



Laboratoire de Physique Corpusculaire de Clermont-Ferrand

Rapport Janus

Étude du flux de muons atmosphériques

par

Aurélie JALLAT

Responsable de stage :
Cristina CÂRLOGANU

Juin 2010

Remerciements

Je tiens à remercier tout particulièrement Cristina Cârloganu pour m'avoir guidé tout au long du stage et permis avec Hélène Fonvielle de faire un deuxième stage JANUS avec elle. Je remercie également Emmanuel Gangler pour avoir répondu    toutes mes questions et Emmanuel Busato pour m'avoir appris    utiliser CORSIKA.

Table des matières

1	Présentation du projet TOMUVOL	5
2	Les rayons cosmiques	6
2.1	Production	6
2.2	Détection	6
2.2.1	Exemple de détecteurs au sol : l'observatoire Pierre Auger	7
2.3	Recherche bibliographique	7
2.3.1	Composition	7
2.3.2	Spectre en énergie	8
3	Simulation des gerbes avec CORSIKA	10
3.1	Développement des gerbes atmosphériques	10
3.2	Les résultats de la simulation	10
3.2.1	Muons atmosphériques engendrés par les protons	11
3.2.2	Muons atmosphériques engendrés par les noyaux d'hélium	13
3.2.3	Muons atmosphériques engendrés par les noyaux de fer	16

Introduction

Mon stage JANUS s'est déroulé au mois de juin 2010, au sein du Laboratoire de Physique Corpusculaire de Clermont-Ferrand, avec Cristina CÂRLOGANU sur le projet TOMUVOL.

TOMUVOL a pour but de tomographier le Puy-de-Dôme avec des muons atmosphériques. Ces derniers naissent des gerbes créées par les rayons cosmiques en traversant l'atmosphère terrestre.

J'ai donc dans un premier temps fait une recherche bibliographique sur la composition des rayons cosmiques primaires et sur le flux primaire des différentes particules le composant afin de pouvoir ensuite simuler les gerbes occasionnées dans l'atmosphère avec le programme CORSIKA.

J'ai dans un second temps effectué les simulations avec CORSIKA, pour connaître le flux de muons atmosphériques .

Chapitre 1

Présentation du projet TOMUVOL

L'objectif du projet TOMUVOL est de tomographier les volcans et en particulier le Puy-de-Dôme avec les muons atmosphériques. Les informations ainsi obtenues permettront à la fois de mieux connaître la structure interne du Puy-de-Dôme et de mettre en place une méthode pour surveiller les volcans actifs.

Le principe de détection

Le principe de détection utilisé est basé sur le pouvoir pénétrant des muons car suivant leur énergie, les muons peuvent traverser quelques dizaines de mètres à plusieurs kilomètres de roche avant de se désintégrer. Par exemple, un muon de 100 GeV peut traverser en moyenne 155 m de roche alors qu'un muon de 1 TeV peut traverser 900 m et un muon de 10 TeV peut parcourir 2300 m dans la roche avant de se désintégrer.

Le schéma de l'installation est représenté sur la figure 1.1. Un détecteur de muons est placé au pied du volcan. Il enregistre en continu et en temps réel le flux de muons qui ont traversé le volcan ϕ_f en fonction de l'angle zénithal et de l'angle azimutal d'incidence des muons. Le flux de muons mesuré dépend du flux de muons atmosphériques ϕ_0 (flux de muons avant de traverser le volcan), de la distance parcourue R par les muons dans le volcan ainsi que la densité de la matière traversée.

$$\phi_f = \frac{\phi_0}{R * \rho}$$

Quand le flux de muons atmosphériques ainsi que le flux de muons ayant traversé le volcan et la distance parcourue dans la roche sont connues, il devient possible de connaître la densité de la roche traversée. Il est ainsi possible de dresser la cartographie densitométrique du volcan en faisant varier les angles zénithal et azimutal de détection.

Pour faire une mesure précise de la densité, il est nécessaire de connaître précisément ϕ_0 et R , c'est donc pour cela que nous allons étudier plus en détail ϕ_0 .

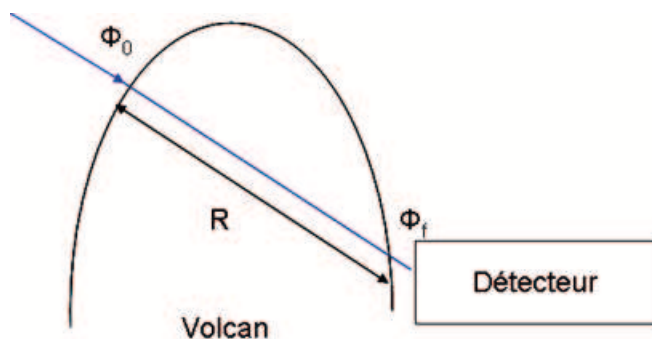


FIGURE 1.1: Schéma du principe de détection

Chapitre 2

Les rayons cosmiques

Afin de connaître le flux de muons atmosphériques, il est nécessaire de connaître le flux de rayons cosmiques primaires car les muons atmosphériques sont produits dans l'atmosphère quand les particules du rayonnement cosmique entrent en collision avec les molécules d'air de l'atmosphère.

Les rayons cosmiques sont des particules élémentaires et des noyaux atomiques qui voyagent dans l'espace à des vitesses voisines de celle de la lumière.

Les rayons cosmiques s'approchant suffisamment de la Terre peuvent être détectés par des instruments placés dans des sondes spatiales ou dans des satellites en orbite terrestre. Ils sont appelés rayons cosmiques primaires.

Ceux d'entre eux qui pénètrent dans l'atmosphère terrestre sont appelés rayons cosmiques secondