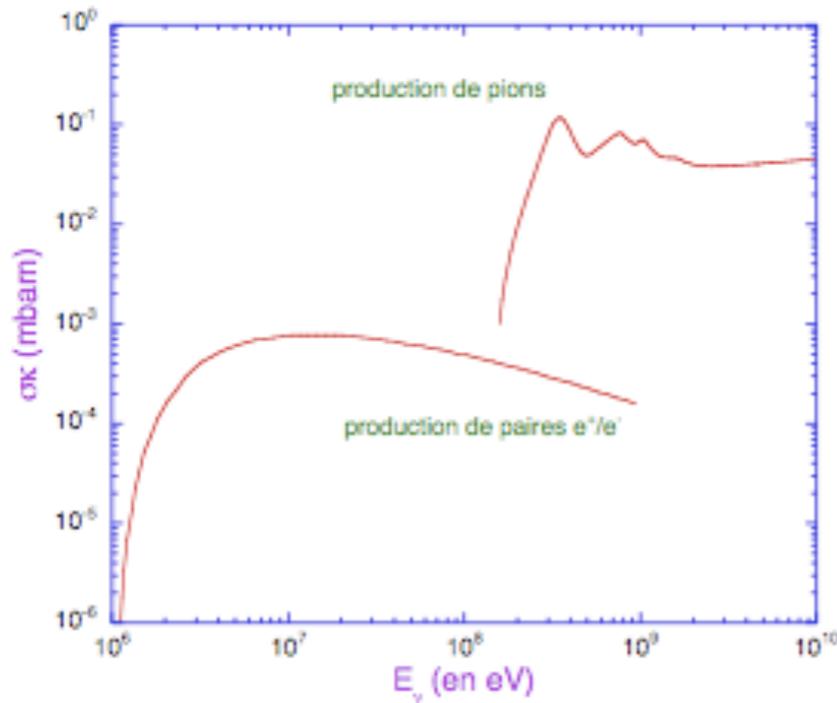
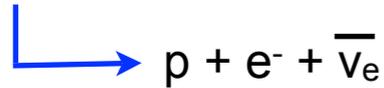
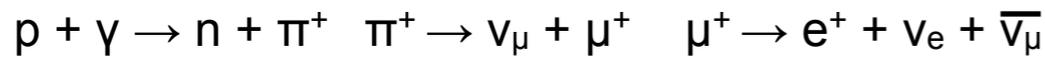
Partie électromagnétique
(Decerprit et al, 2011)

Interactions des RCUHE

Protons

- pertes par expansion
- production de paires
 $P + \gamma \rightarrow p + e^+ / e^-$ - processus faible inélasticité
 Interaction avec photons CMB $\sim 10^{18}$ eV
- Production de pions et mésons
 $n + \gamma \rightarrow n' + \Pi$ - grande inélasticité ($\sim 20\%$)
 Seuil d'interaction avec CMB $\sim 7 \cdot 10^{19}$ eV

Production de neutrinos :



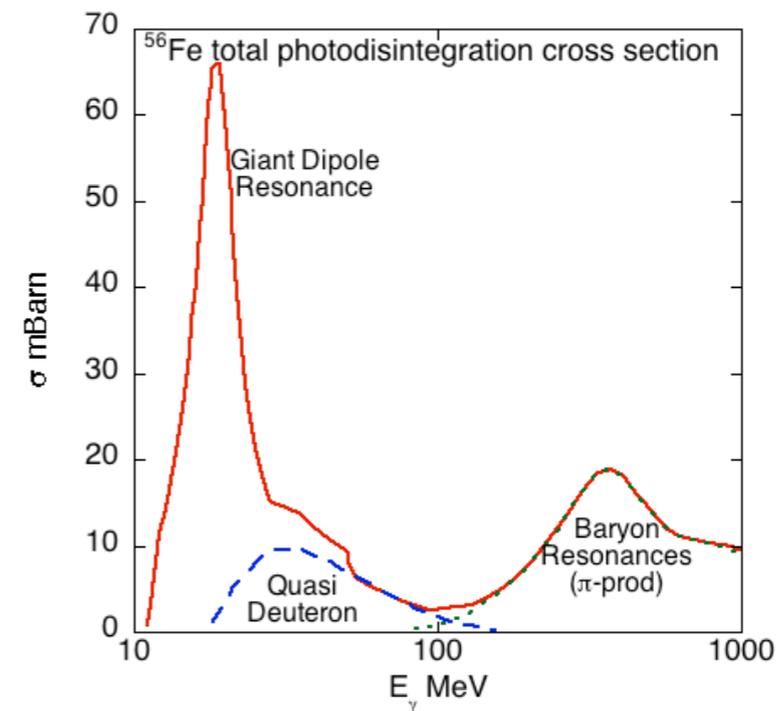
Noyaux

Deux types de processus

- Processus diminuant le facteur de Lorentz
 - pertes par expansion
 - production de paires (seuil $\sim A \times 10^{18}$ eV)
- Processus modifiant peu le facteur de Lorentz
 - Giant Dipole Resonance (GDR); seuil $\sim 10 - 20$ MeV + grande σ et + bas seuil (*Khan et al., 2004*)
 - Quasi-Deuteron process (QD); seuil ~ 30 MeV (*Rachen 1996, PSB 1976*)
 - Production de pion (BR); ~ 145 MeV (*Rachen 1996*)

Production de neutrinos :

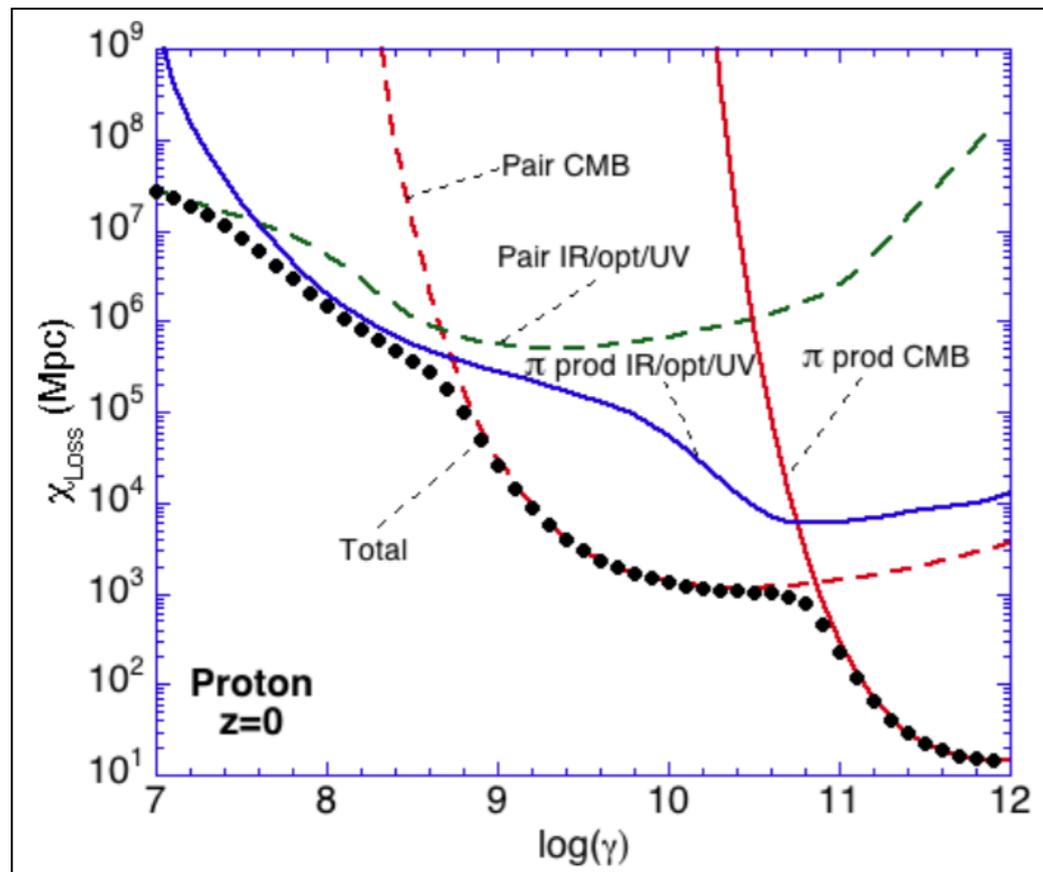
- π -prod des p et n; β -decay des n secondaires
- désintégration du π produit par BR



Allard, Decerprit, Parizot et al., 2008

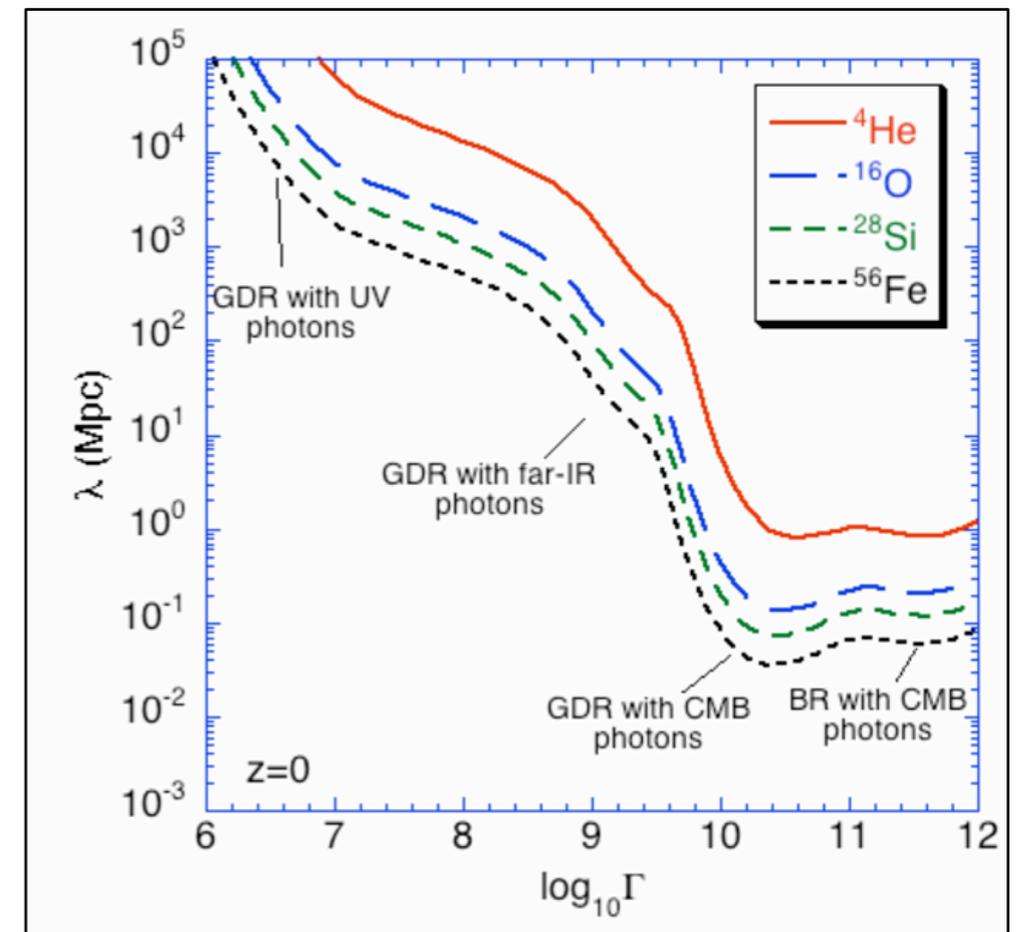
Interactions des RCUHE

Protons



Longueur d'atténuation des protons en fonction de leur facteur de Lorentz

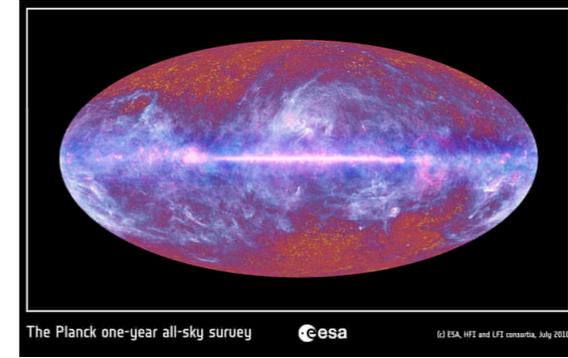
Noyaux



Libre parcours moyen (LPM) de quelques noyaux en fonction de leur facteur de Lorentz

Fonds de photons

Dans le milieu extragalactique (densité très faible), les RCUHE interagissent principalement avec les photons des fonds



IR/Optique/UV

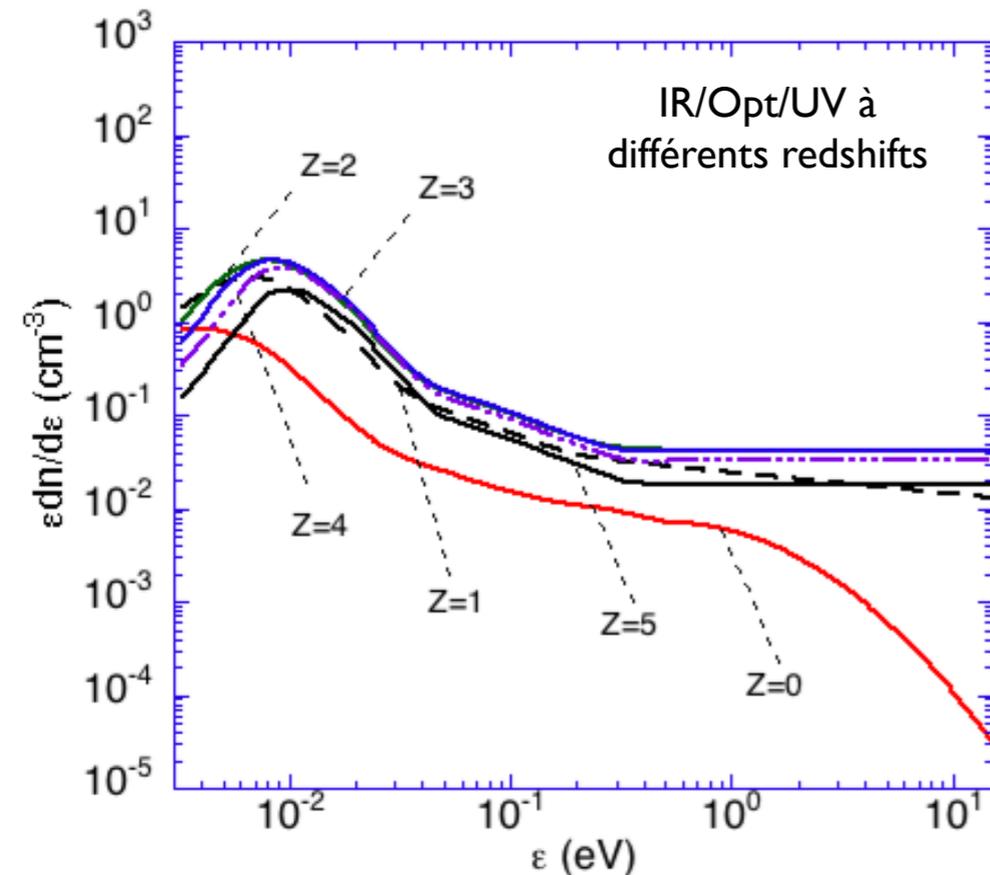
CMB

Radio

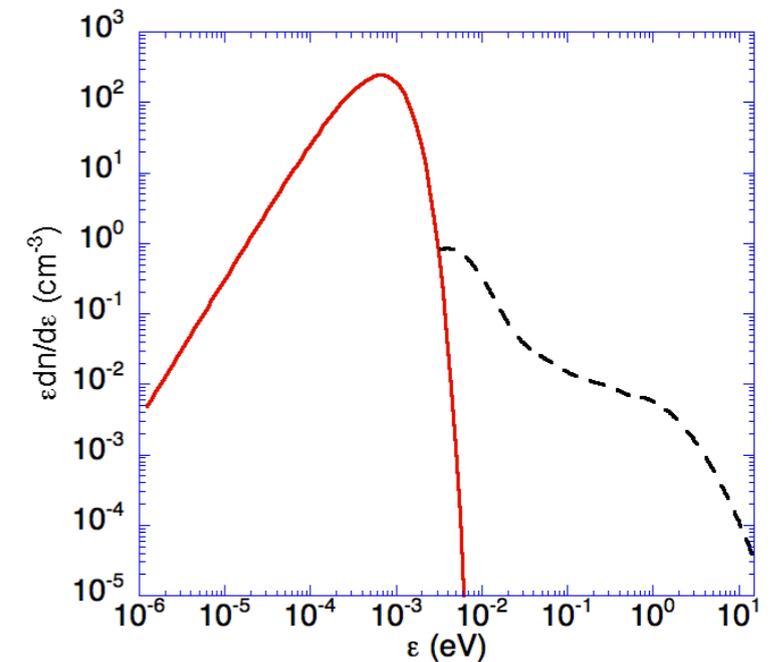
Évolution cosmologique méconnue

- Crucial pour propagation des noyaux
- Évolution cosmologique fonction du taux de formation d'étoiles (SFR), leur vieillissement et métallicité (surtout UV)... non triviale ! Contraintes par données astro. (Spitzer tel.)

- Bien connu, corps noir $T = 2.726$ K,
- évolution cosmologique triviale : $(E_{CR,z}) = \lambda_{CR} (E_{CR} \times (1+z), z=0) / (1+z)^3$
- De loin le fond le + **dense**



On utilise *Kneiske et al. (2010)* pour l'évolution des fonds IR/Opt/UV



Densité fonds CMB (rouge) et IR/Opt/UV (noir) à $z = 0$

Modèle numérique

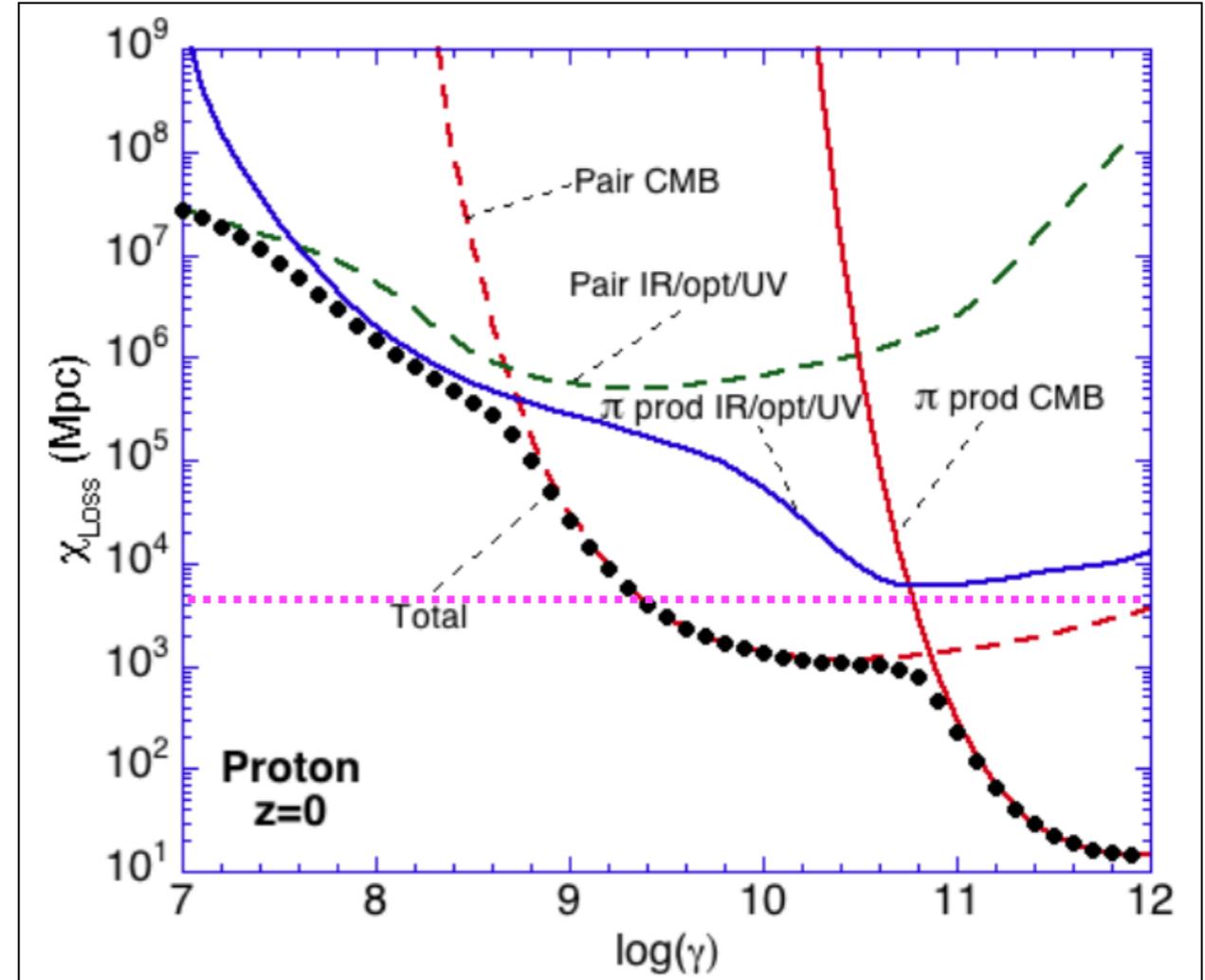
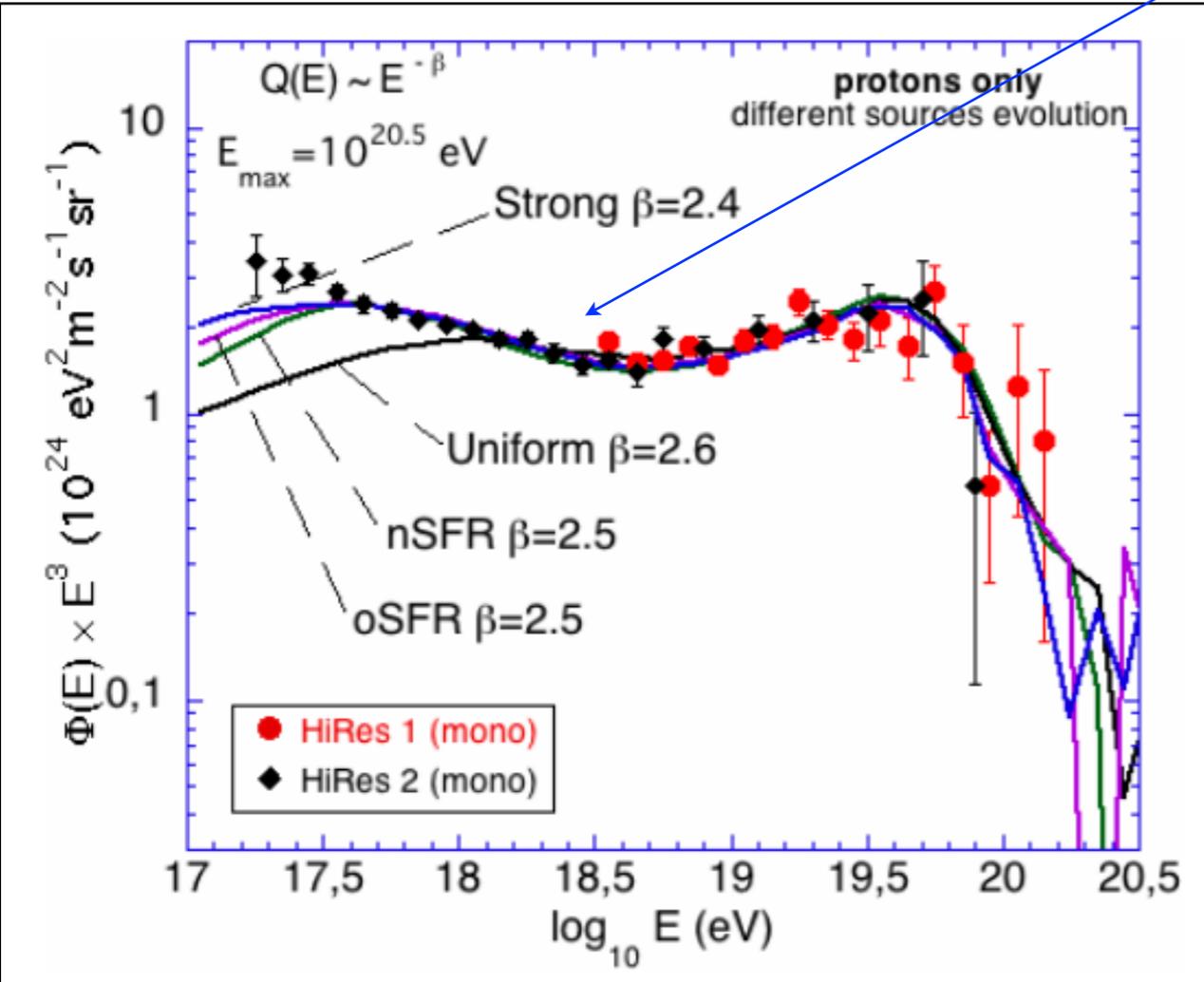
- On propage des RCUHE depuis une distribution continue de sources
- On fixe la composition à la source
- L'énergie maximale d'accélération à la source (E_{\max}) et l'indice spectral du spectre source (β) sont laissés libres
- On ajuste nos modèles aux données (**spectre d'énergie**)

Modèles vs données

Ajuster nos modèles au spectre

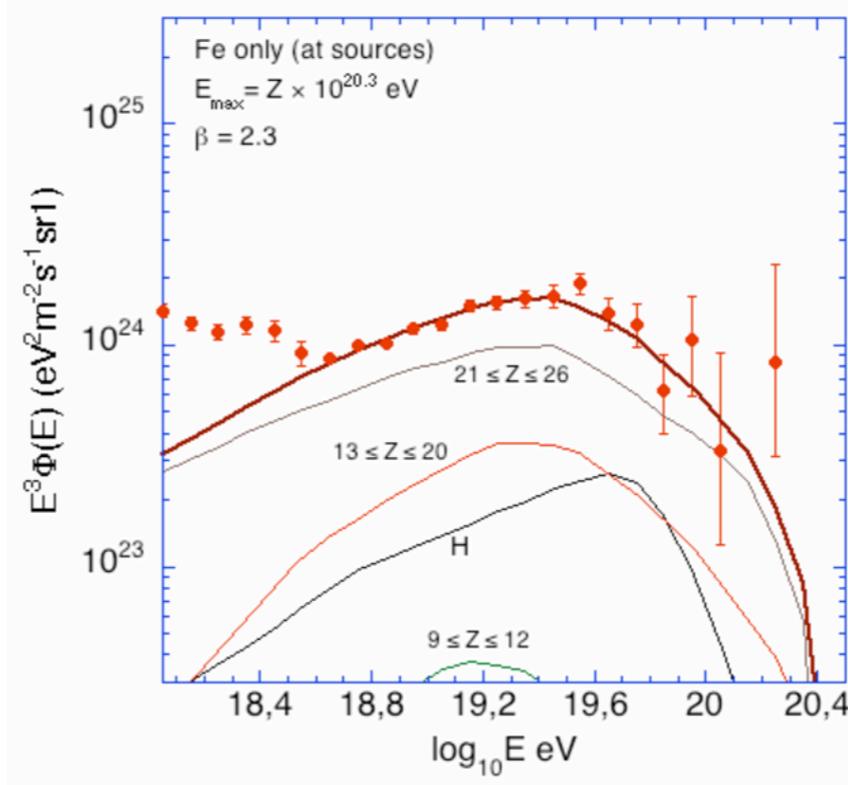
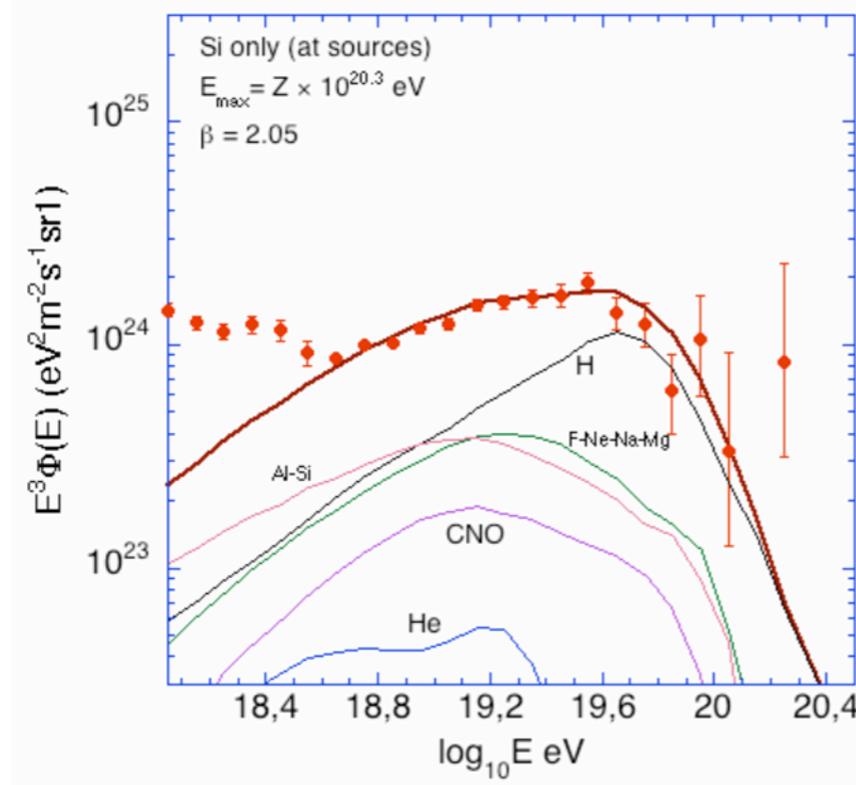
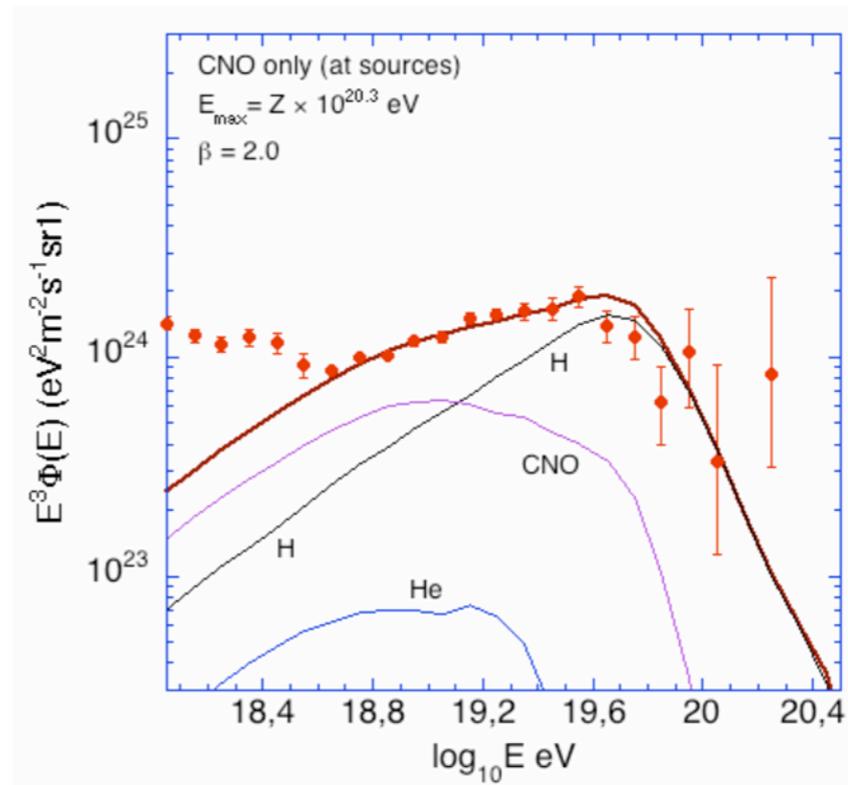
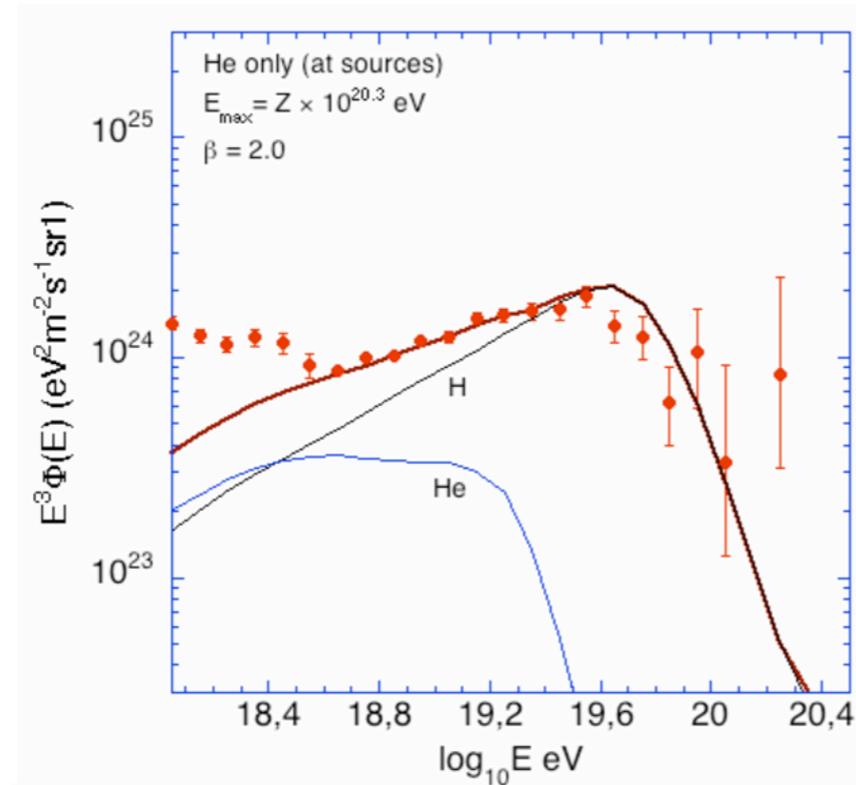
Composition **pur-proton**,
pour différentes évolutions des sources
($\beta=2.6$ $E_{\max}=10^{20.5}$ eV pour des sources
évoluant uniformément avec z)

Dans ce cas, la cheville peut être reproduite
par la composante extragalactique
(pas de transition Galactique/extragalactique)



Longueur d'atténuation des protons en
fonction de leur facteur de Lorentz

Modèles de RCUHE vs donnés

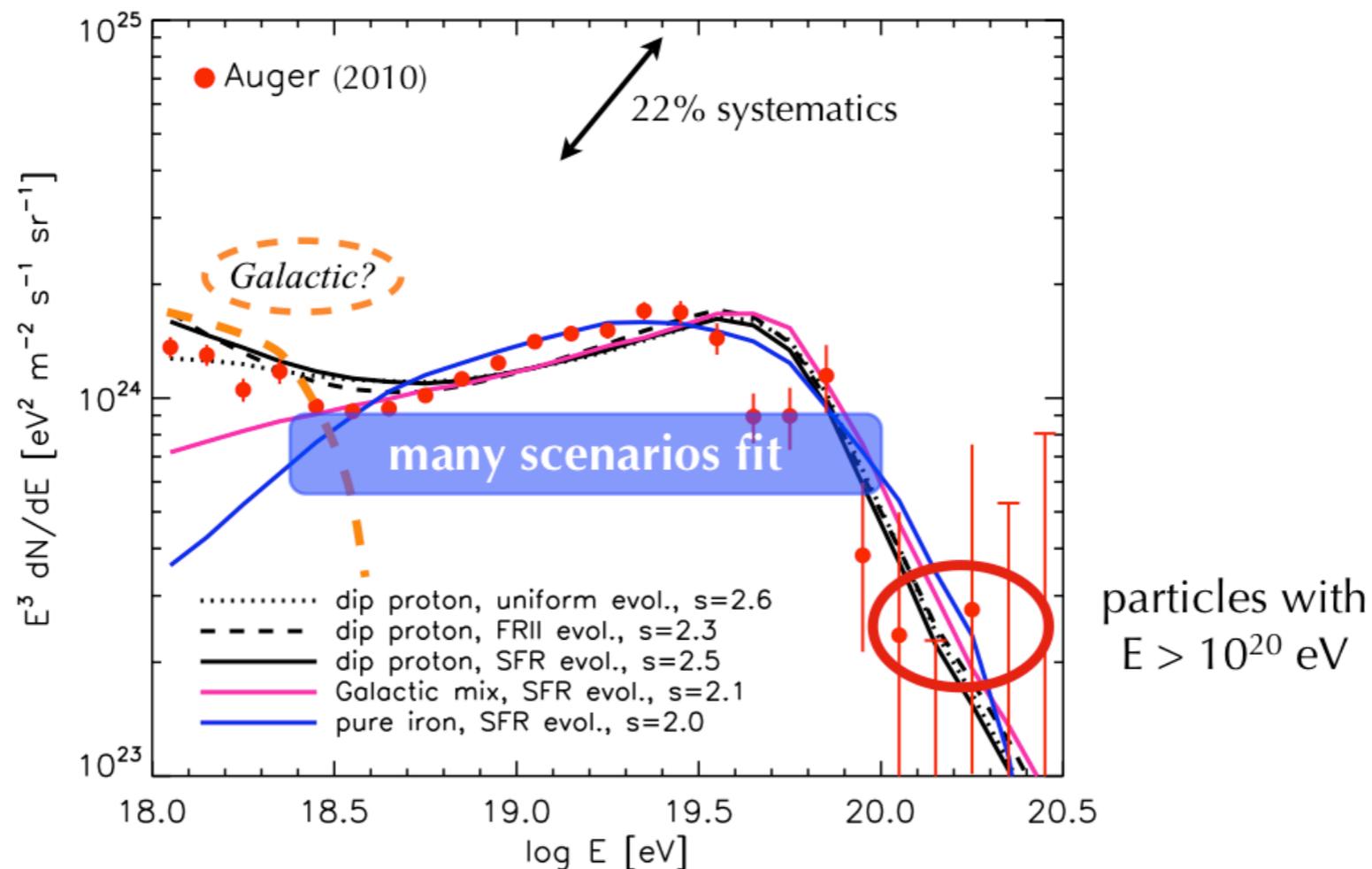


Allard, Decerprit,
Parizot et al., 2008

- Le spectre d'Auger peut être reproduit avec toute composition aux sources
- Aux plus hautes énergies, la composition est soit proton soit fer

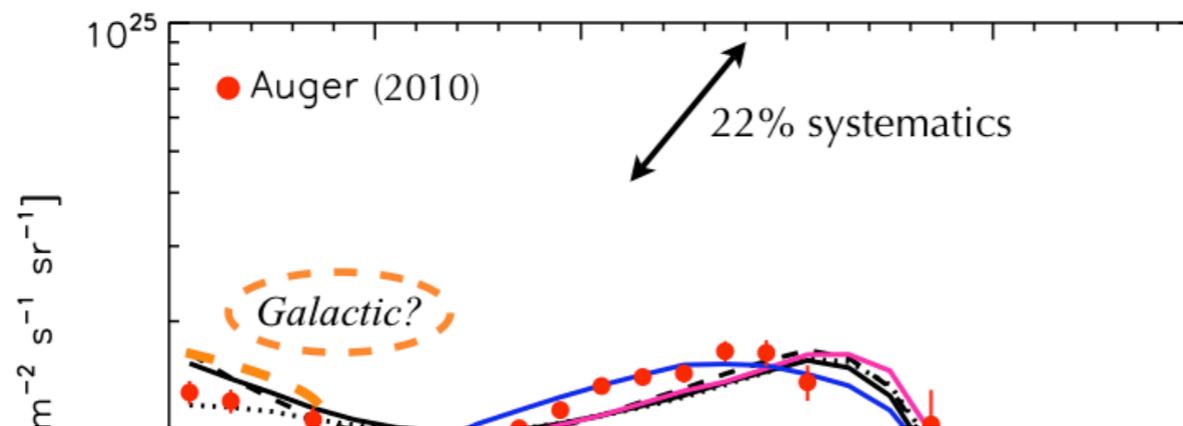
Modèles de RCUHE vs donnés

- Il est possible d'ajuster les spectres propagés de nos modèles au spectre d'Auger pour toute composition à la source
 - ▶ Forme du spectre propagé variable mais toujours compatible
 - ▶ Composition riche en protons secondaires
- ➔ Peu de contraintes sur nos modèles si une abondance importante de protons est observée au-delà de 10^{19} eV

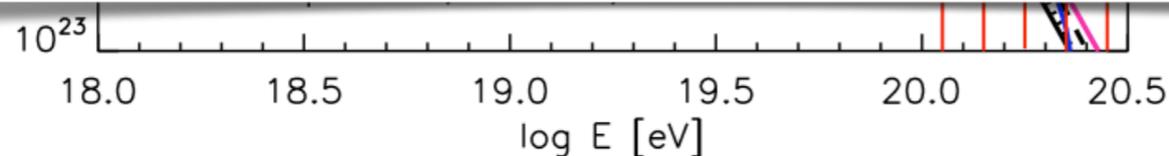


Modèles de RCUHE vs donnés

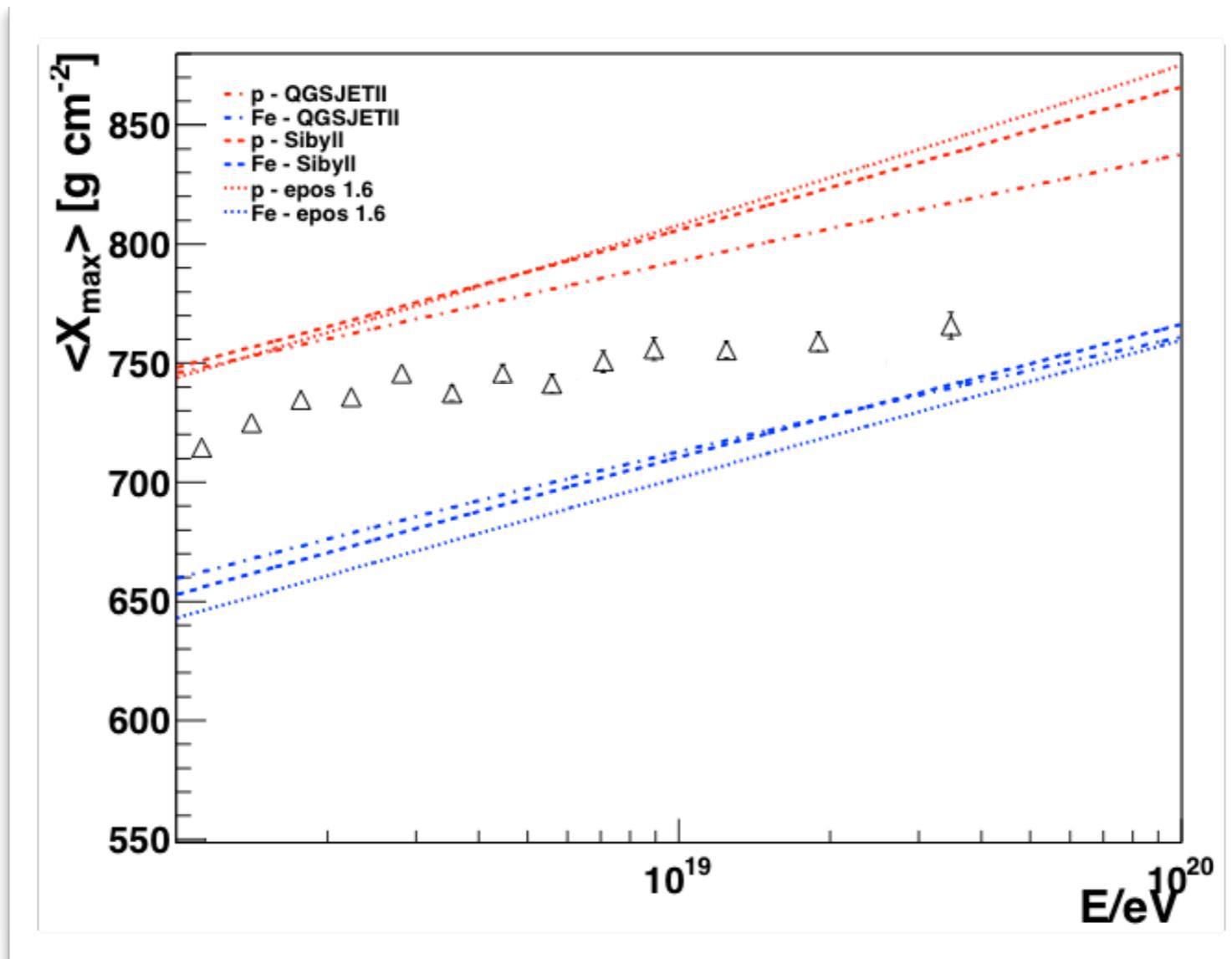
- Il est possible d'ajuster les spectres propagés de nos modèles au spectre d'Auger pour toute composition à la source
 - ▶ Forme du spectre propagé variable mais toujours compatible
 - ▶ Composition riche en protons secondaires
- ➔ Peu de contraintes sur nos modèles si une abondance importante de protons est observée au-delà de 10^{19} eV



Il nous faut caractériser un modèle compatible avec le spectre
ET les données de composition



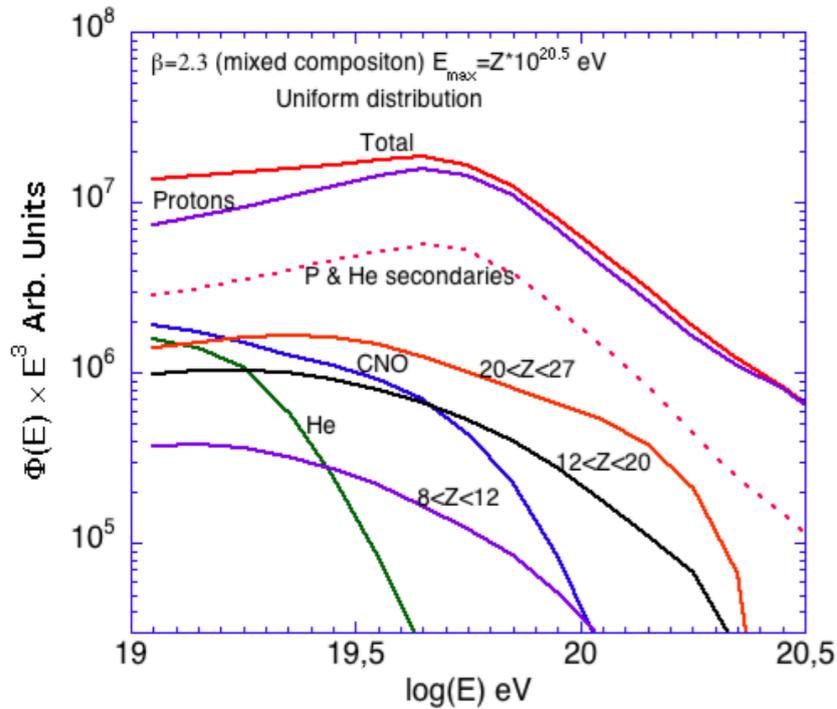
Données de composition



Alourdissement avec l'énergie

Origine de cet alourdissement ?

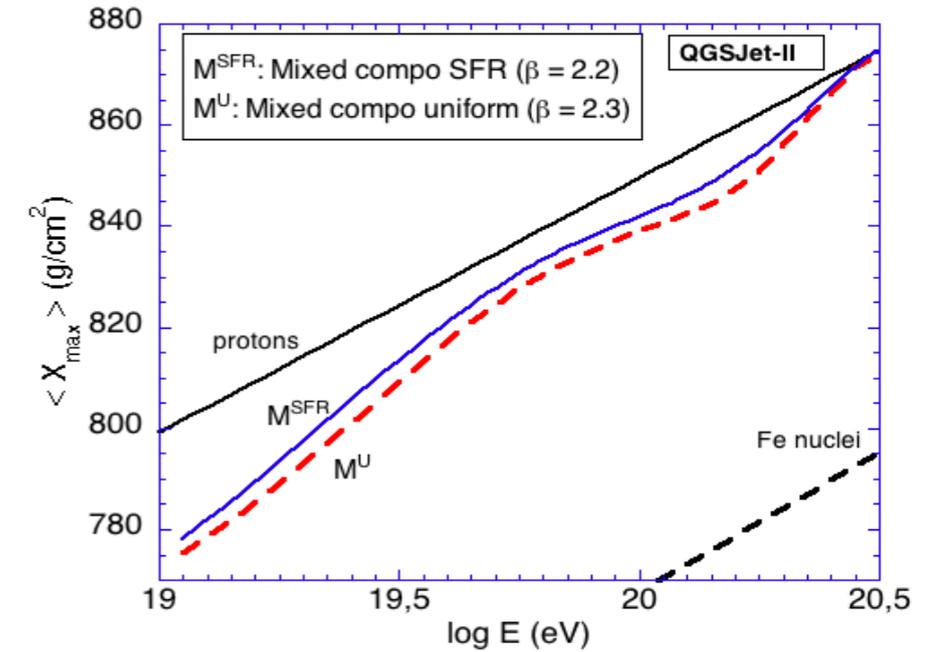
Un effet de propagation à UHE ?



Au-dessus de $10^{19.7}$ eV, les protons subissent GZK...

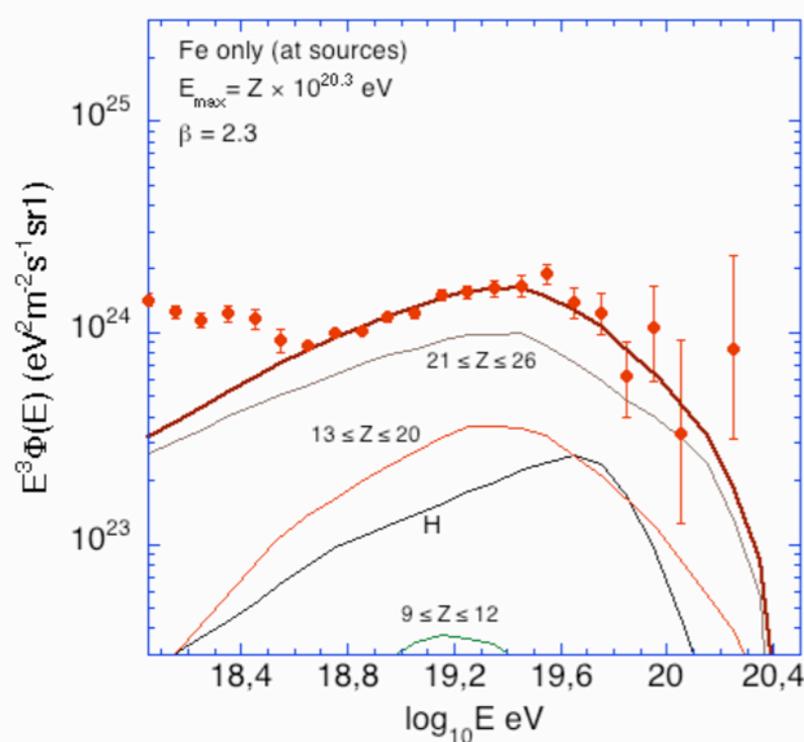
le spectre des protons coupe + abruptement que le spectre des noyaux lourds jusqu'au seuil GDR

La composition pourrait s'alourdir dans cet intervalle d'énergie et redevenir pur-proton



Effet visible sur le X_{max} même pour une composition pauvre en Fe

Pas à la bonne énergie !



Une composition pur-Fe aux sources ?

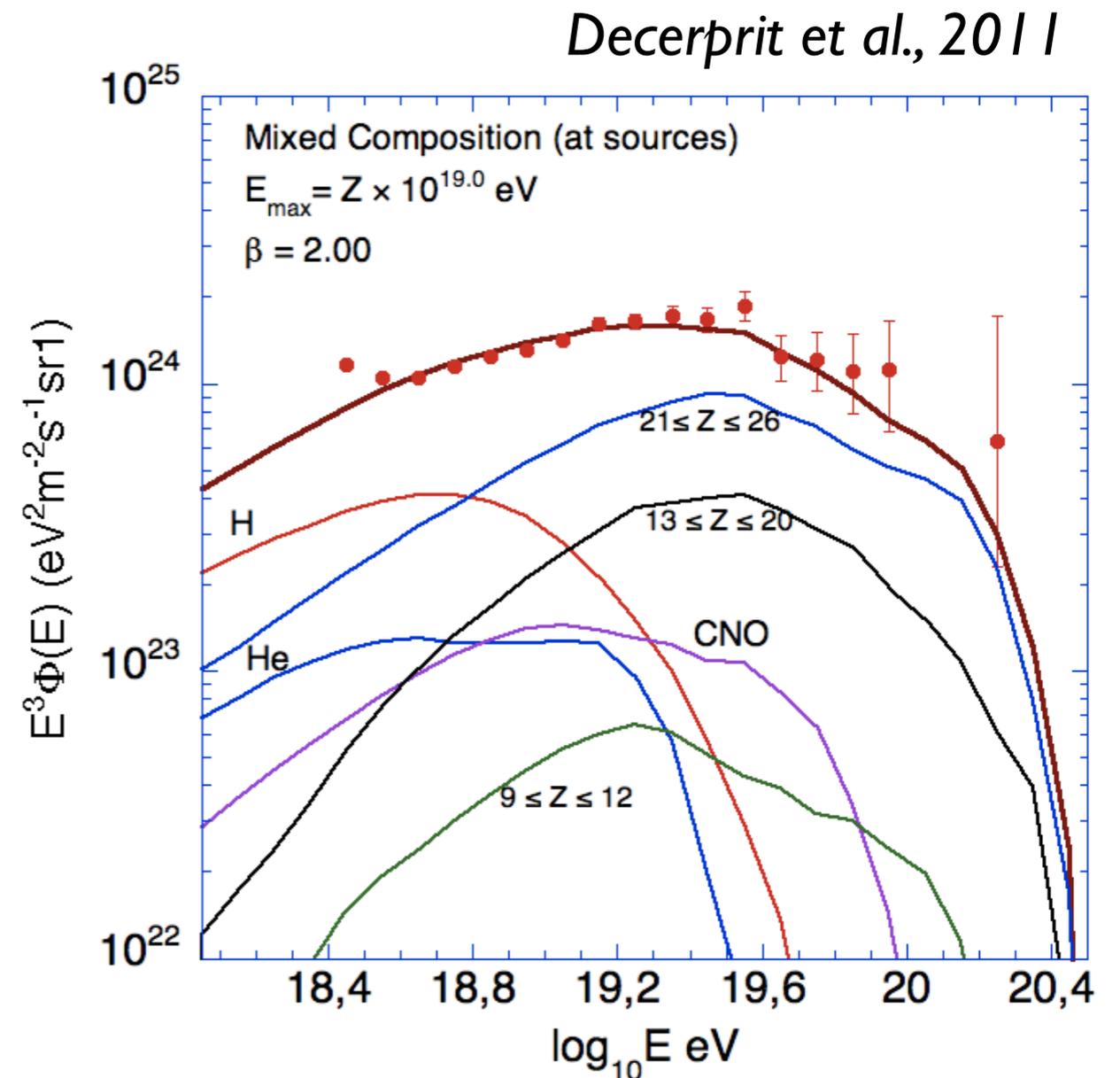
La composition serait lourde à toutes énergies, or les données → composition légère à la cheville !

Origine de cet alourdissement ?

IDÉE : Composition mixte aux sources avec des protons accélérés jusqu'à une E_{\max} faible

Motivation astrophysique :
la plupart des sources n'accéléraient pas les protons aux plus hautes énergies

- S'ajuste bien aux données de spectre et composition
- Composition aux sources de type Galactique enrichie en fer
- À la Terre : légère à la cheville, lourde aux UHE
- Même implication à la cheville que dans les modèles mixtes ou légers



Que nous apprennent les données angulaires ?

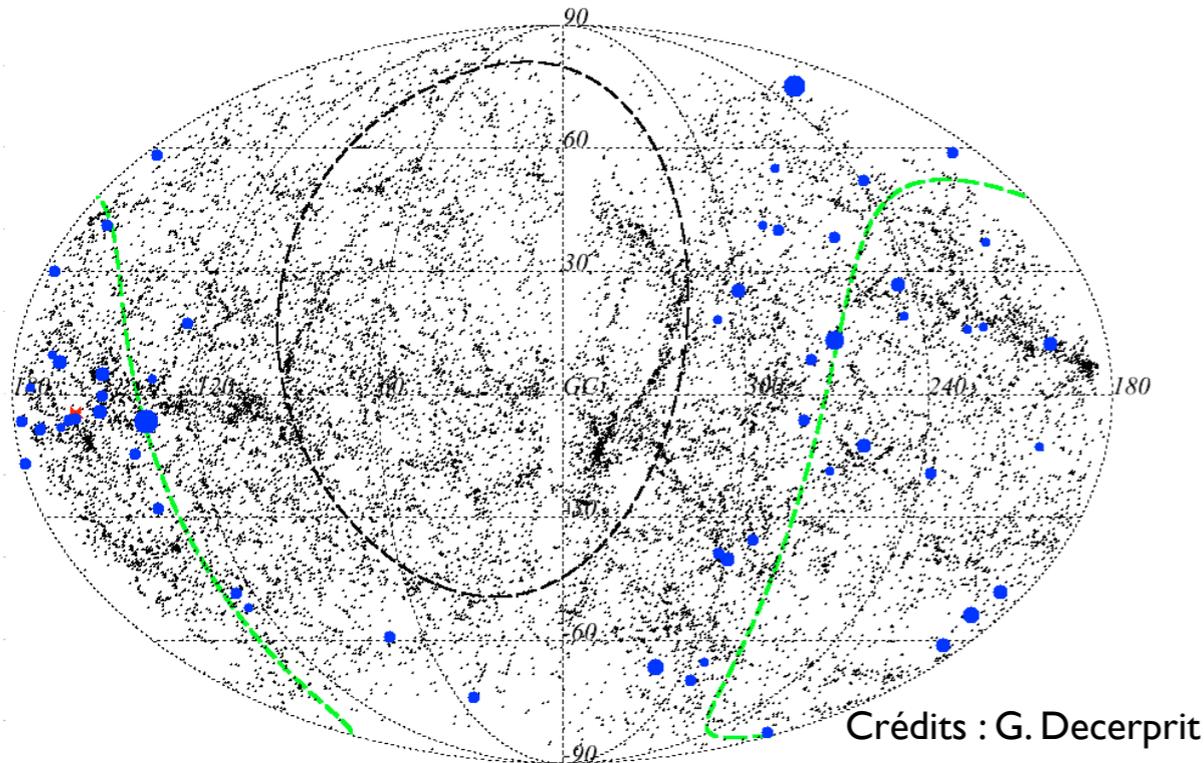
Les RCUHE et l'Observatoire Pierre Auger

Le spectre d'énergie et la composition

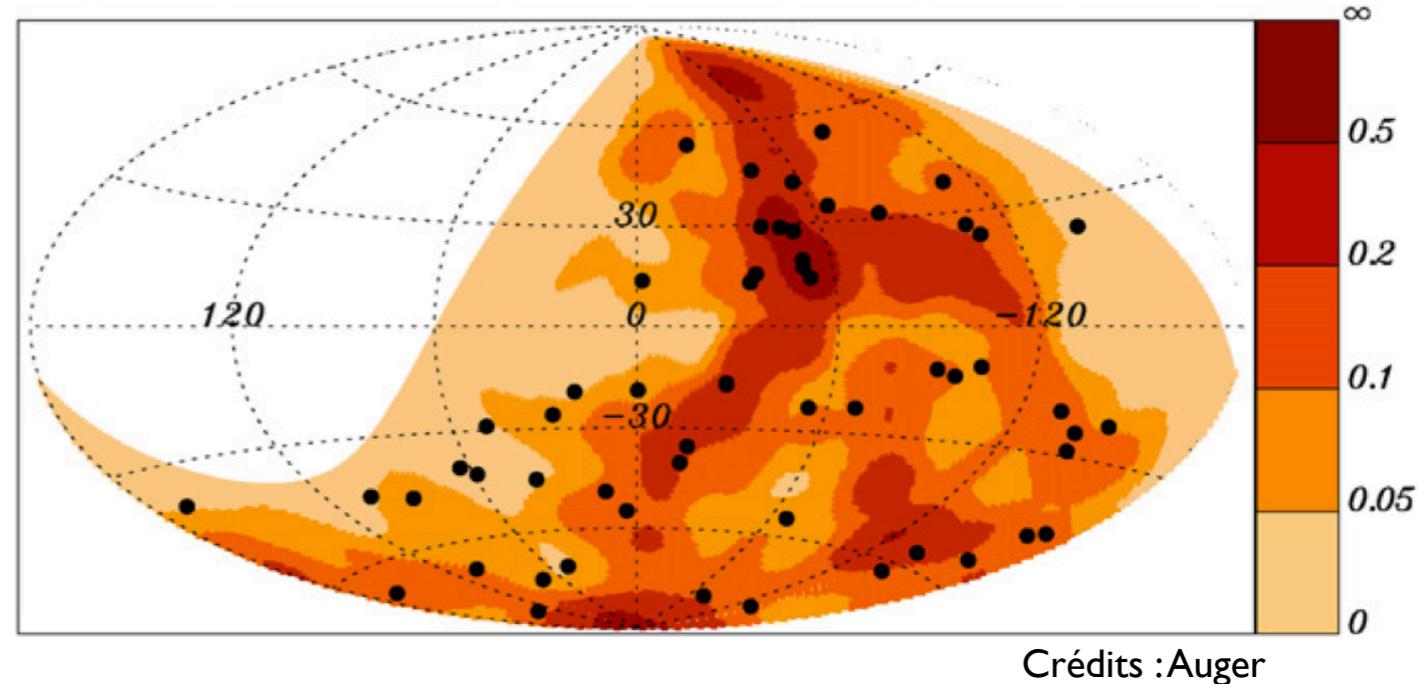
Le spectre angulaire

Les multi-messagers

Les anisotropies et ce qu'elles nous apprennent



AUGER vs 2MASS (Galaxies)



AUGER vs Swift

- Pas de source puissante significativement associée aux RCUHE :

Sources à émission continue ?

Sources transitoires ?

- Dégénérescence naturelle :

Champ magnétique important ?

Composition lourde ?

Ce qu'on peut (quand même) faire avec les anisotropies

*Decerprit et al.,
2011b*

- **Analyse des anisotropies à petite statistique**
 - ▶ amélioration des études d'auto-corrélation
 - ▶ contrainte de 2 paramètres astrophysiques d'importance : déflexions magnétiques typiques et densité effective des sources de RCUHE
 - ▶ Plus seulement tester l'isotropie mais aussi des modèles astrophysiques
- **Idée :**
 - ▶ peu de sources, petites déflexions ==> fort « clustering » des RCUHE
 - ▶ nombreuses sources, grandes déflexions ==> peu de clustering des RCUHE

Analyse des anisotropies à petite statistique

On...

- ... choisit 1 modèle “de référence” : 1 densité de sources et 1 échelle angulaire de déflection (2 paramètres)
 - ... tire 1 réalisation particulière de ce modèle (Monte Carlo à partir d’une distribution uniforme ou selon les galaxies locales)
 - ... construit un data set (avec 1 nombre fixe d’événements) à partir de cette réalisation (les effets de propagation sont implémentés) : data set “de référence”
 - ... extrait son niveau de “clustering” par auto-corrélation
 - ... compare ce-dernier avec celui de data sets issus de tous les autres modèles (*i.e.* toutes les densités et déflections testées)
- ➔ Analyse statistique acceptation/rejet de l’espace des paramètres (densité/déflection)

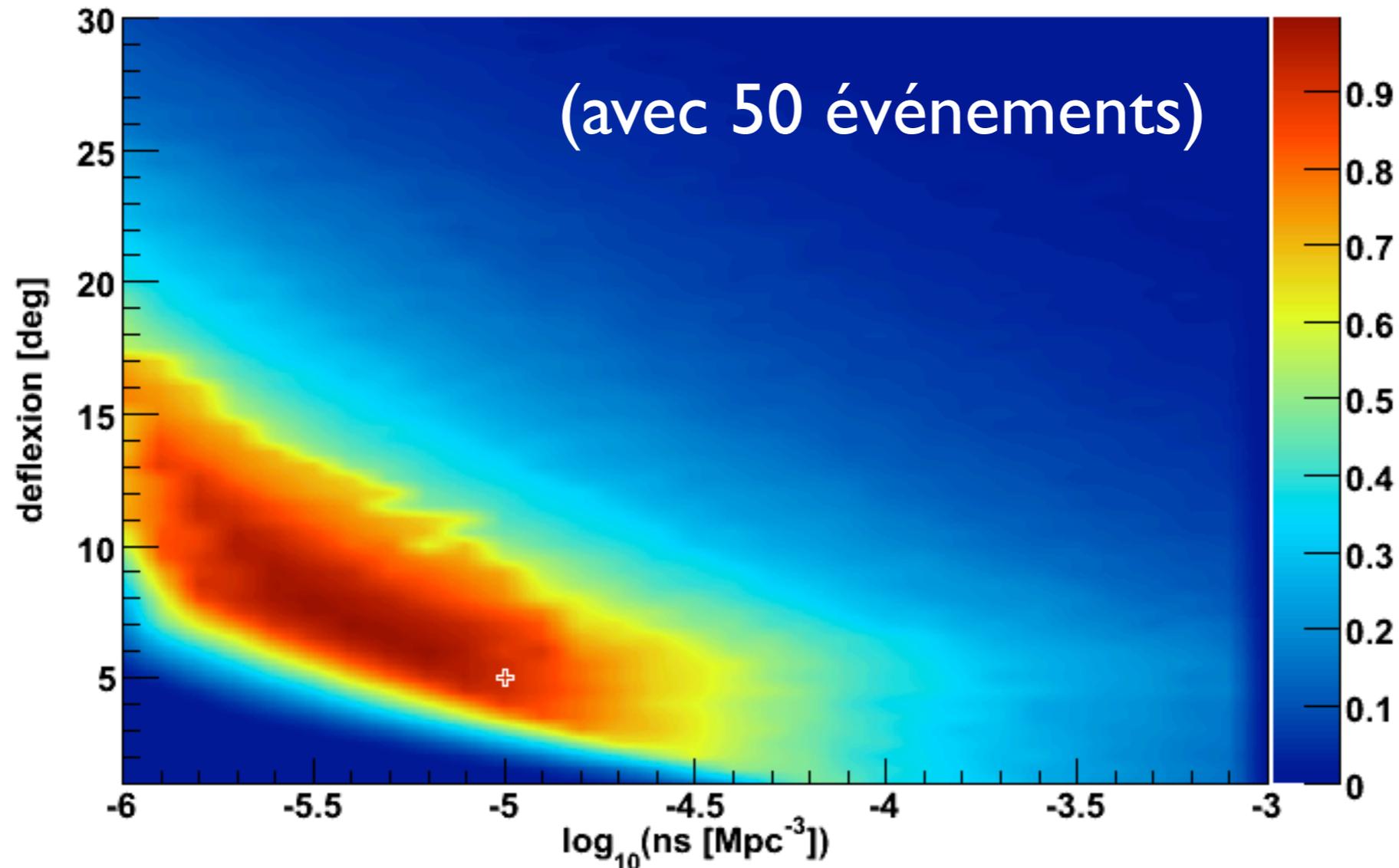
On répète
cela pour 10^4
réalisations

Le data set de référence peut
être les data d’Auger !

Puissance de la méthode

- Contraintes sur un modèle astrophysique donné

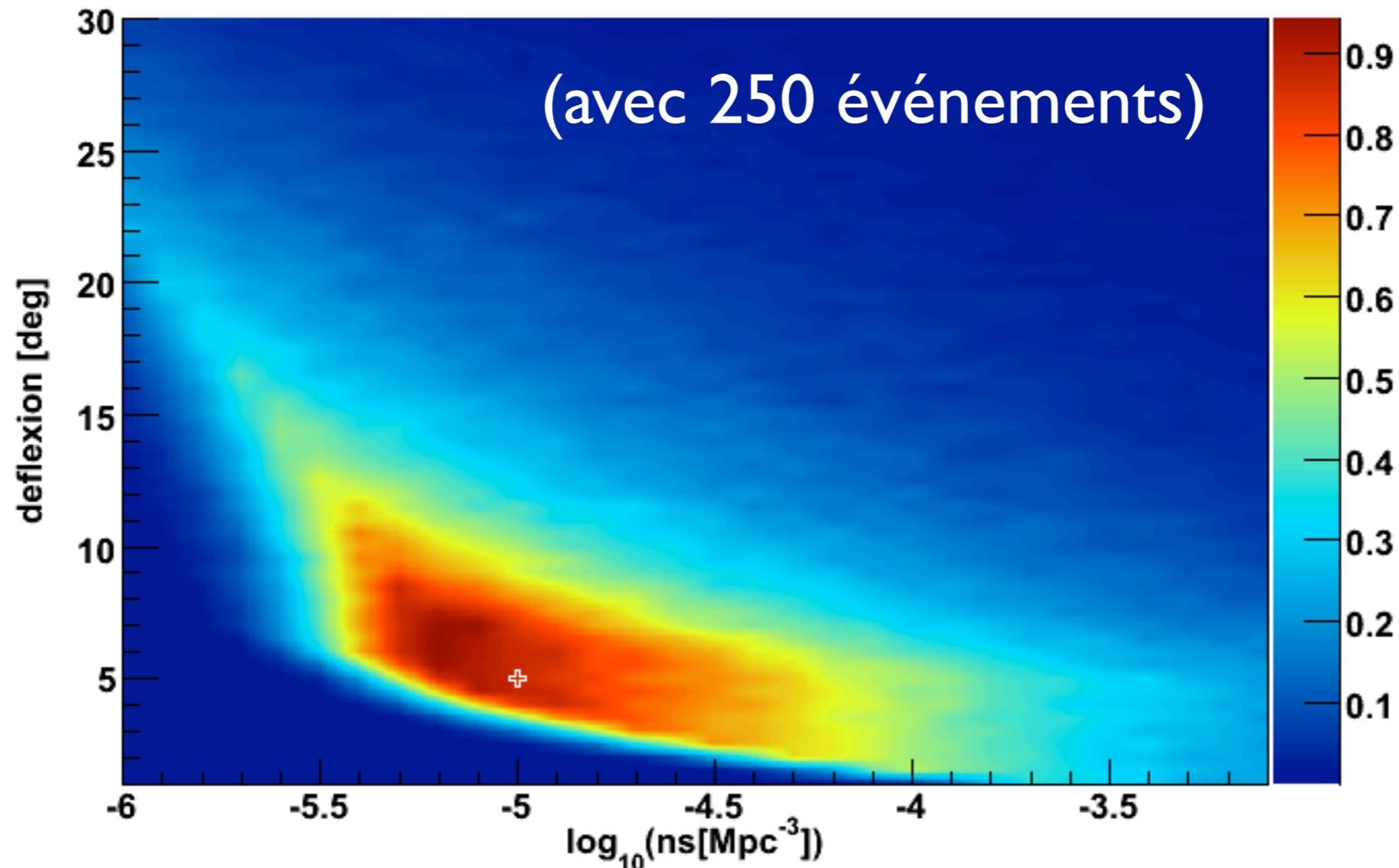
(Test sur un data set qui est 1 réalisation d'un modèle de sources à densité 10^{-5} Mpc^{-3} et 5° de déflexions)



Puissance de la méthode

- Contraintes sur un modèle astrophysique donné

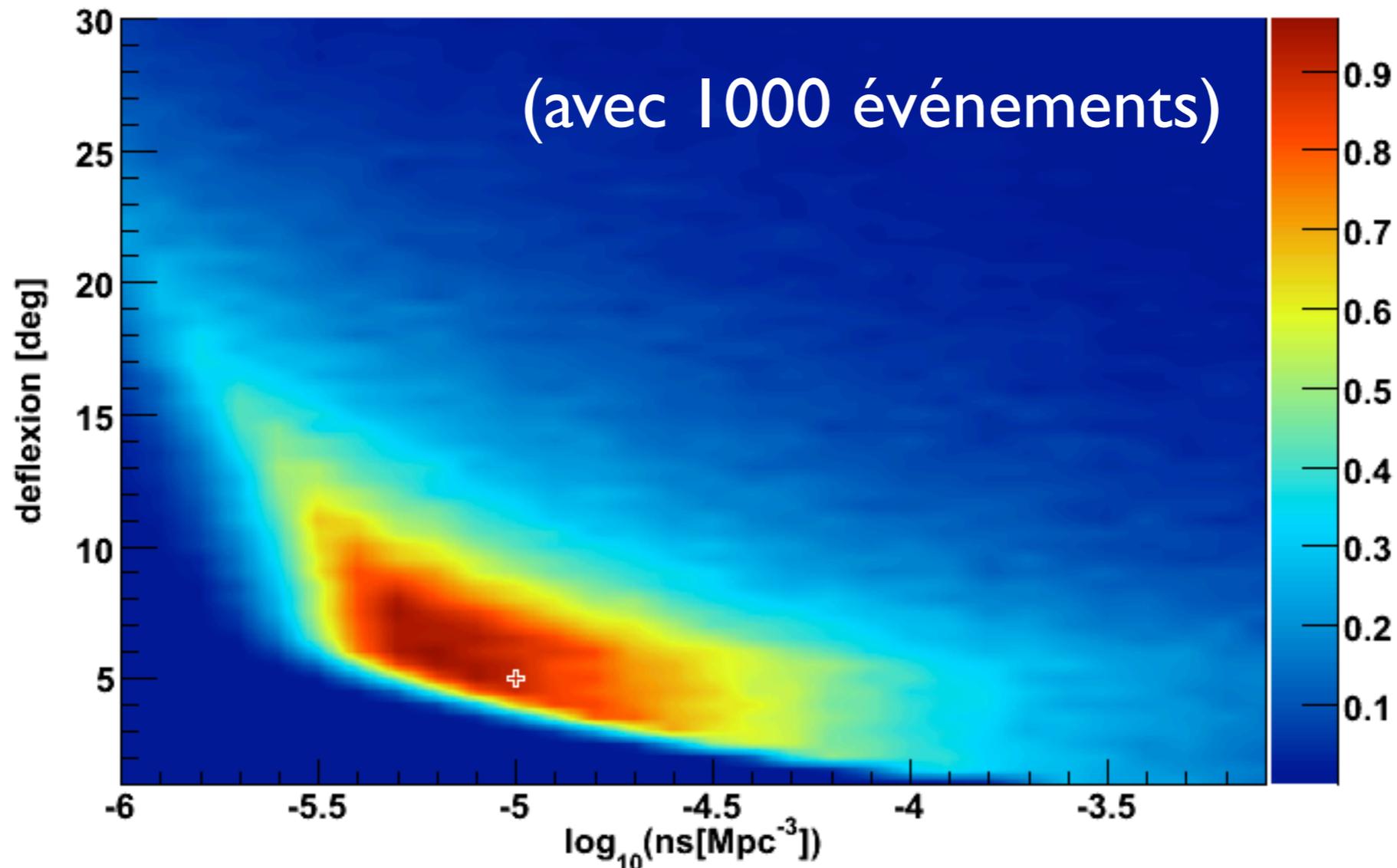
(Test sur un data set qui est 1 réalisation d'un modèle de sources à densité 10^{-5} Mpc^{-3} et 5° de déflexions)



Puissance de la méthode

- Contraintes sur un modèle astrophysique donné

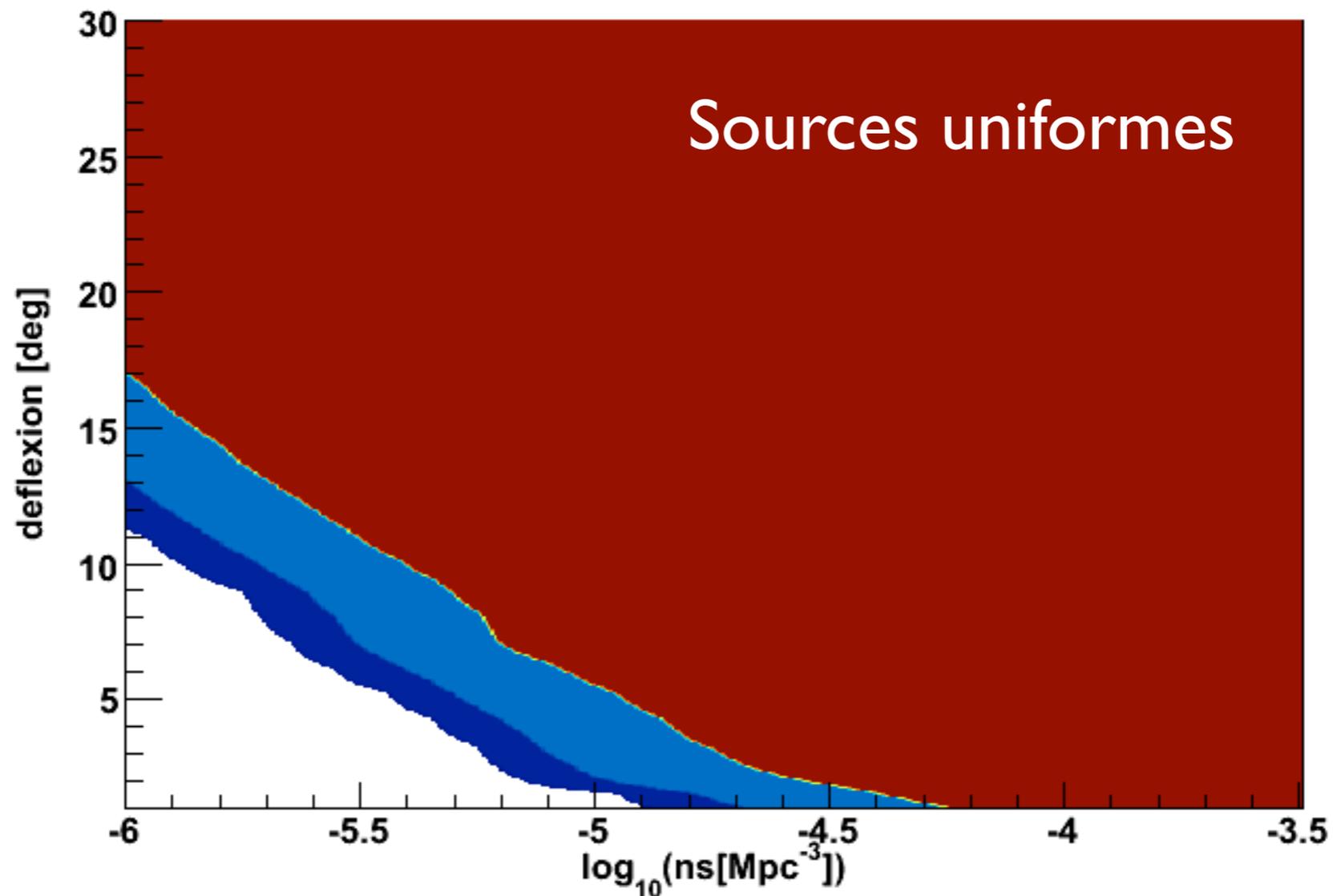
(Test sur un data set qui est 1 réalisation d'un modèle de sources à densité 10^{-5} Mpc^{-3} et 5° de déflexions)



Plus de
statistique
→ plus de
contraintes

Méthode appliquée aux données

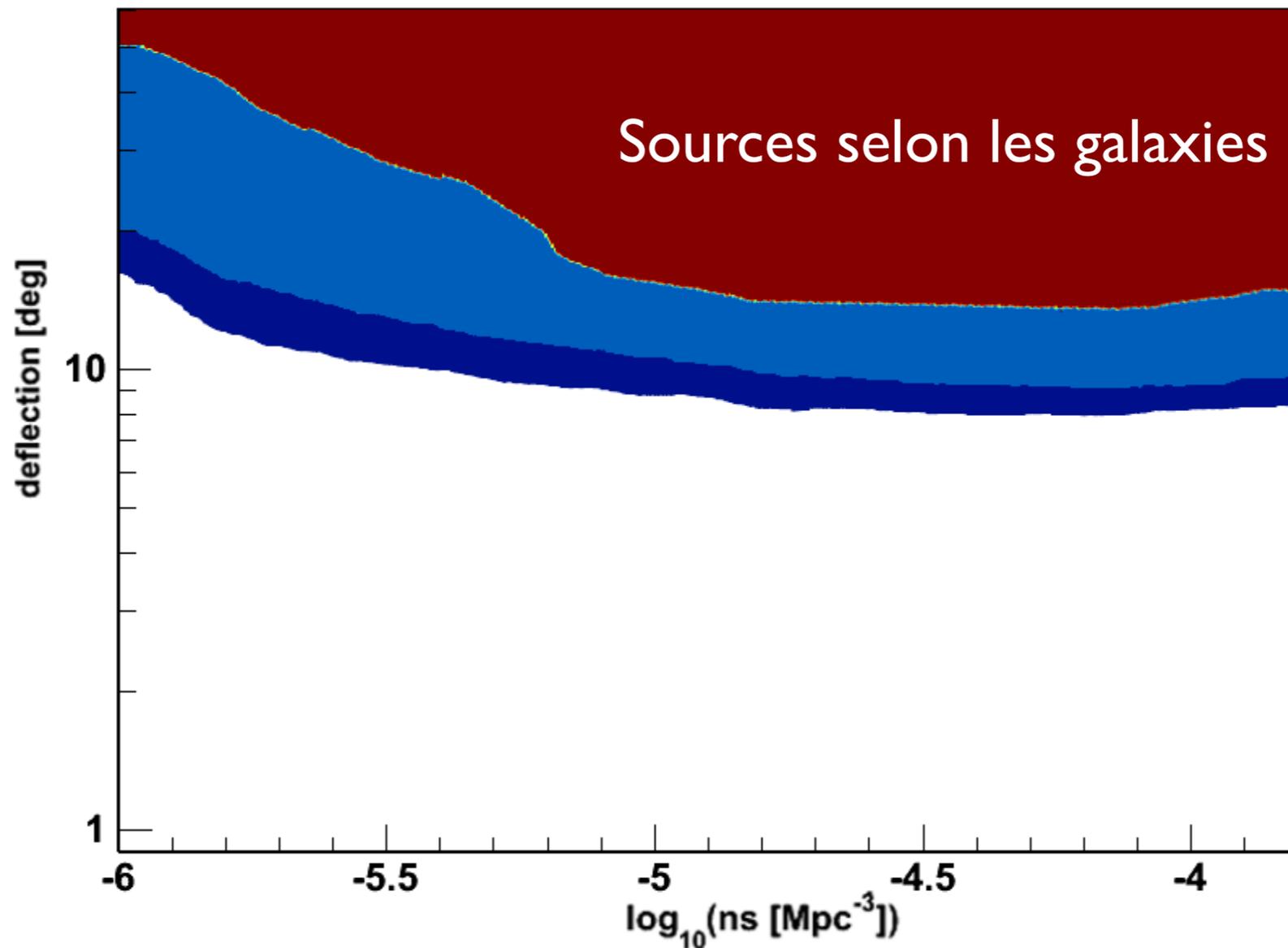
- Intervalles de confiance (« à la Neyman ») à 68/95/99% pour les données (publiées) d'Auger :



*Decerprit et al.,
2011b*

Méthode appliquée aux données

- Intervalles de confiance (« à la Neyman ») à 68/95/99% pour les données (publiées) d'Auger :



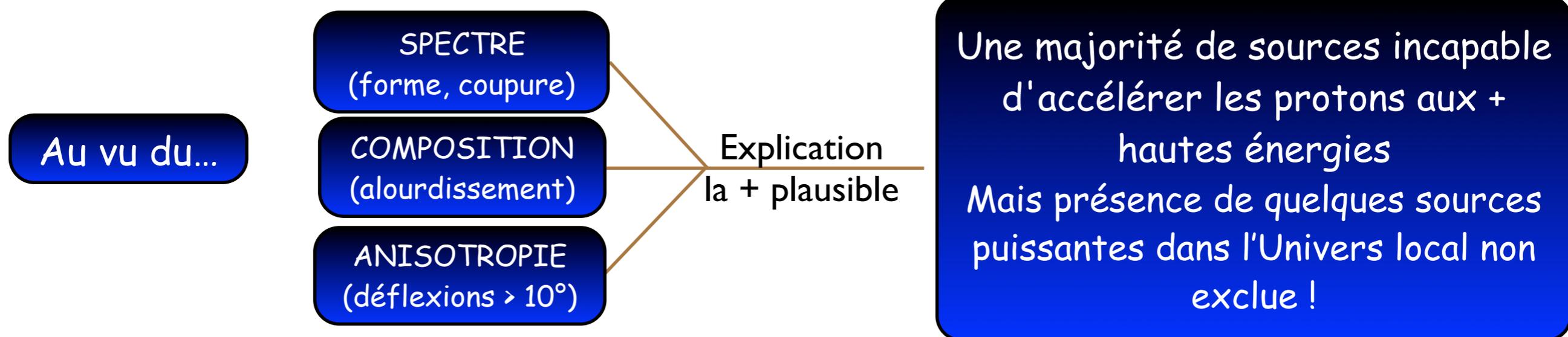
*Decerprit et al.,
2011b*

Les déflexions sont $> 10^\circ$ avec 95% de niveau de confiance !

Synthèse à mi-parcours

- Les direction d'arrivée des événements Auger ($> 55 \text{ EeV}$) montrent | faible corrélation avec l'univers local
- Signal en majorité autour de Centaurus-A : excès d'événements dans un rayon de 18°
- Y a-t-il une tension entre l'anisotropie et la composition (Lemoine & Waxman, 2010) ?
→ s'attend-on à | faible corrélation pour une composition dominée par les protons ?

faible mais \neq d'une hypothèse isotrope



Comment s'en sortir ?!

➔ Prochaines années : + de données → + de contraintes → aide capitale !

où ?

À la cheville
(transition Gal/XtraGal) :

Détecteur à grande
dynamique en énergie

Améliorations d'Auger-Sud :
HEAT+AMIGA, AERA

Aux + hautes énergies, >80 EeV
(présence de protons/recherche
de sources protons) :

Détection d'événements $> 2 \cdot 10^{20}$
eV → très probablement des
protons

Recherche d'anisotropies à petite
échelle avec + de statistique
(Auger-Nord, JEM-EUSO)

Neutrinos et photons
(voir suite)

Les multi-messagers

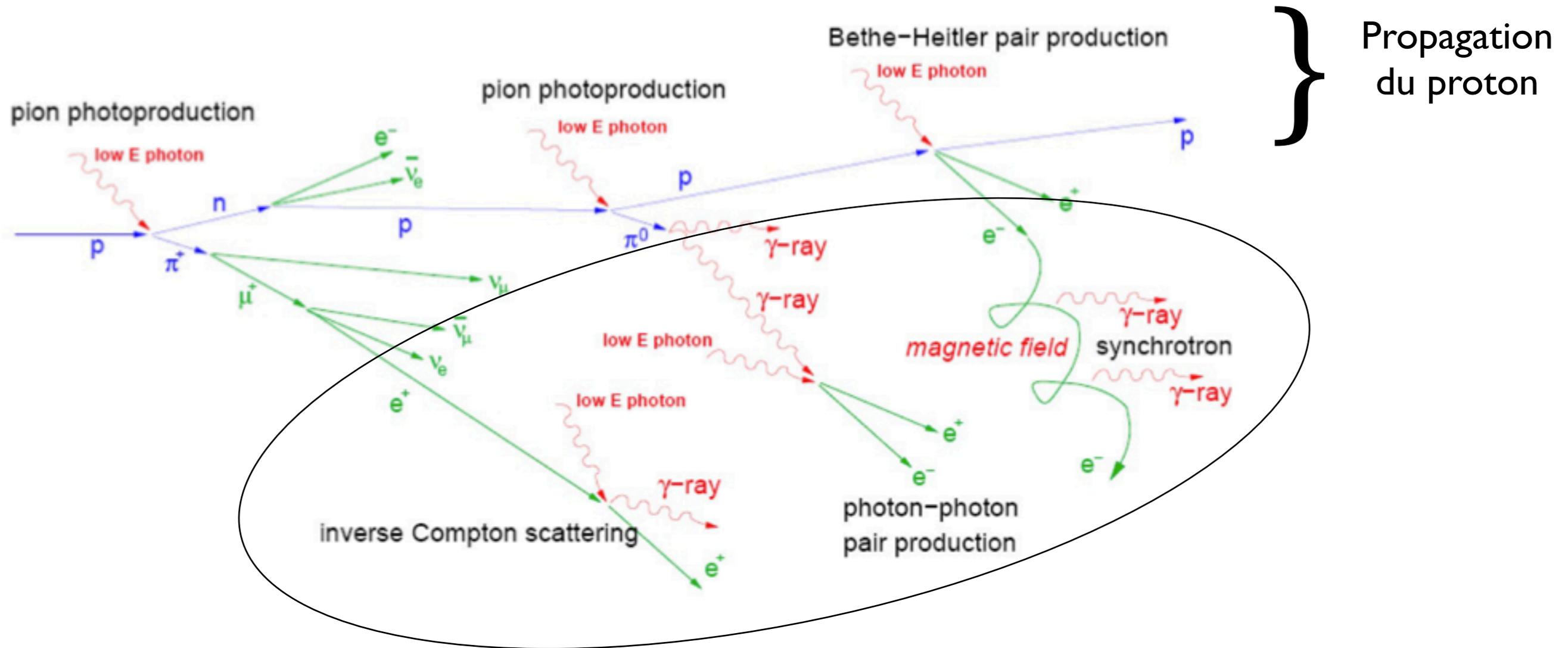
Les RCUHE et
l'Observatoire
Pierre Auger

Le spectre
d'énergie et la
composition

Le spectre
angulaire

Les multi-
messagers

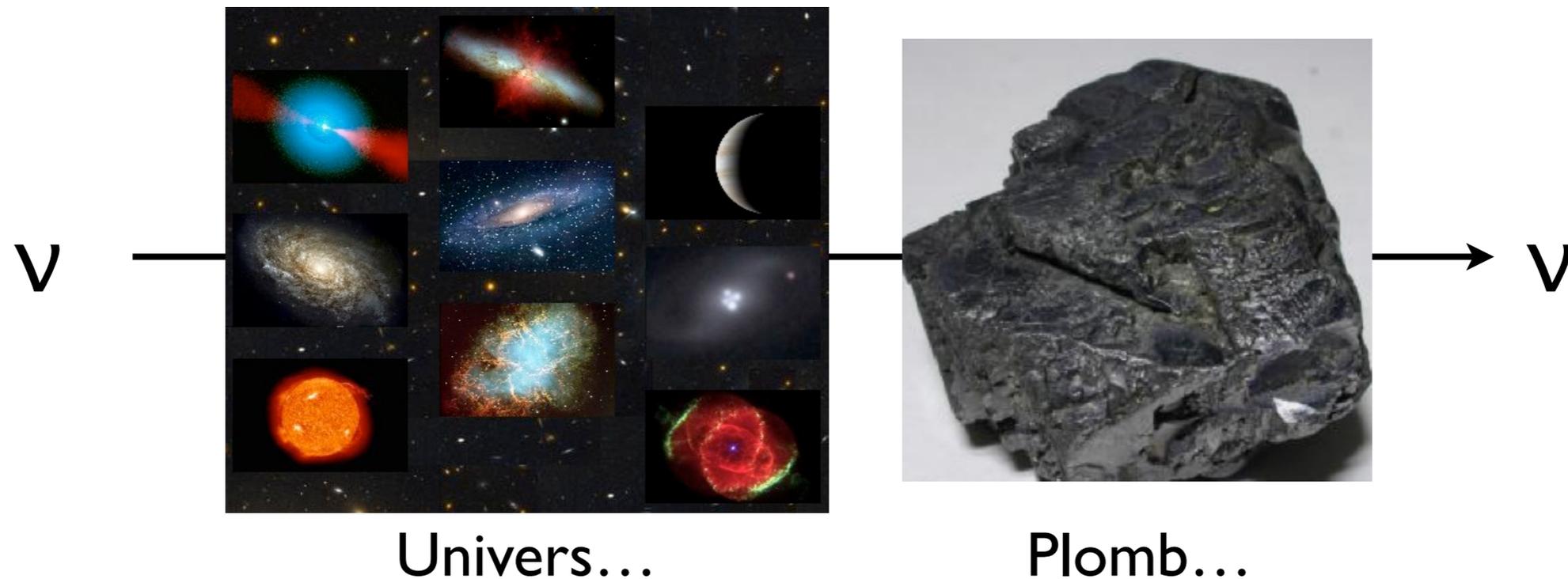
Propagation des RCUHE



Partie électromagnétique
→ code numérique (Decerprit et al, 2011)

Propagation des neutrinos

- Un neutrino se propage facilement dans l'Univers : pertes par expansion uniquement



Propagation des gammas et e^\pm

- Propagation des Cascades Électromagnétiques : les processus mis en jeu

Diffusion Compton Inverse (ICS)

$$e \gamma_b \rightarrow e \gamma$$

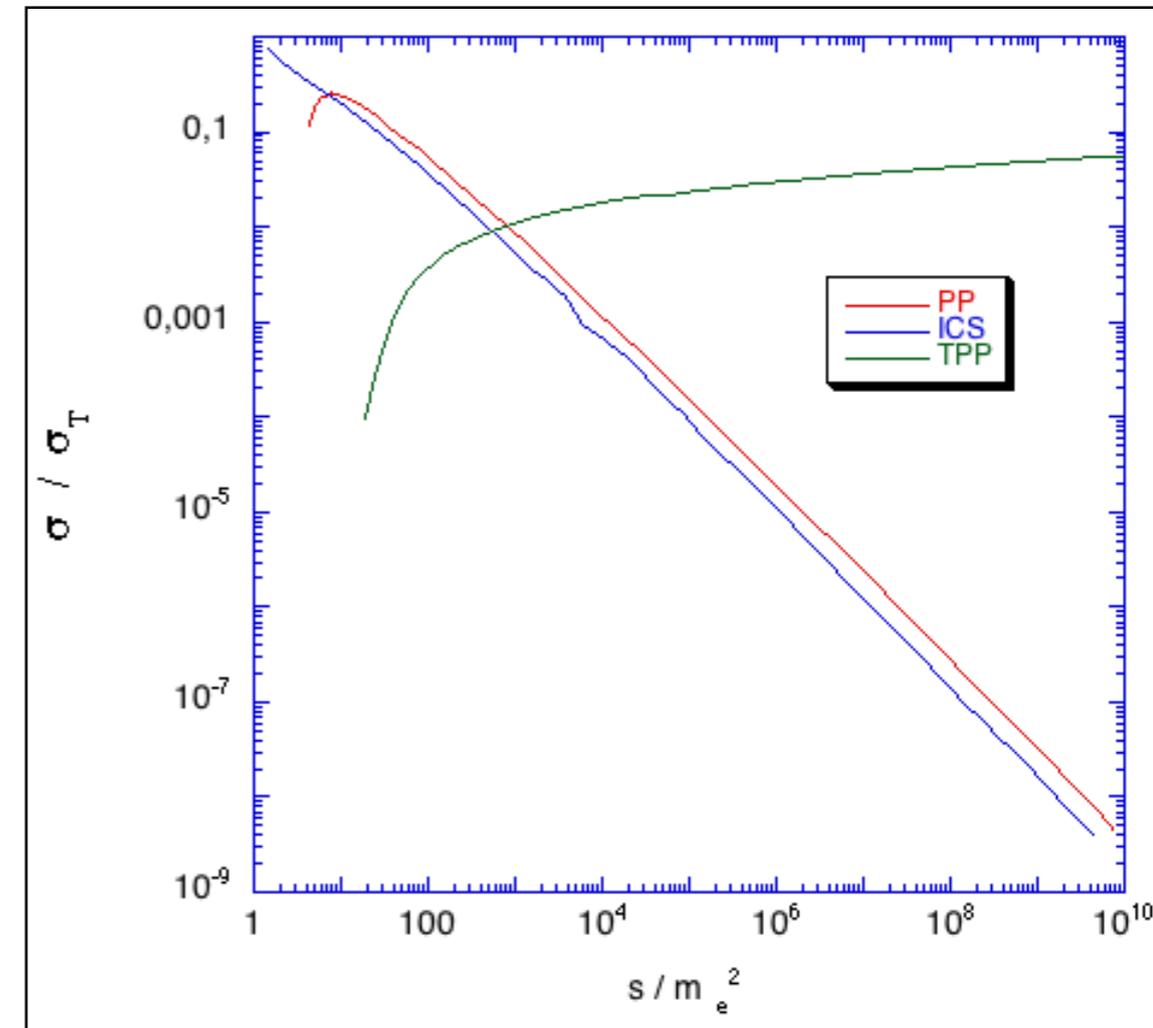
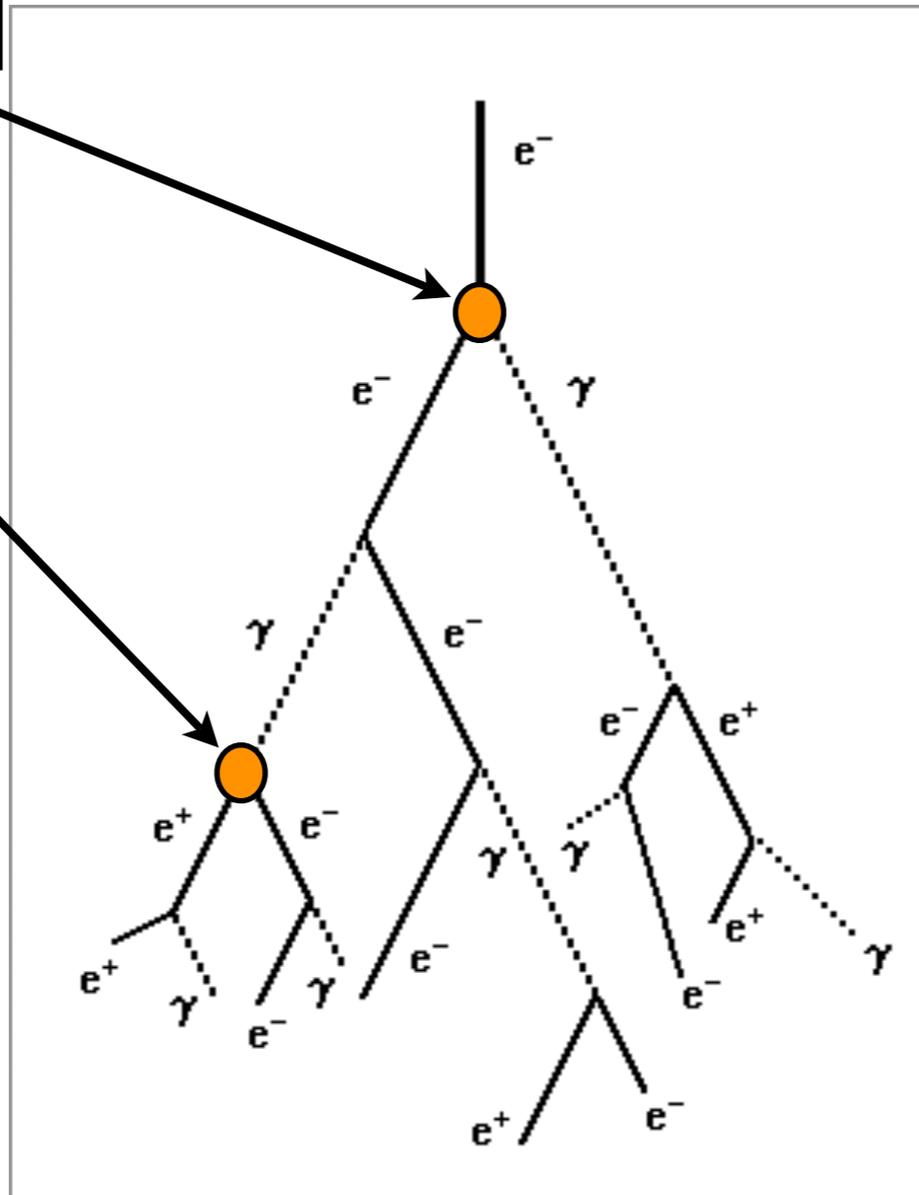
Production de Paires (PP)

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

et aussi :

Production de double paire et triplet (DPP, TPP)

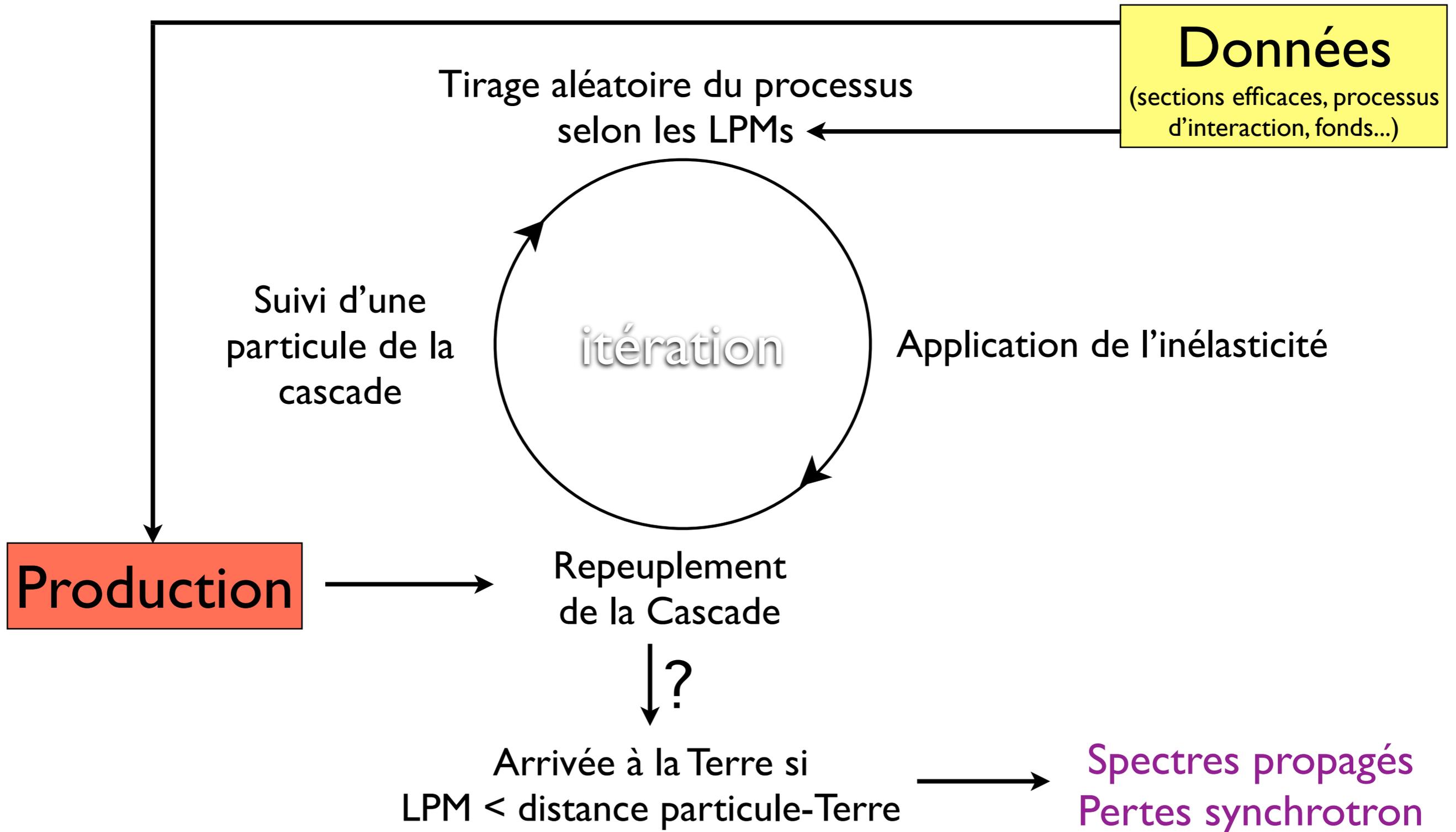
Refroidissement synchrotron



Sections efficaces d'interaction

Propagation des gammas et e^\pm

Implémentation Numérique



Propagation des gammas et e^\pm

Implémentation Numérique

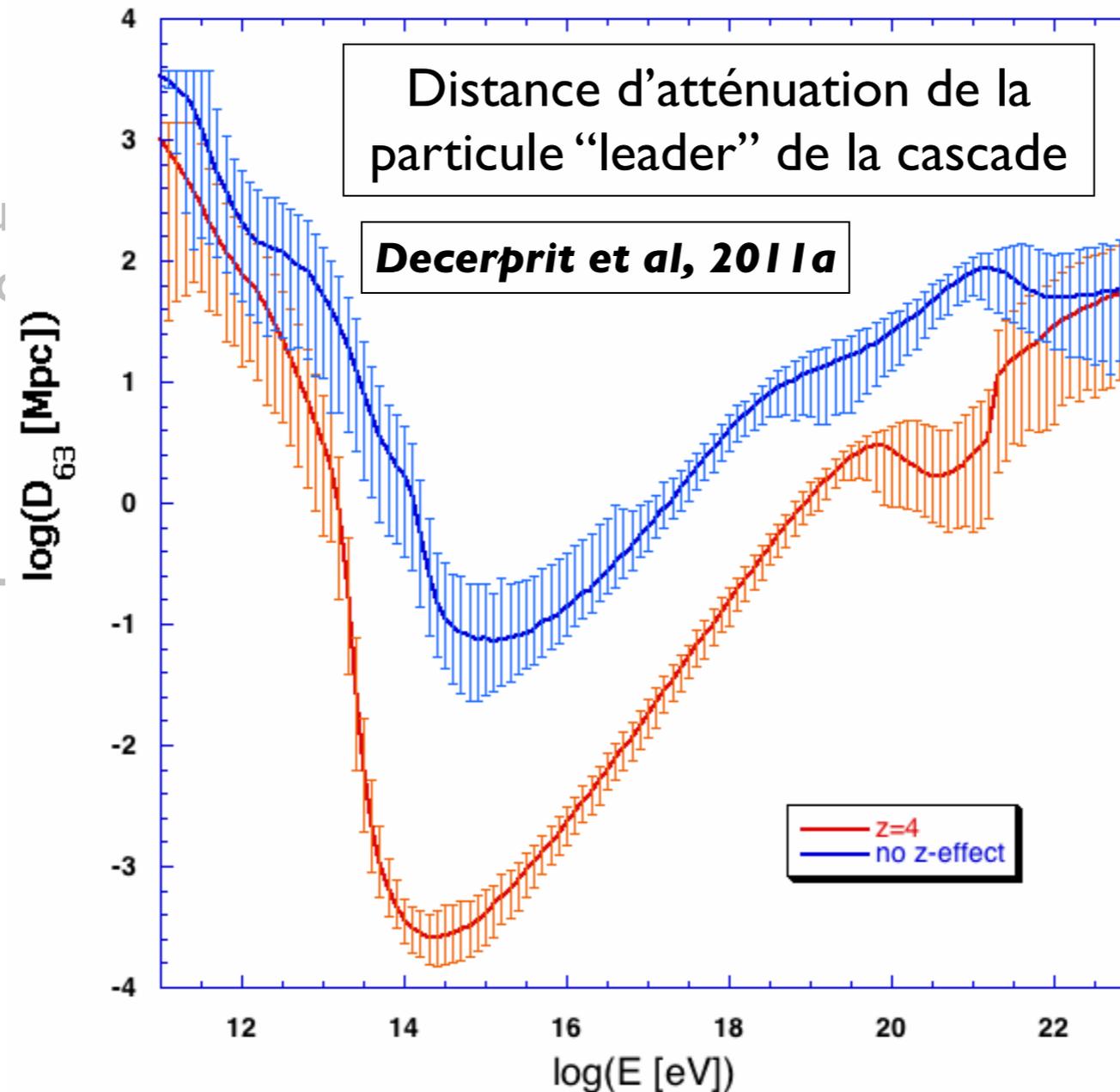
Données

(sections efficaces, processus d'interaction, fonds...)

Tirage aléatoire du processus selon les LPMs

Suivi particule cascade

Production



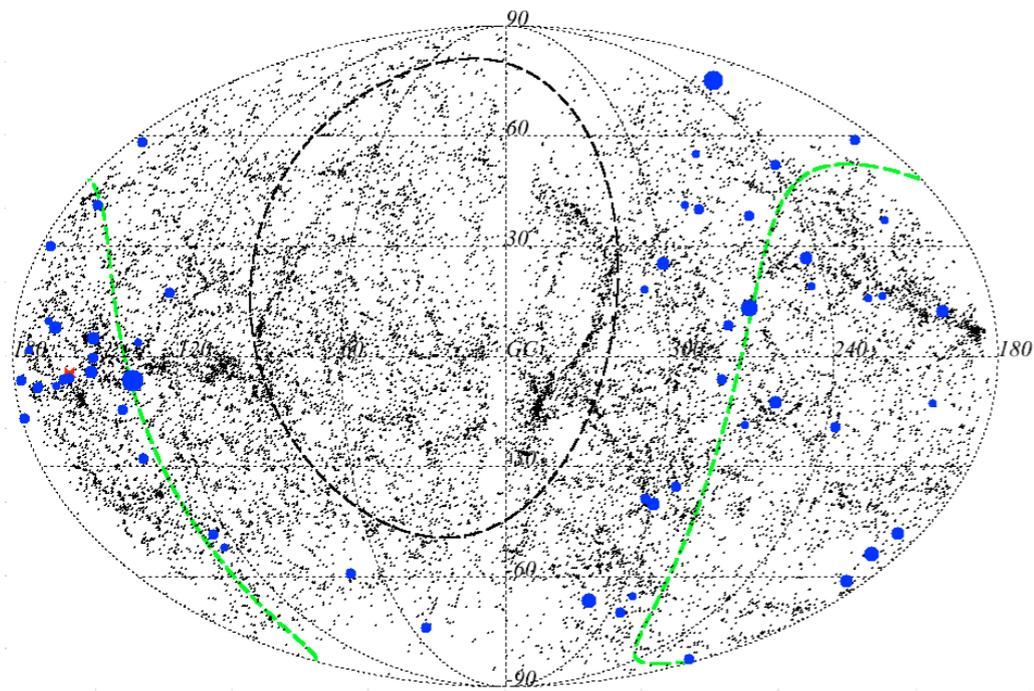
de l'inélasticité

Spectres propagés
Pertes synchrotron

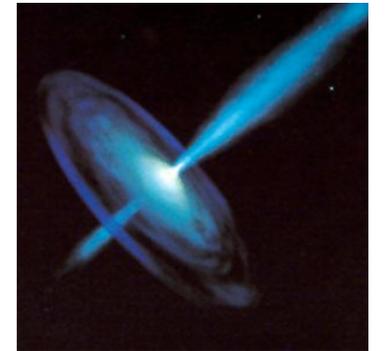
Monte Carlo (bis)

Code numérique Monte Carlo véritablement multi-messager : propagation des noyaux et cascades électromagnétiques dans l'Univers magnétisé

(Decerprit et al., 2011)



Sources
astrophysiques



Rayons
cosmiques ultra-
énergétiques

Neutrinos

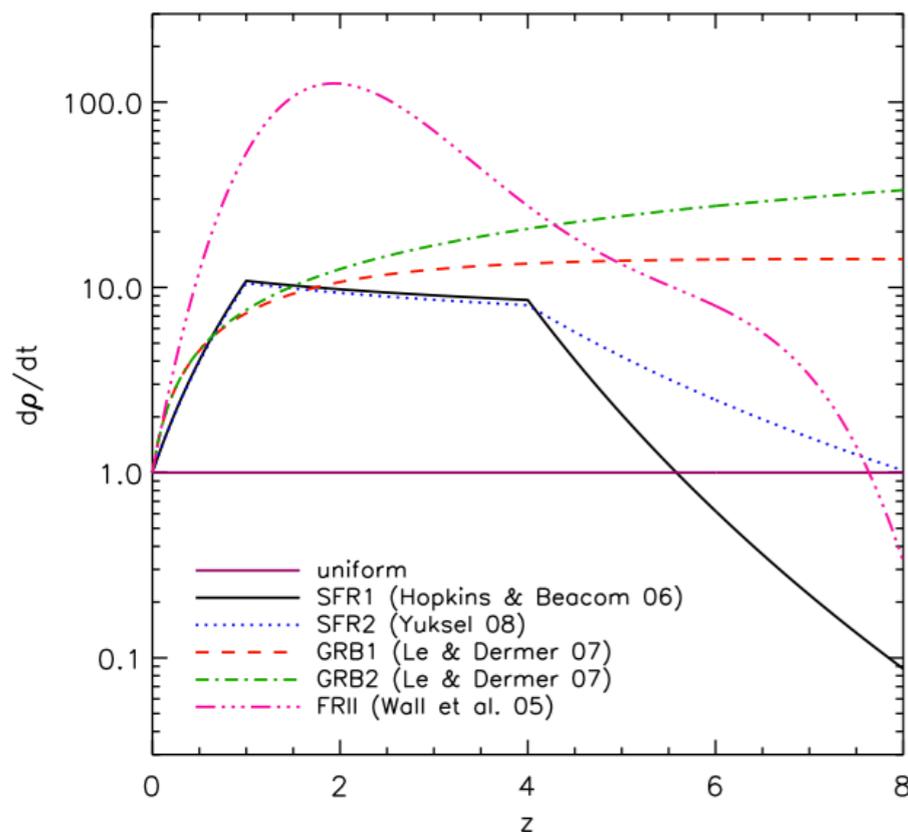
Gammas

Permet d'étudier la propagation des RCUHE, les environnements de sources, les messagers secondaires...

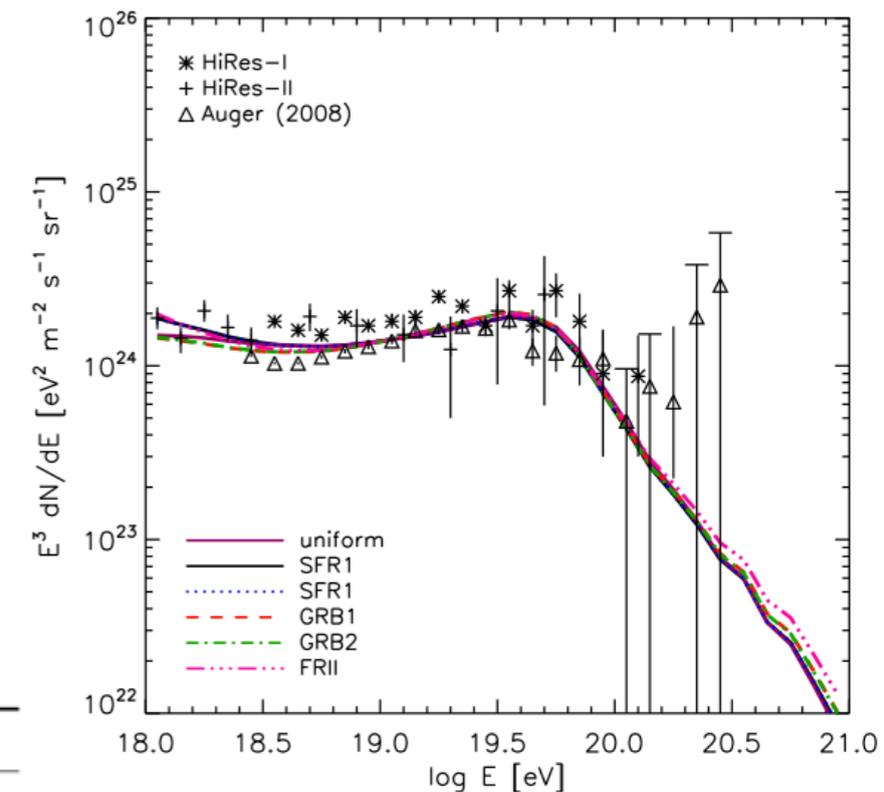
- Processus photo-hadroniques (SOPHIA)
- Processus photo-désintégration
- Processus électromagnétiques

Hypothèses sur les sources

- Différentes hypothèses sur le type de sources impliquent différentes évolutions de la luminosité en RCUHE
- Aux sources, la composition et l'énergie E_{\max} sont fixées, on peut normaliser le flux des neutrinos (ou gammas) à l'aide des données RCUHE qui contraignent le spectre RCUHE propagé

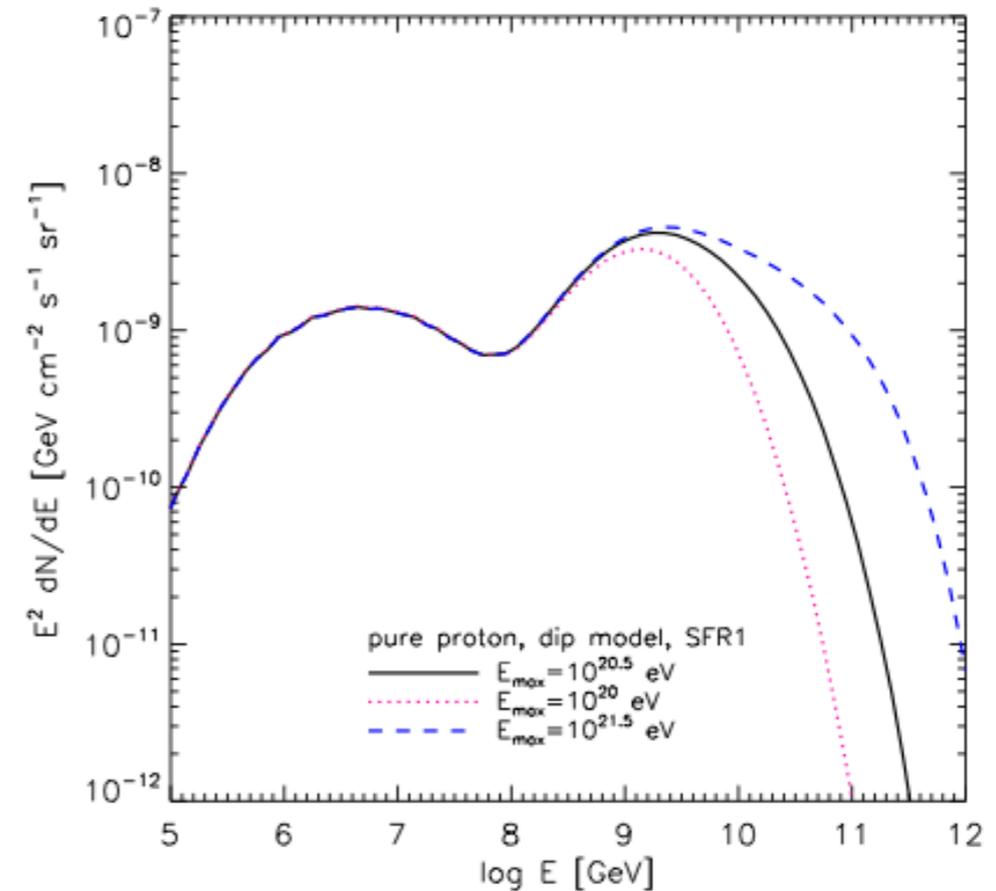
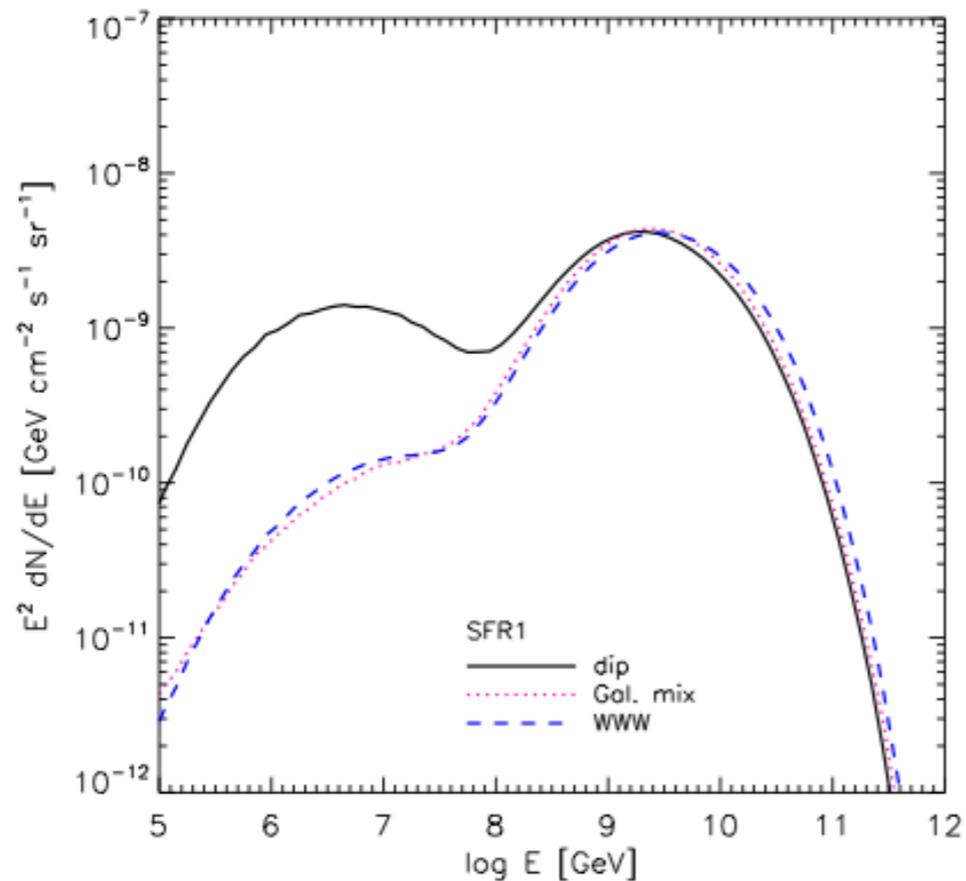


composition	transition	source evolution	α
pure protons	dip	uniform	2.6
"	"	SFR1	2.5
"	"	SFR2	2.5
"	"	GRB1	2.4
"	"	GRB2	2.4
"	"	FRII	2.3
"	WWW	SFR1	2.1
Galactic mix	Galactic mix	SFR1	2.1
pure iron	Galactic mix	SFR1	2.0
iron rich, low $E_{p,\max}$	specific	SFR1	1.2



Flux de neutrinos

- Dépendance des flux de neutrinos aux paramètres astrophysiques

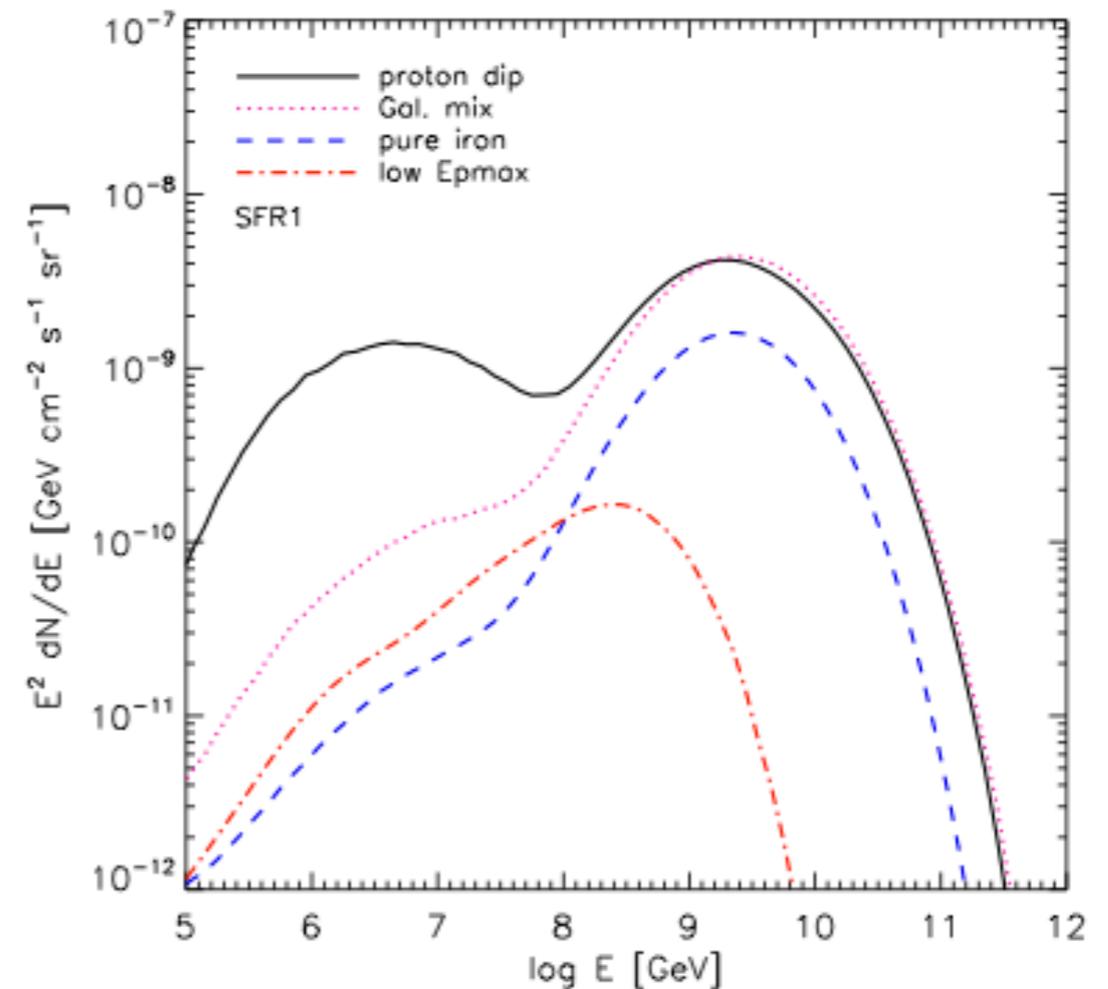
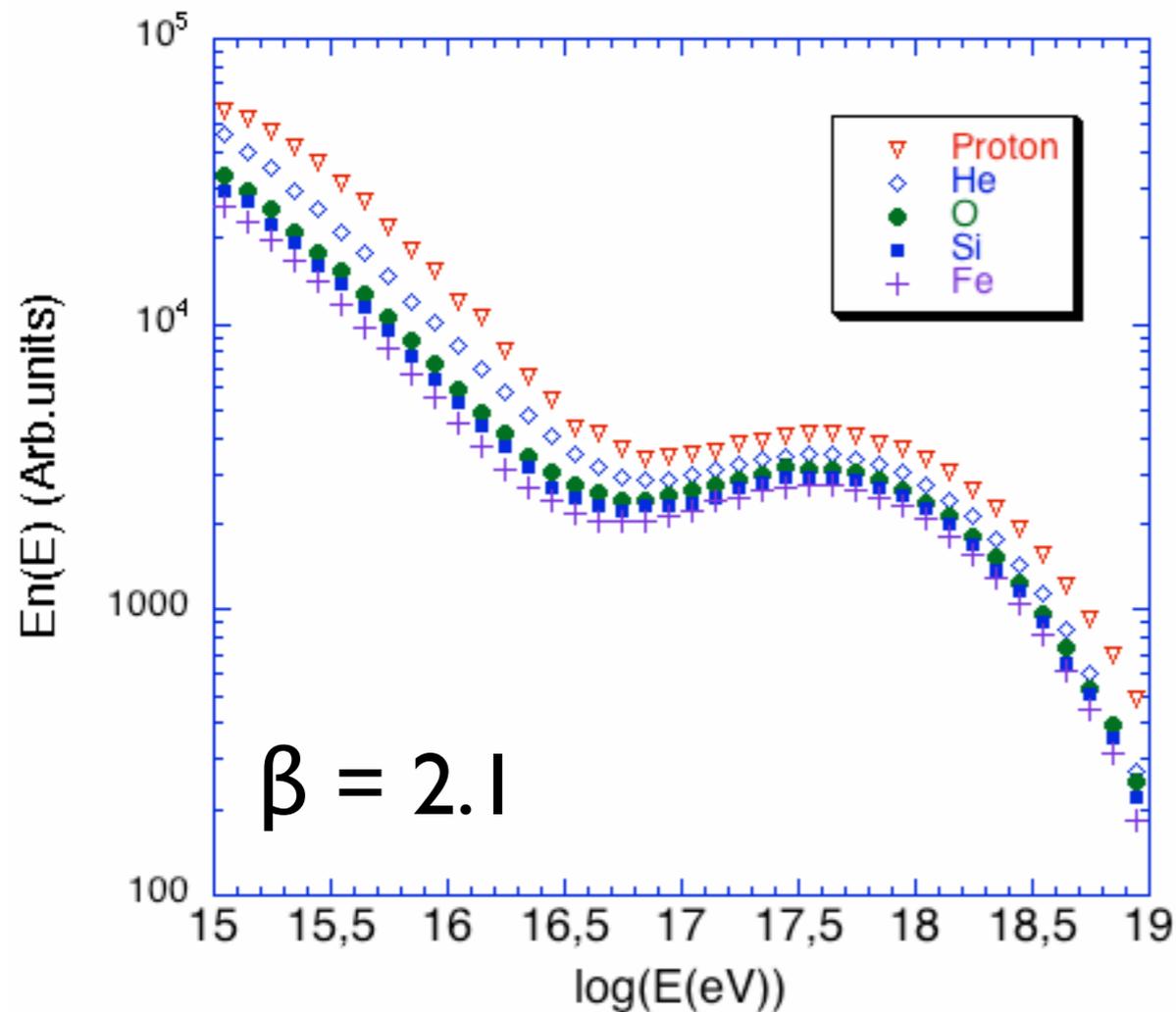


Aux énergies d'Auger, les flux attendus sont comparables pour les 3 modèles légers

Influence de E_{max} sur la fin du spectre essentiellement

Flux de neutrinos

- Dépendance des flux de neutrinos à la composition

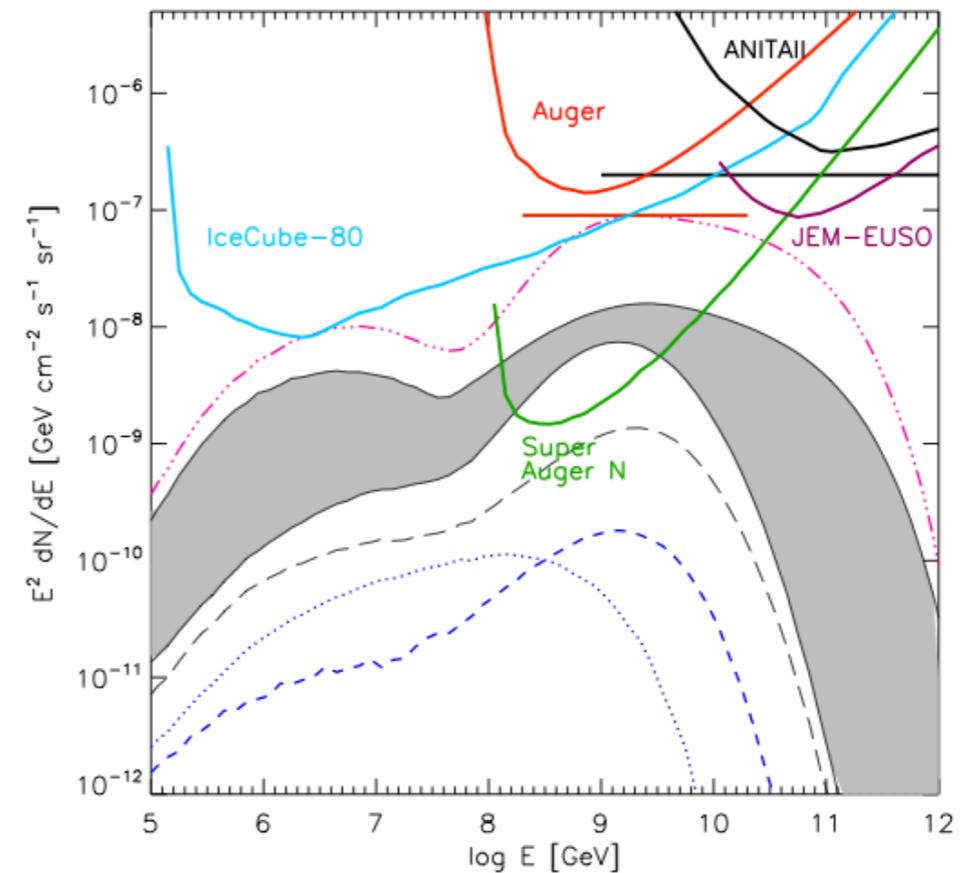
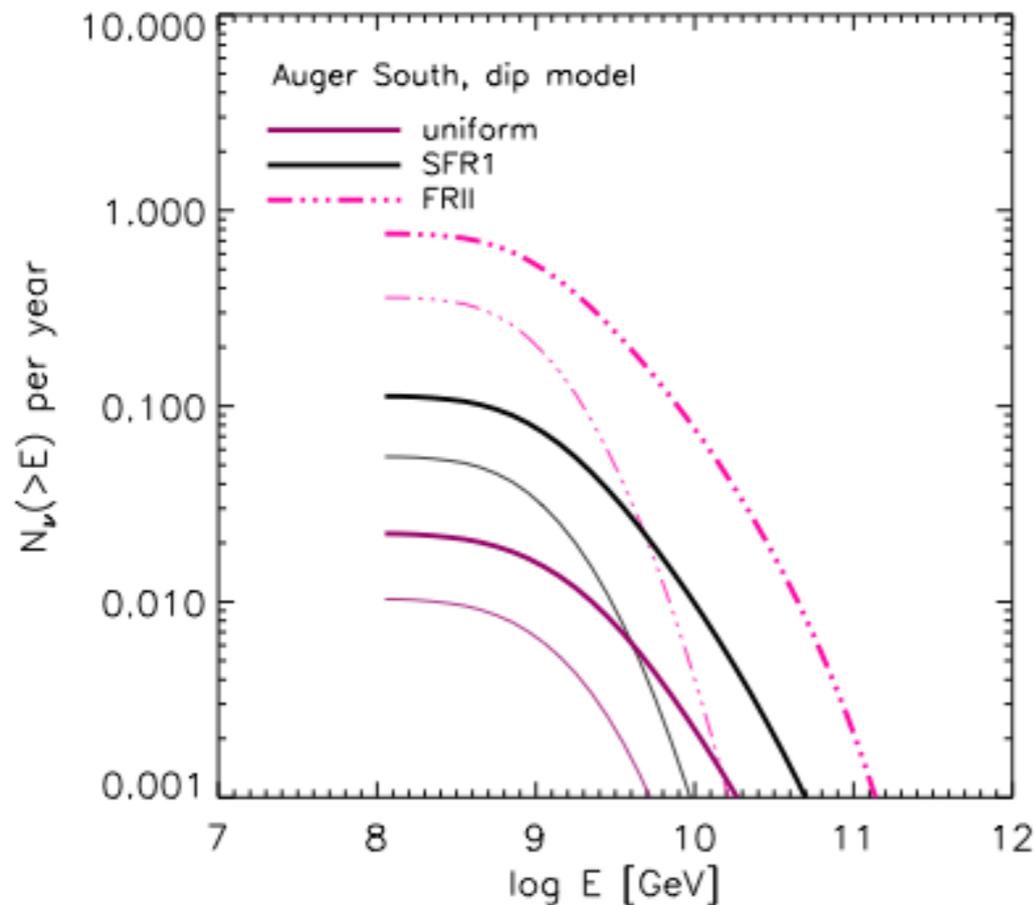


Pour un E_{max} / Z donné, le flux pour chaque espèce est similaire (les écarts sont fonction surtout de l'indice spectral)

Dans le modèle low- E_{max} , les nucléons secondaires sont produits sous le seuil de production de pions → flux neutrinos infimes et indétectables !

DéTECTABILITÉ

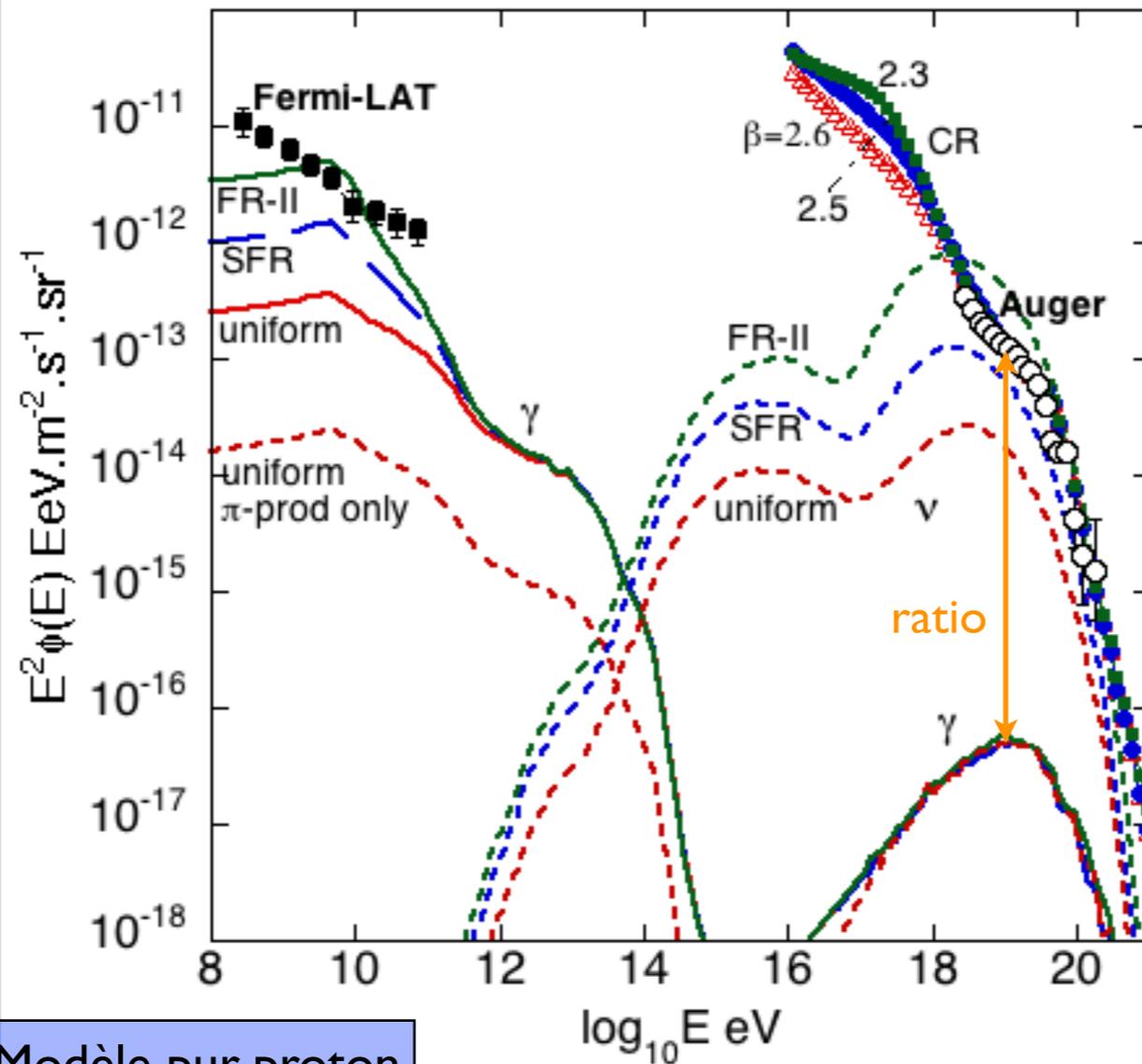
Modèles les + optimistes bientôt contraints par Auger et al.
Modèles les - optimistes et low- E_{\max} non encore détectables (même Auger Nord)



- La détection de neutrinos par Auger-Nord donnerait des informations cruciales sur l'astrophysique des RCUHE
- La non-détection n'apporterait que peu d'informations
- Attention : modèles effectifs

Flux de gammas

On utilise le flux diffus de Fermi pour contraindre les modèles de sources

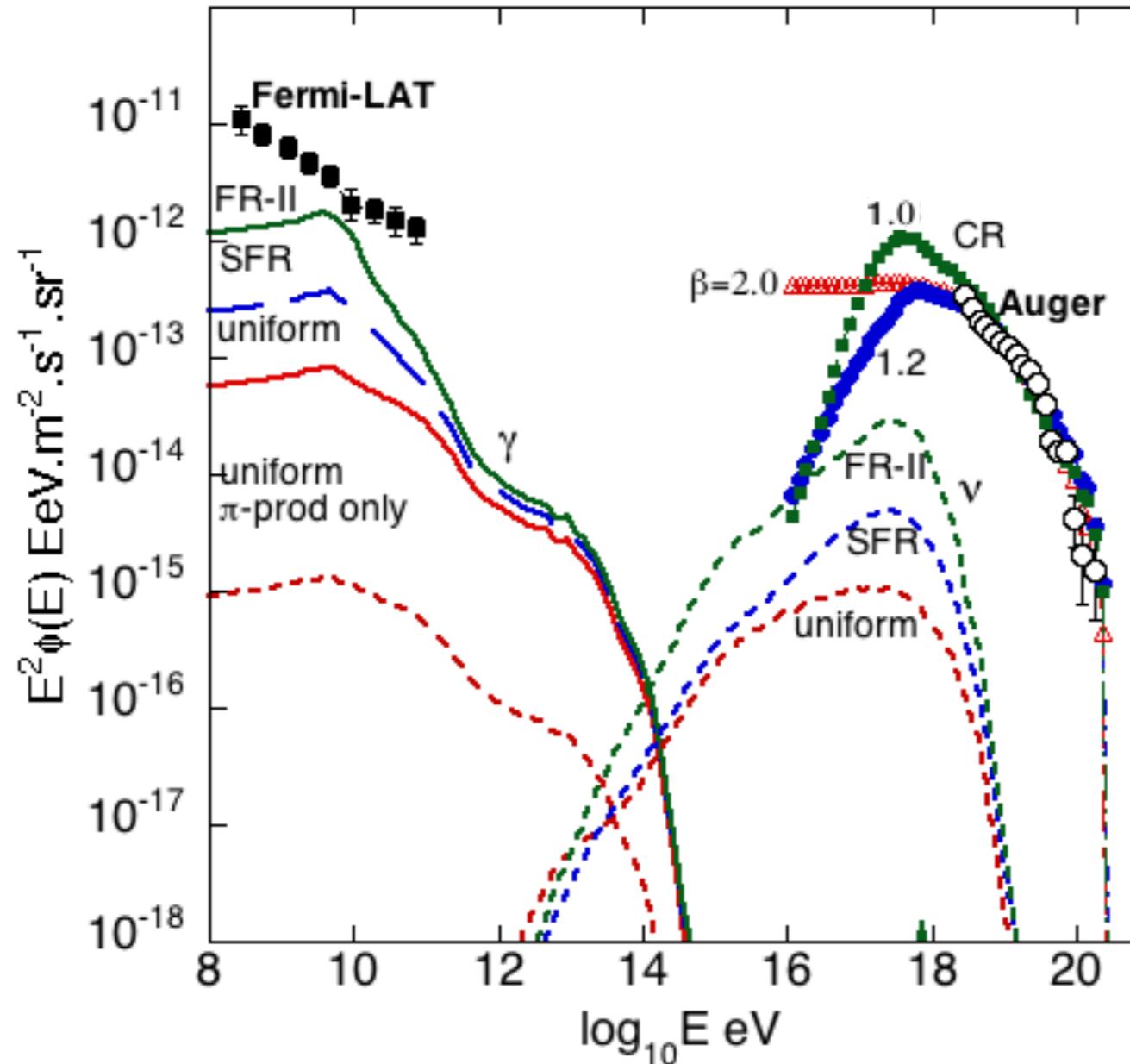


Modèle pur-proton

On utilise le flux des RCUHE pour normaliser à 10^{19} eV

Le scénario FR-II est exclu par les seules données de Fermi

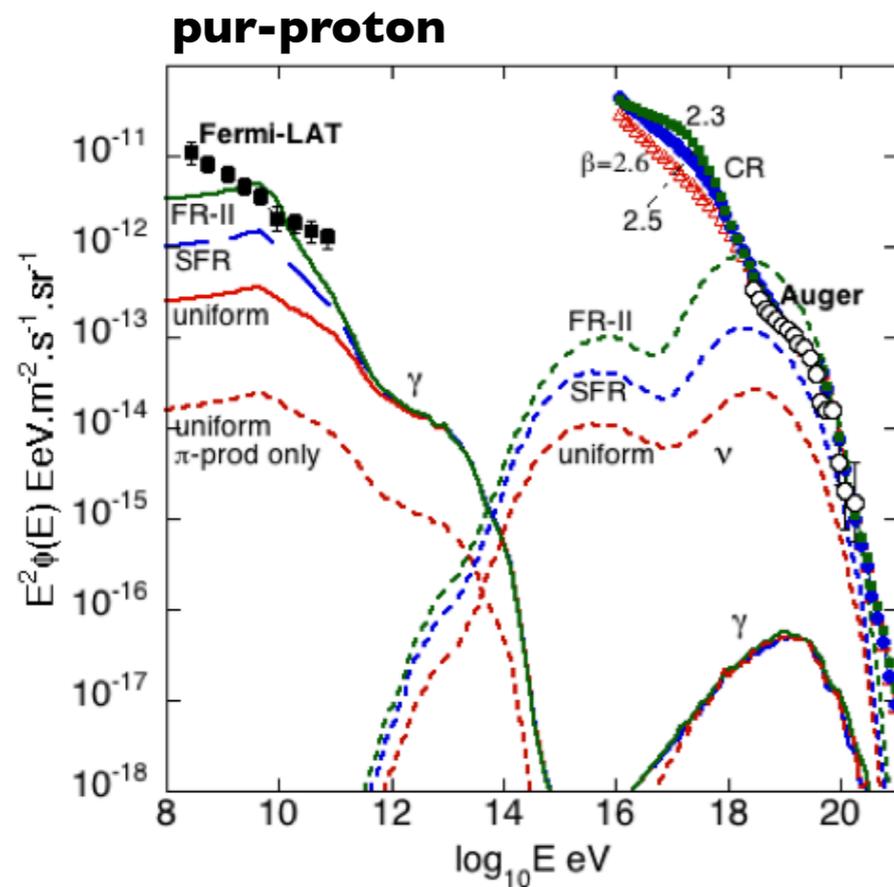
Flux de gammas



Modèle
low- E_{\max}

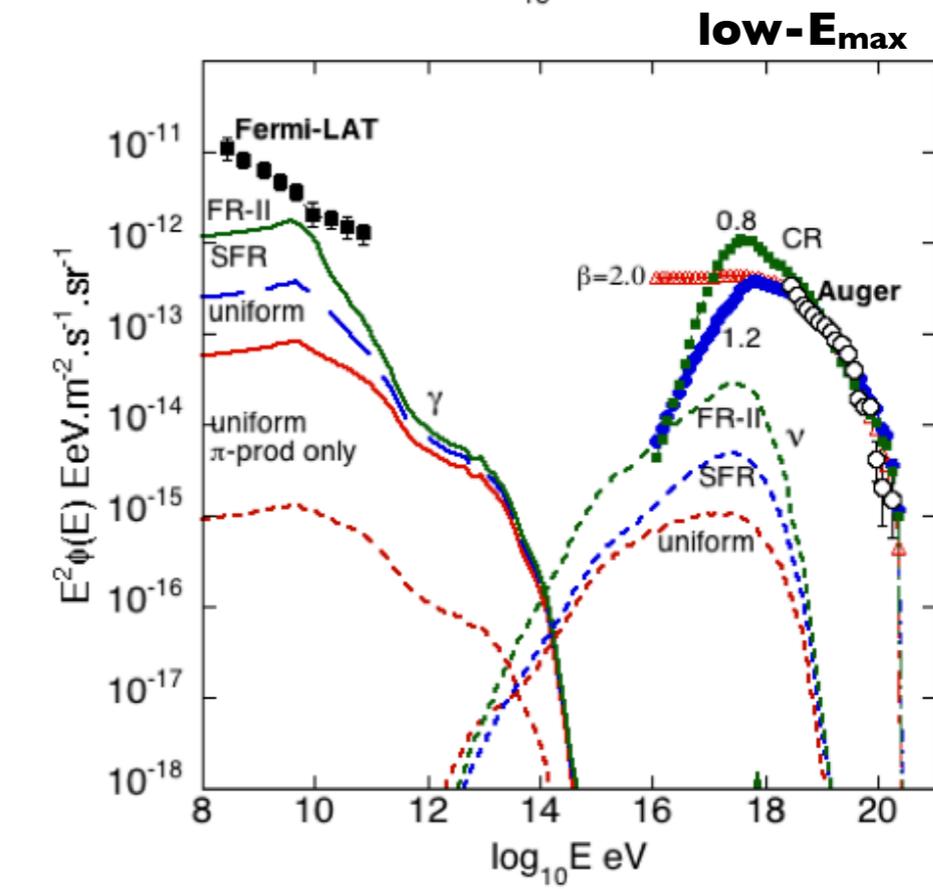
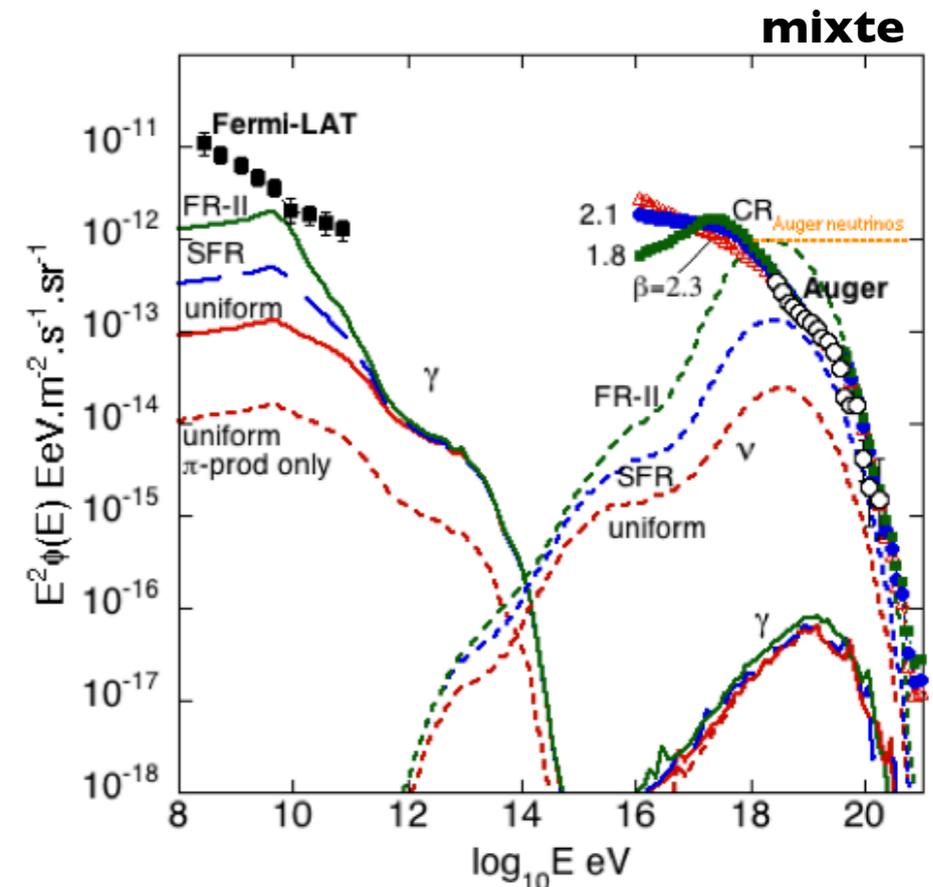
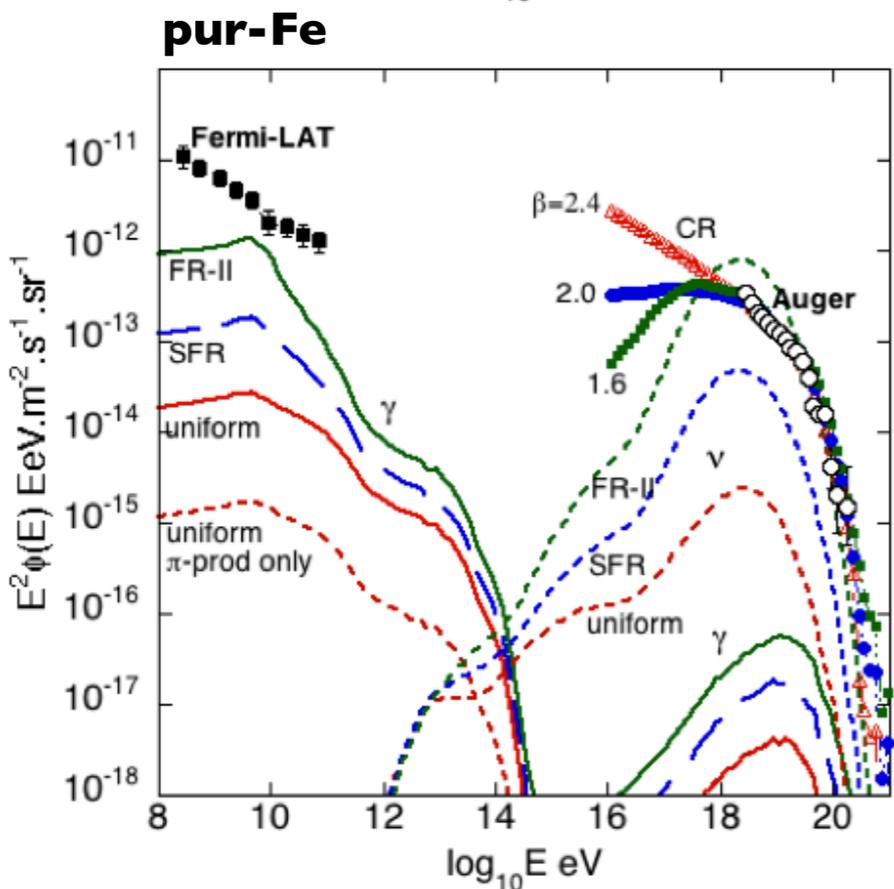
- Flux de photons négligeable à ultra-haute énergie
- Flux de neutrinos très faible, hors de portée des détecteurs actuels
- Les données de Fermi ne semblent pas contraignantes

Flux de gammas



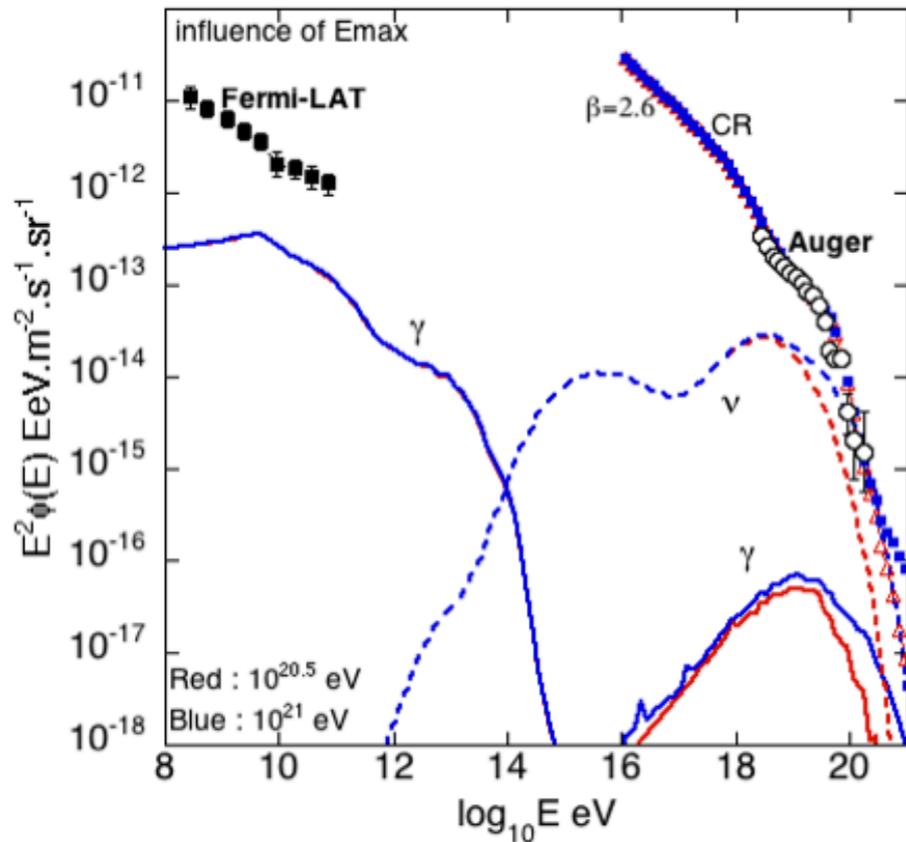
Le flux gamma diffus mesuré par le satellite Fermi contraint le modèle pur-proton le + optimiste

Peu d'effet de l'évolution des sources avec z sur le flux de gammas aux UHE



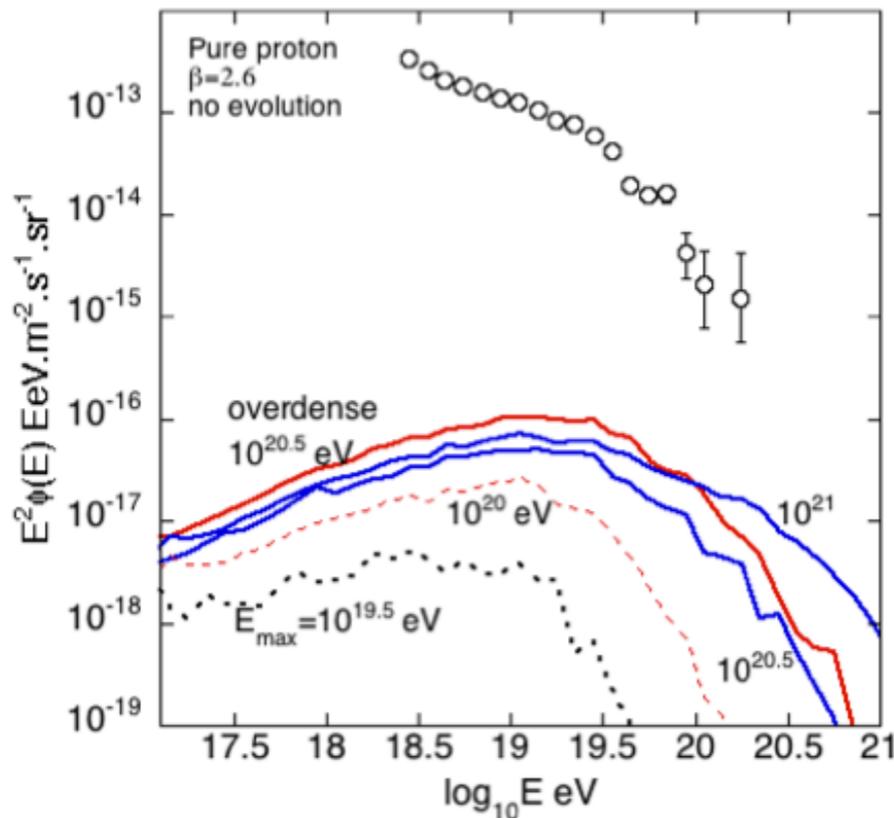
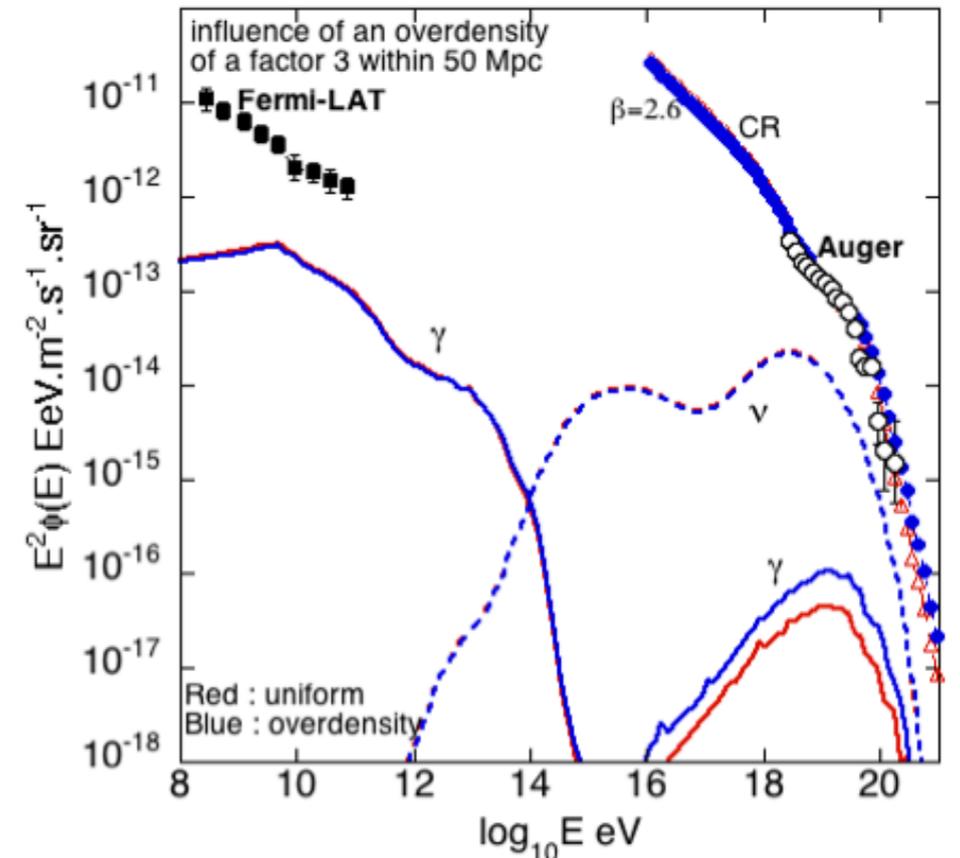
Decerprit et al, 2011a

Dépendances des flux gamma



Comme avec les neutrinos, un E_{\max} + grand rajoute 1 composante gamma secondaire aux UHE

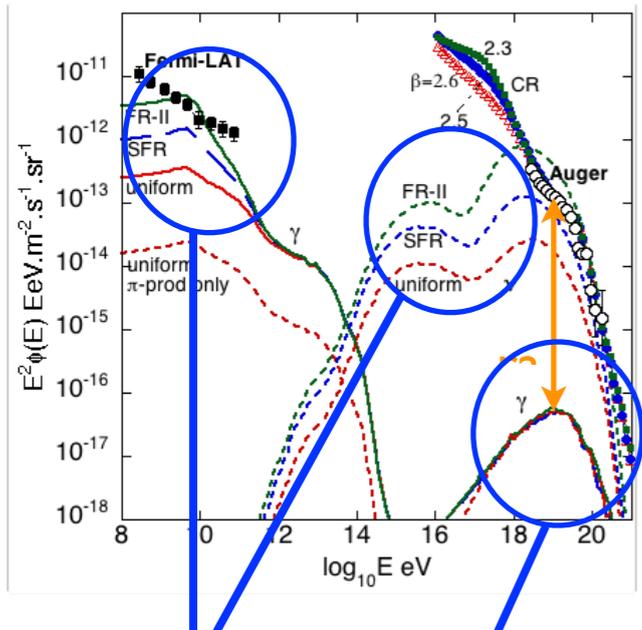
Contrairement aux neutrinos, l'effet d'une surdensité locale est visible



Aux UHE, les flux de photons secondaires diffus sont à peine $> 10^{-3}$ → très difficiles à détecter pour Auger/JEM-EUSO

Contraintes multi-messagers

synthèse



- Scénario pur-protons/FR-II contraint par Fermi
- Si les FR-II contribuent à 10 % du flux des RCUHE, alors les scénarios pur-protons/FR-II ne sont plus contraints par Fermi !
- Mais suffisamment de neutrinos attendus pour IceCube
- Une composante majoritaire de sources accélèrent des noyaux aux plus hautes énergies

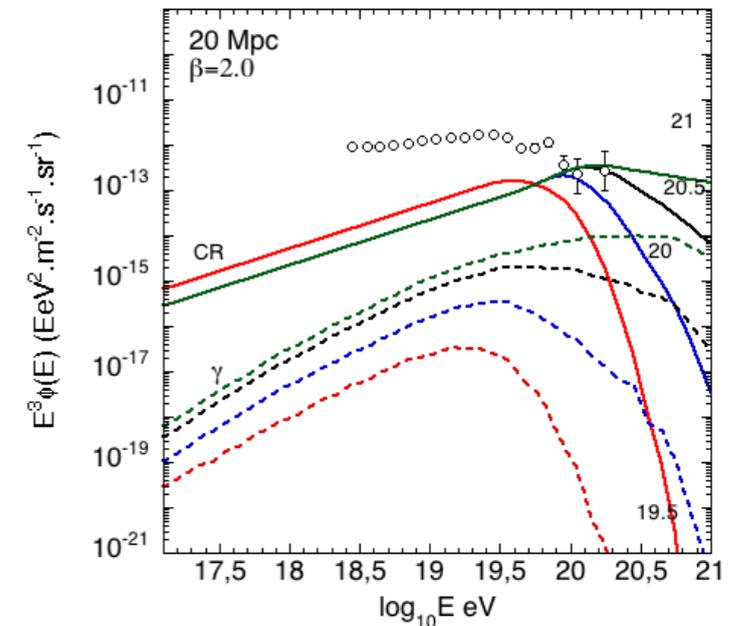
● Mais la présence de sources de protons à UHE n'est pas exclue

Contraintes "cosmologiques" Contraintes "locales"

Études anisotropies et sources individuelles (Decerprit et al, 2011a)

- Caractériser les flux de photons secondaires attendus pour des sources proches (cf. suite)

- Approche nouvelle : on peut chercher les sources de protons avec les multi-messagers :
 - avec les neutrinos : on voit les sources lointaines
 - avec les gammas : on voit les sources plus locales

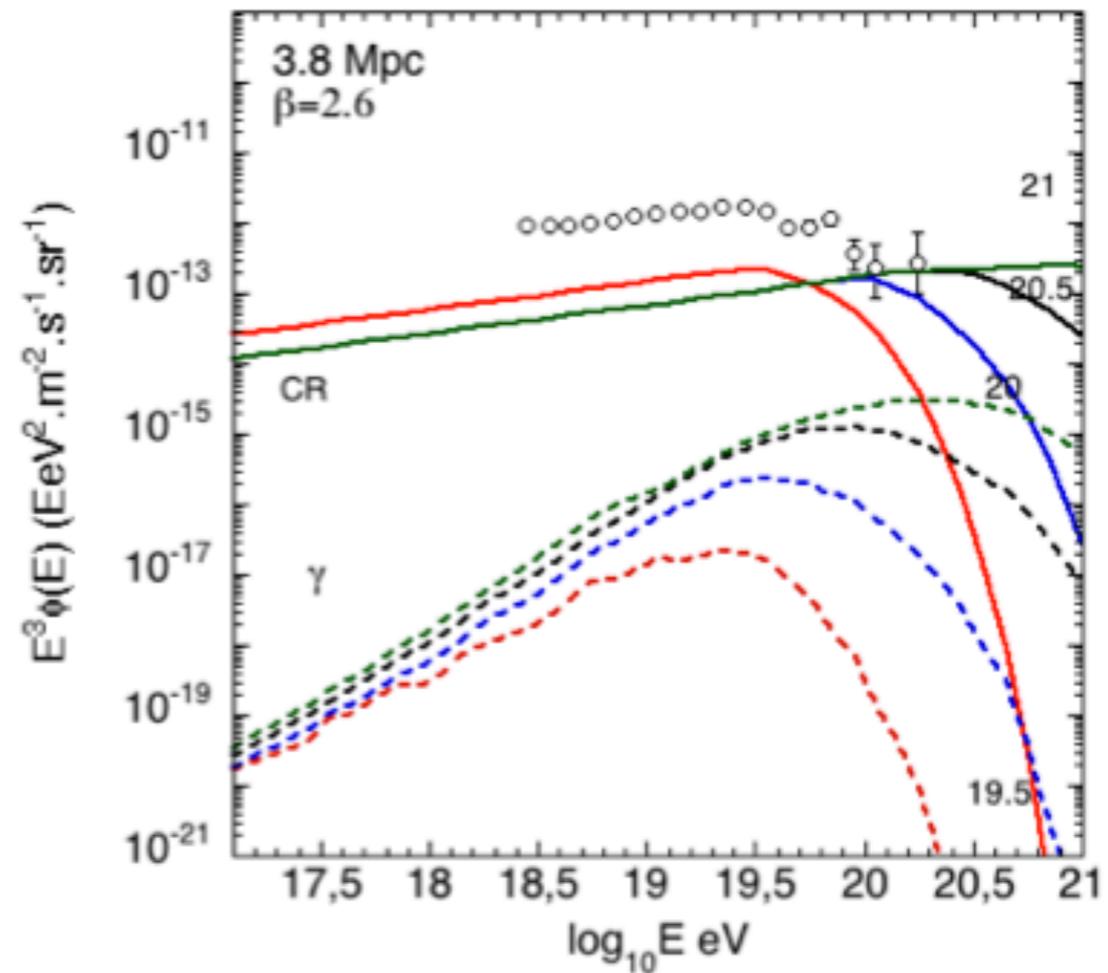
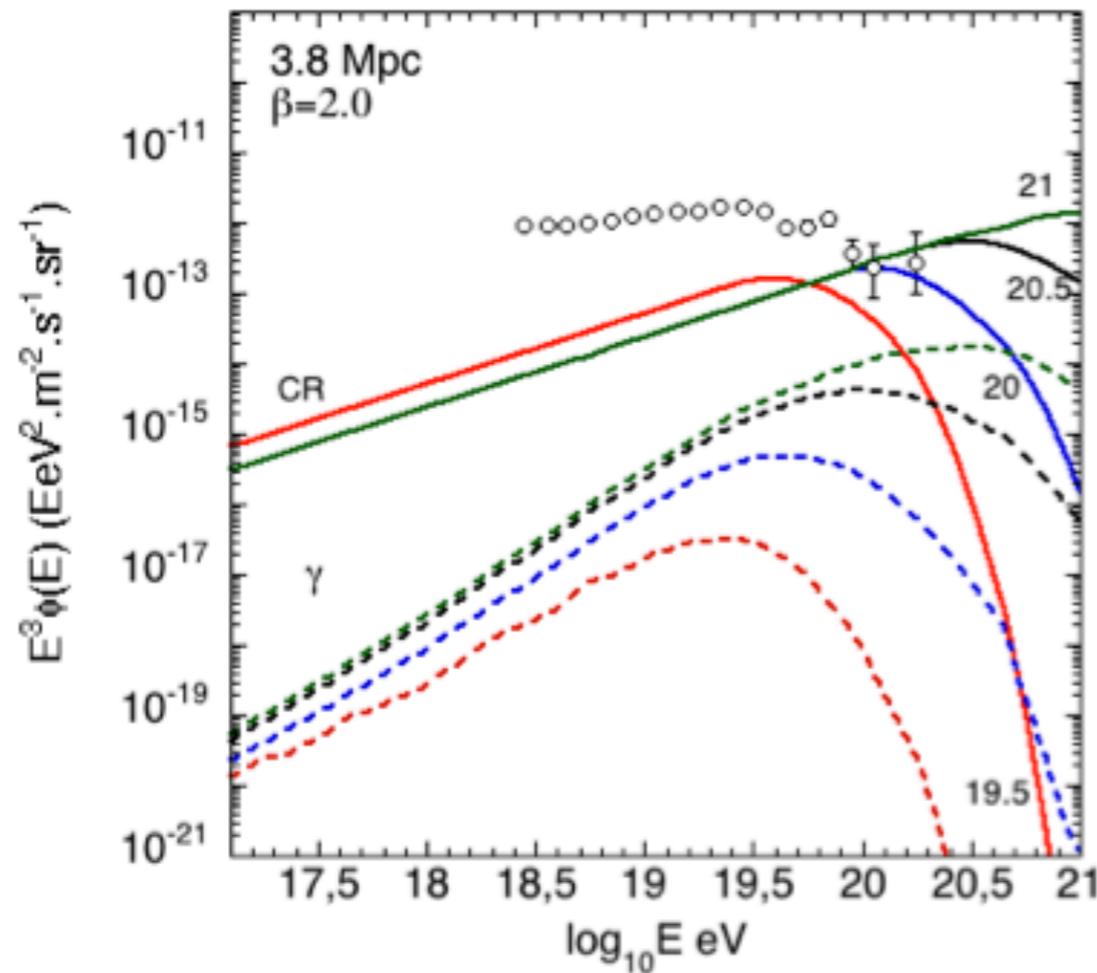


Photons et neutrinos nous apprennent des choses \neq

Sources ponctuelles : nouvel élan ?

Auger mesure l'excès d'événements autour de Cen-A (~20% des événements > 55 EeV)
→ Supposons 1 source proton et normalisons son flux à 15% du flux d'Auger à 55 EeV

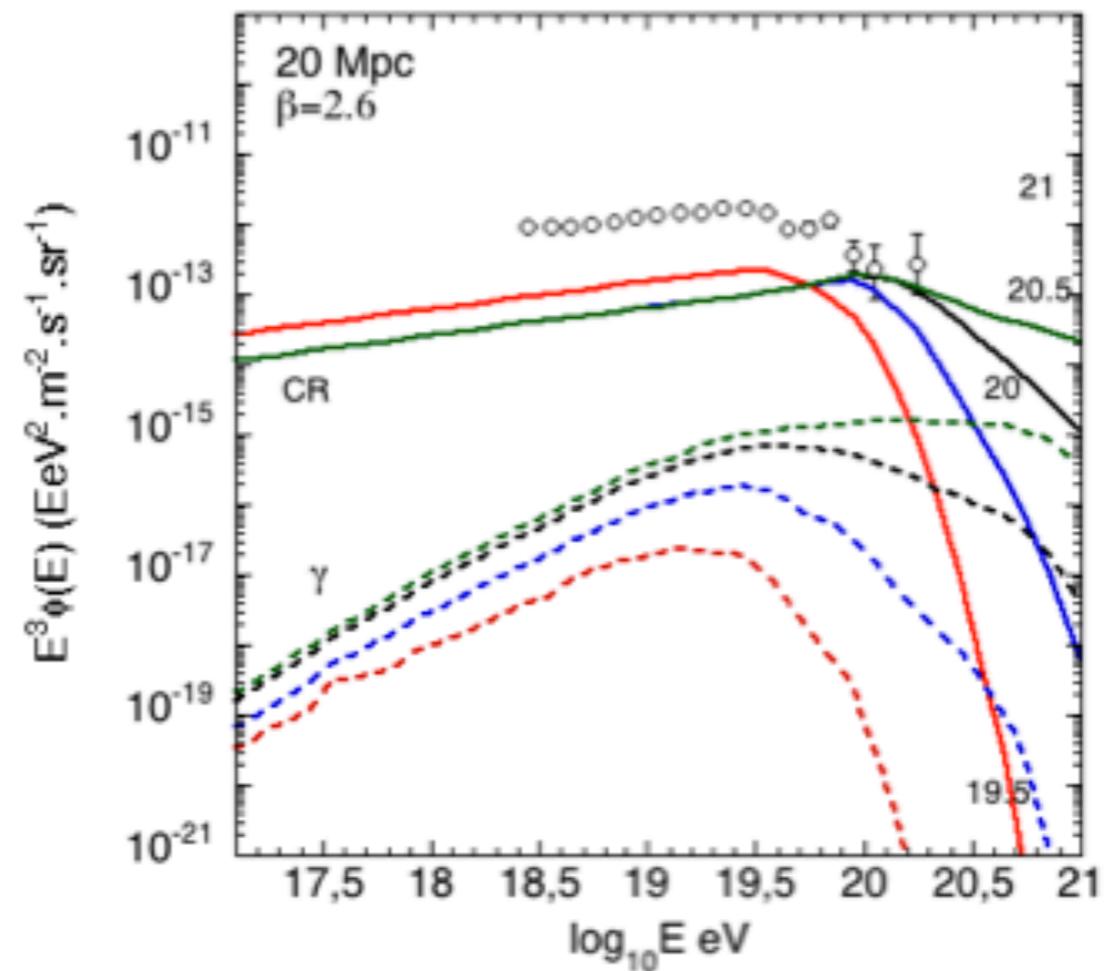
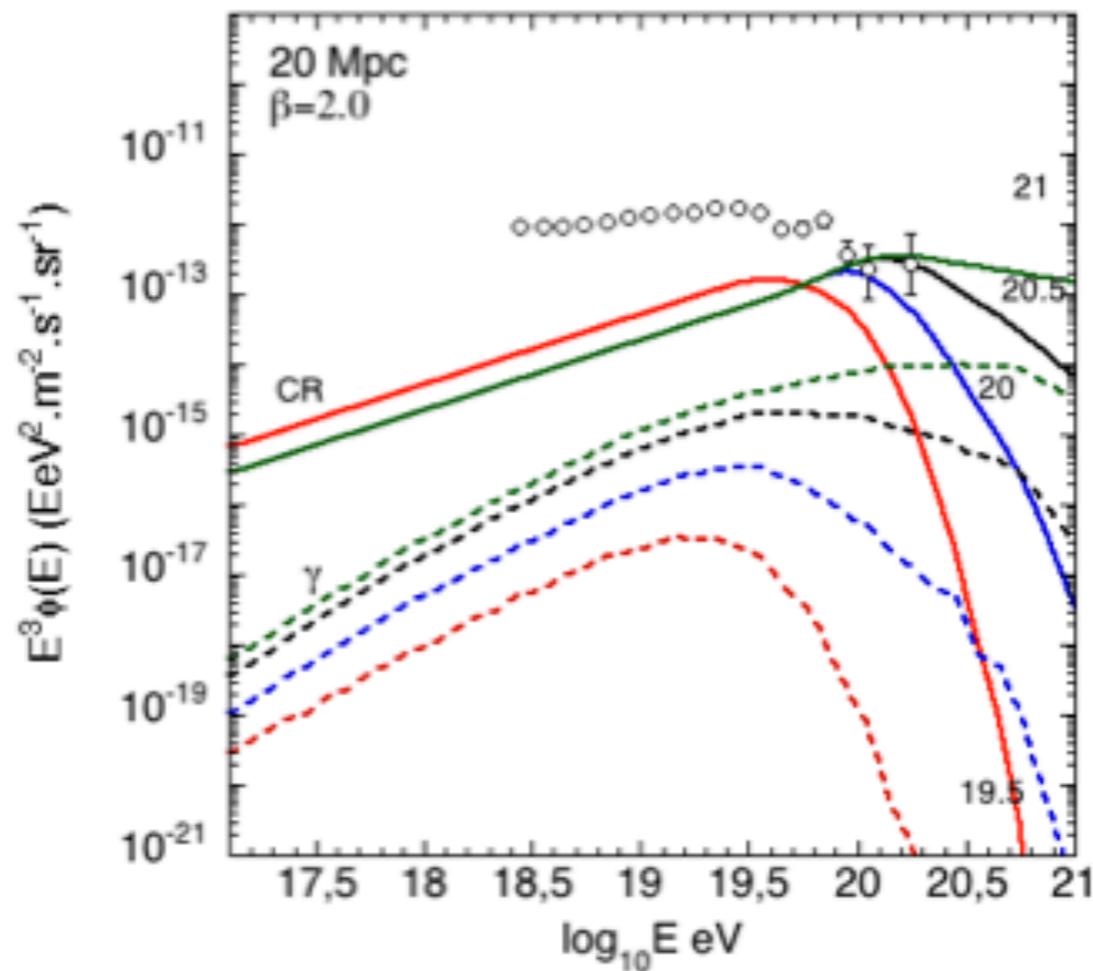
Flux prédits pour ≠ distances de la source



Sources ponctuelles : nouvel élan ?

Auger mesure l'excès d'événements autour de Cen-A (~20% des événements > 55 EeV)
→ Supposons 1 source proton et normalisons son flux à 15% du flux d'Auger à 55 EeV

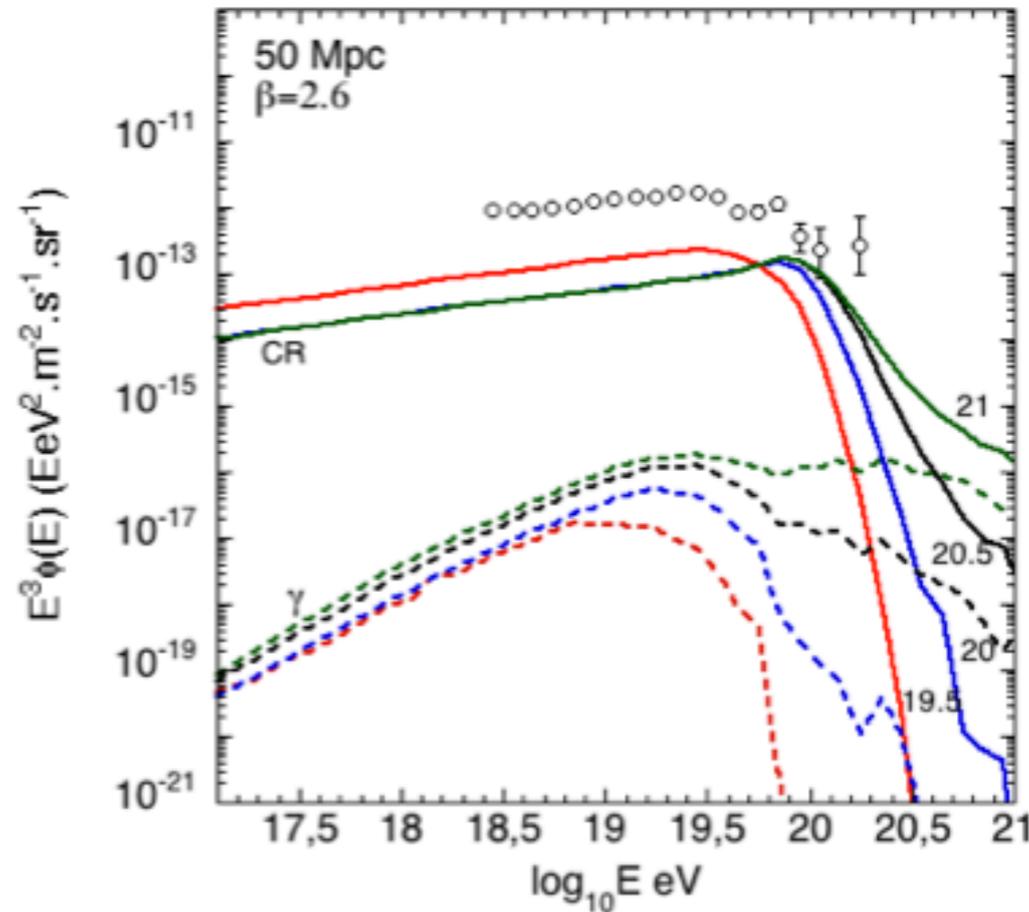
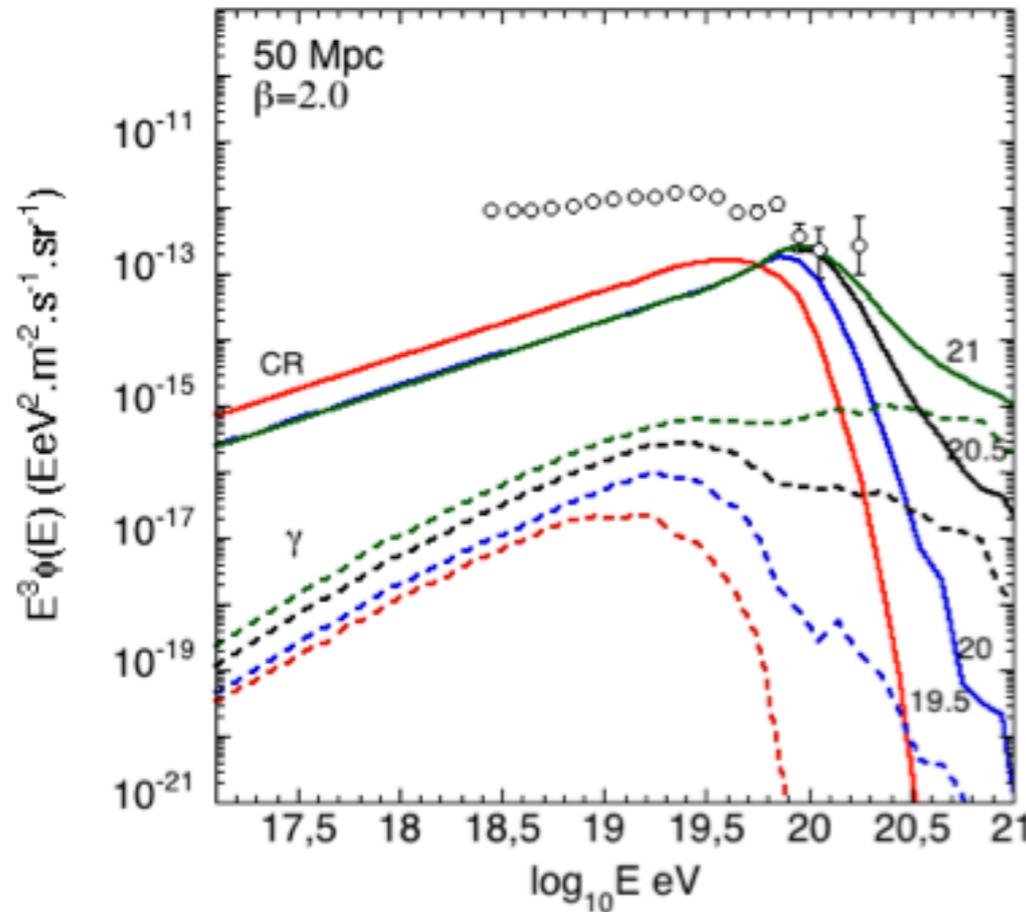
Flux prédits pour ≠ distances de la source



Sources ponctuelles : nouvel élan ?

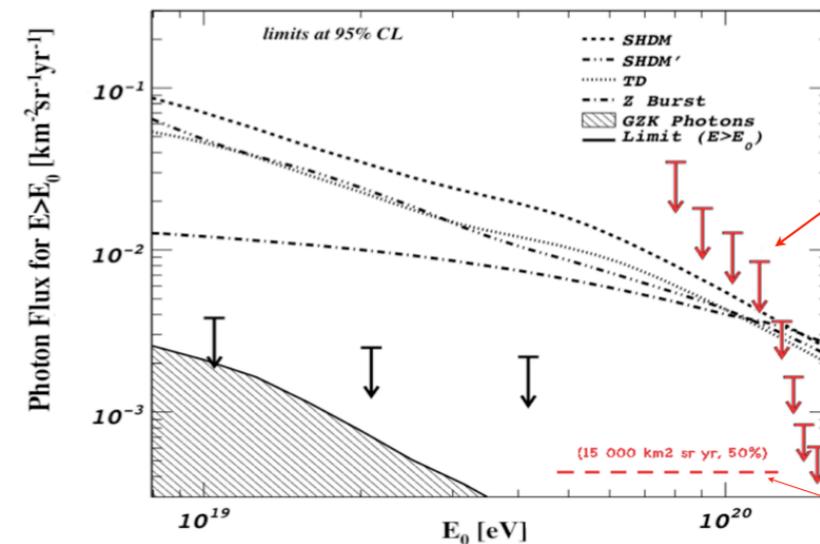
Auger mesure l'excès d'événements autour de Cen-A (~20% des événements > 55 EeV)
 → Supposons 1 source proton et normalisons son flux à 15% du flux d'Auger à 55 EeV

Flux prédits pour ≠ distances de la source



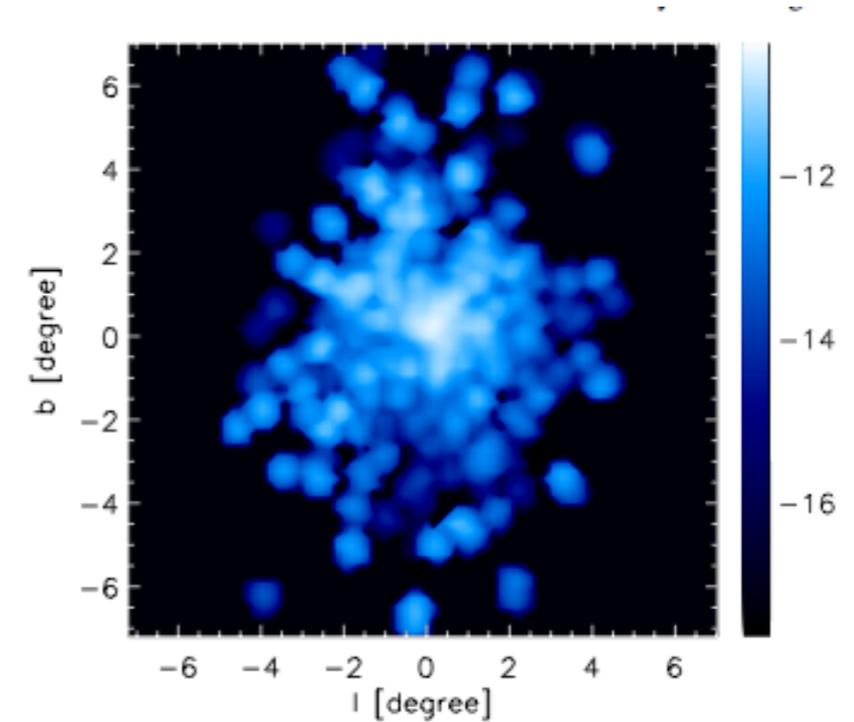
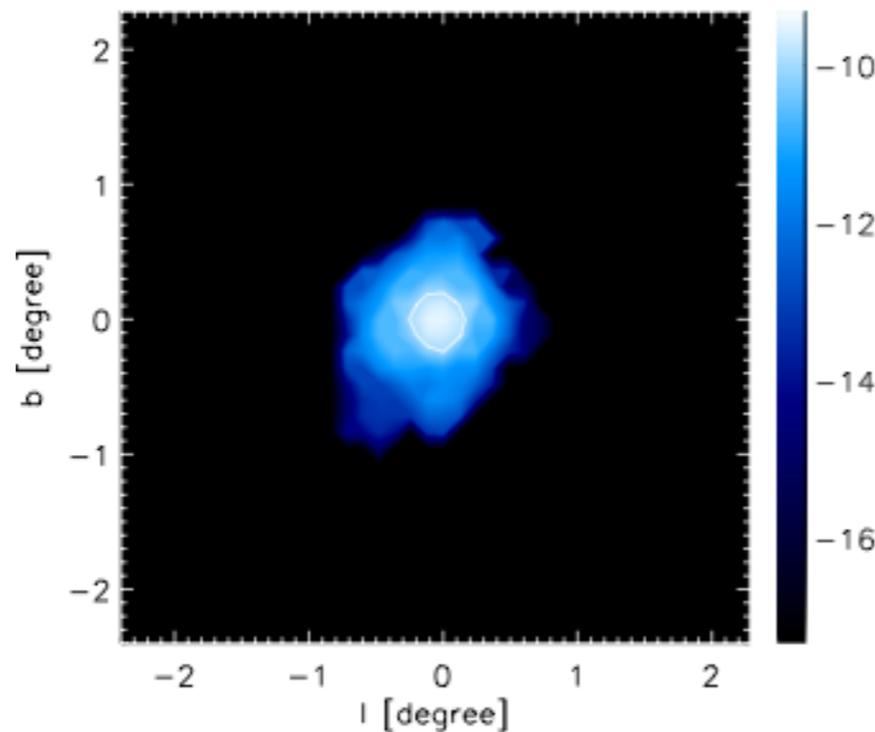
Decerprit et al., 2011a

Dans le cas le + optimiste, Auger pourrait détecter quelques événements.
 JEM-EUSO : contraintes + fortes



Images de sources puissantes lointaines

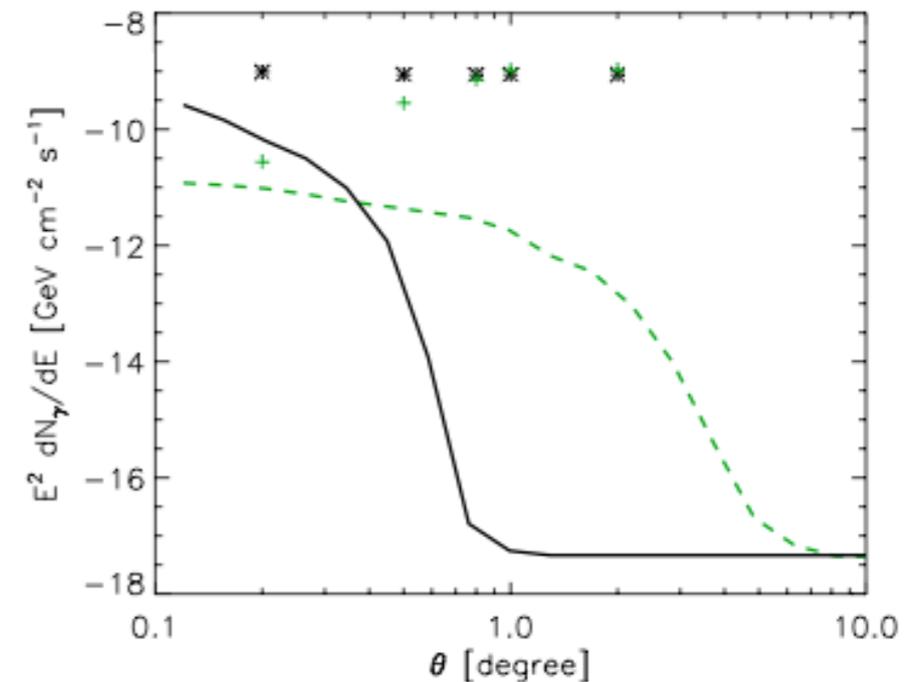
- Images gamma de sources à $D=100$ Mpc ($L=10^{44}$ erg.s $^{-1}$ above 10^{19} eV) et $D=1$ Gpc (10^{46} erg.s $^{-1}$)
- Extension angulaire + petite pour les sources + distantes



*Allard et al.
Kotera et al.
(2010)*

Une fraction importante du flux dans 0.2 (resp. 1) deg. pour la source à 1 Gpc (resp. 100 Mpc)

- ➔ signature de production RCUHE ?
- ➔ pourrait être détectable par CTA



Pourquoi traquer les sources

- Trouver les sources en vaut la peine !
- Même sans identification avec des objets astrophysiques connues...
 - ▶ se rappeler que les sources RCUHE pourraient être nouvelles
 - ▶ ...ou transitoires !
- Même sans les situer à moins d'un degré près...
 - paramètre clefs :
 - ▶ densité de sources
 - ▶ ⇒ puissance individuelle des sources
 - ▶ énergie maximale
 - ▶ déflexions magnétiques



Très important



Contraintes puissantes
sur la phénoménologie
des sources de RCUHE

Intérêt des RCUHE

- Pièce importante d'un ensemble impliquant de la physique des hautes énergies, astrophysique, physique des astroparticules...
- L'accélération des particules dans l'Univers est toujours méconnu
 - ▶ l'ingrédient clef de l'astrophysique des hautes-énergies !
 - ▶ les RCUHE sont les plus insaisissables → particulièrement utiles !
- Les sources de rayons cosmiques sont inconnues à toutes les énergies
- Les RCUHE sont un élément inévitable :
 - ▶ + petites déflexions
 - ▶ petit nombre de sources ⇒ + faciles à identifier (GZK...)
 - ▶ particules offrant le + de challenge...et de contraintes !
 - ▶ le même mécanisme d'accélération pourrait être à l'origine de tous les RC

Intérêt des RCUHE

- Les RC de + basse énergie et les sources usuelles pourraient être moins à même de nous aider
- les sources \sim TeV accélèrent des particules :
 - ▶ choc SNR : modélisation + détaillée n'apportera sans doute que peu
 - ▶ ces sources coupent sous le PeV : pas les sources de CR au-delà !
- Résoudre le mystère des RC pourrait nécessiter l'étude des RCUHE et de la transition Galactique/Extragalactique
- Nous sommes à l'aube « d'observer » les sources de RCUHE :
 - ▶ pour toute paire densité/déflexion
 - ▶ 100 événements $>$ 80 EeV est réalisable
 - ▶ Identification/Localisation probable(s) avec cette statistique !

À retenir : changer d'ère !

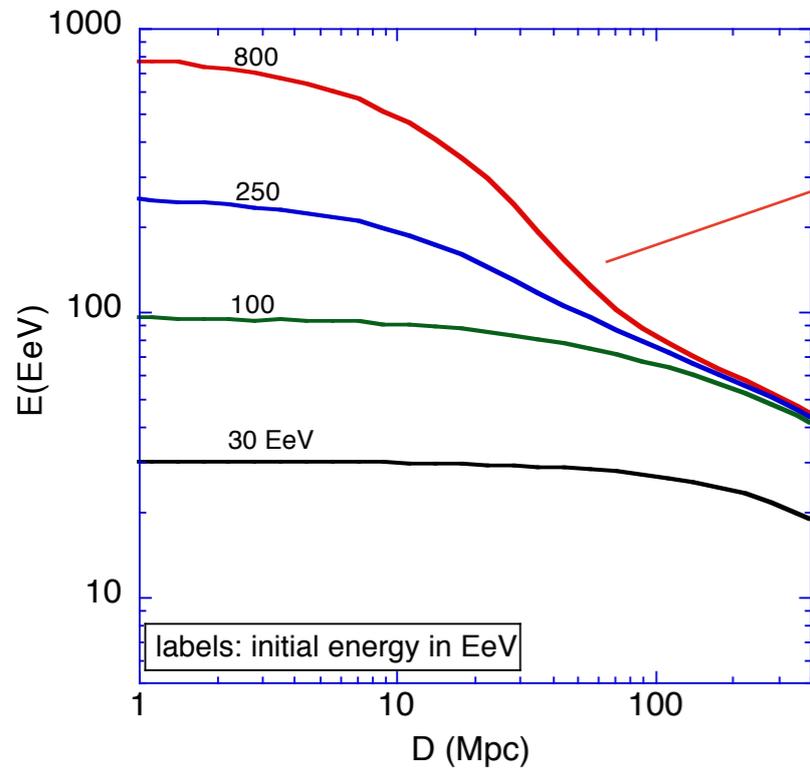
- L'ajout de noyaux enrichit la phénoménologie des RCUHE et de la transition Gal/ExtraGal, ils semblent même nécessaires
- La science des RCUHE est ardue et le spectre d'énergie ne suffit plus...
- Auger a « parlé » sans toutefois donné de réponse...
- On a besoin de plus de statistique (on l'a quantifié) à « UUHE » : JEM-EUSO, nouvelles techniques : opportunité !
- Présent : plus de données, plus de modèles compatibles
- Futur : plus de données, plus de modèles exclus
- Contraintes multi-messagers



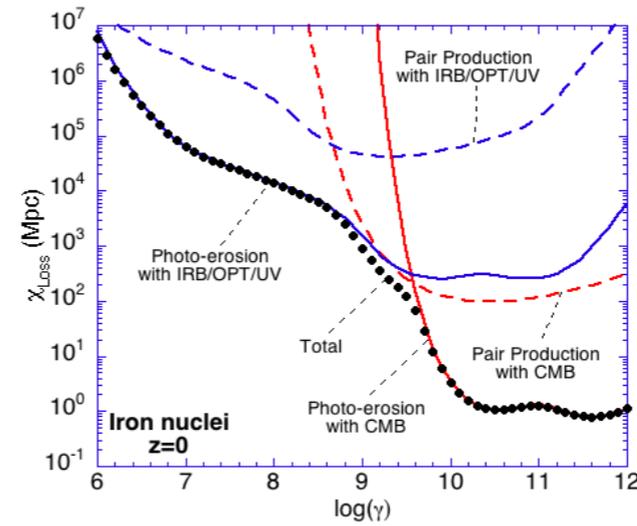
Merci

BACKUP

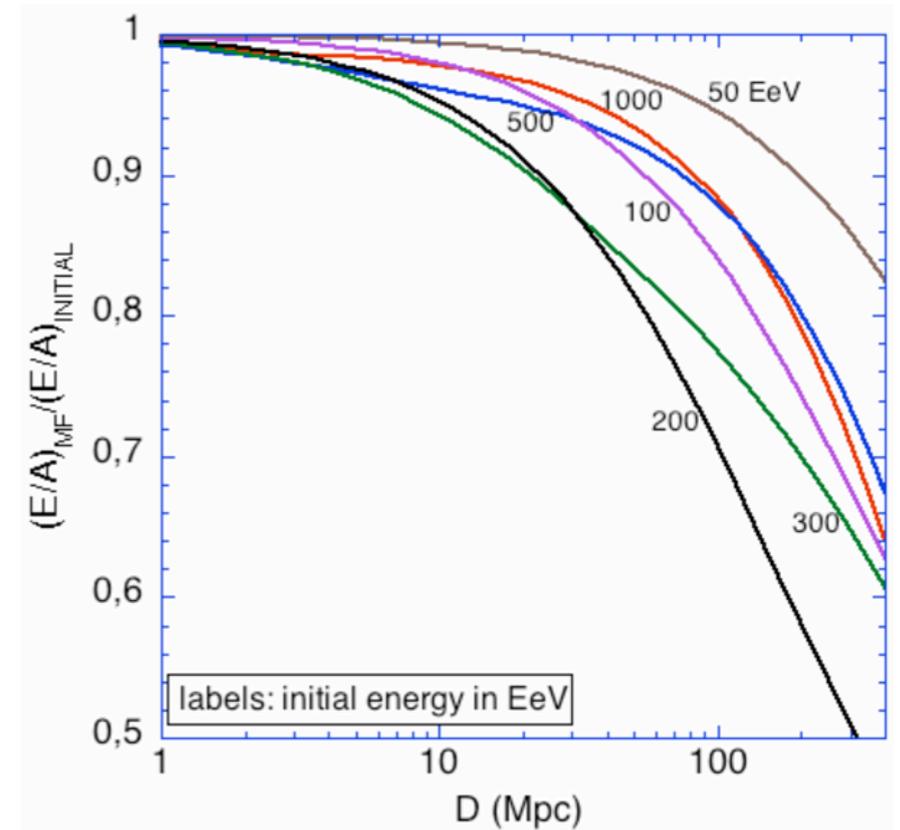
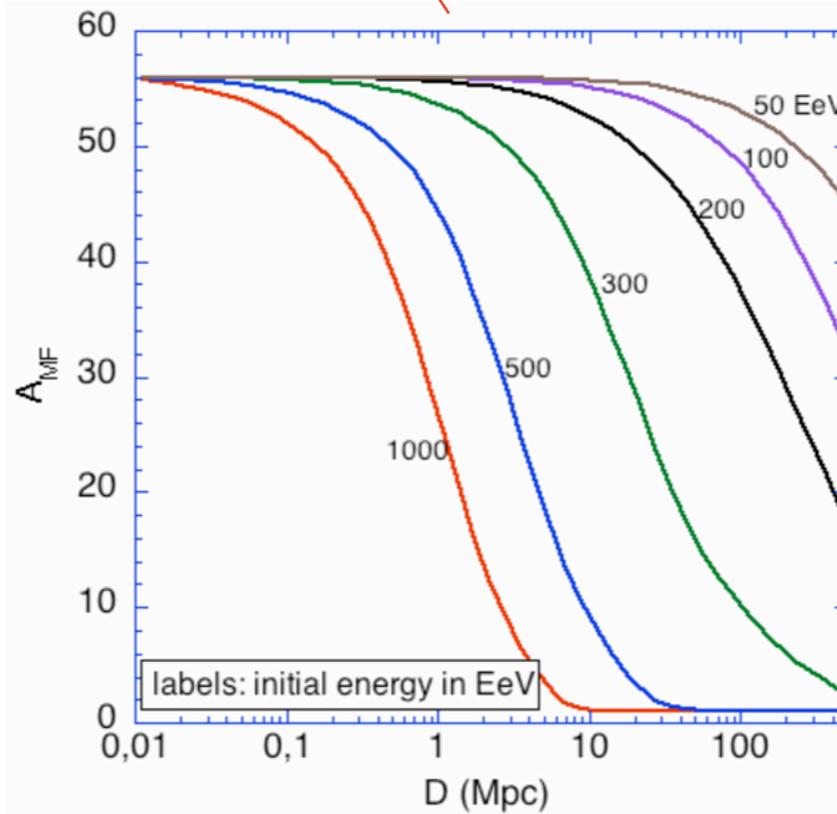
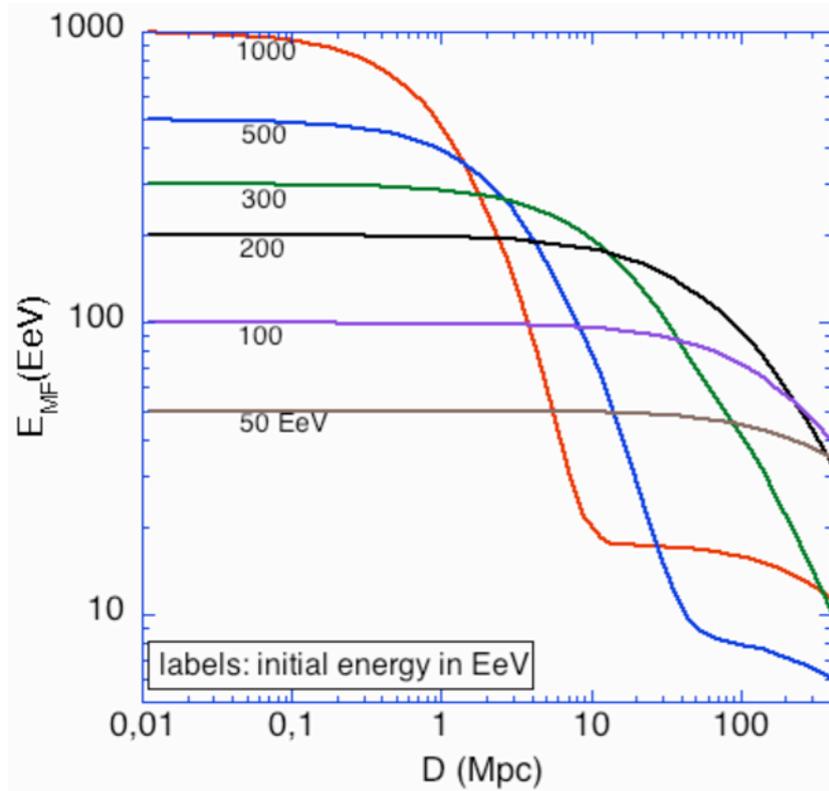
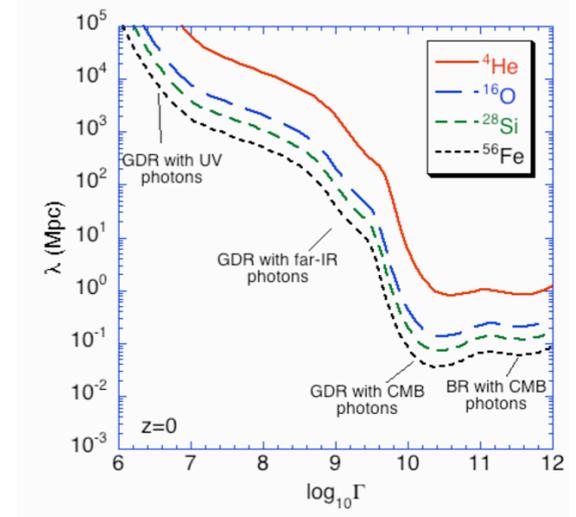
Trajectories in the E,A and Γ spaces



Proton



Iron



Unlike the in the proton case, energy evolution curves can cross
 Lorentz factor evolution depends on the evolution in the (E,A) space
 -> a lot more complicated than the proton case

La percolation

Calcul de la significativité

- Compatibilité des données avec l'isotropie $p_{min} = 6.6 \cdot 10^{-4}$

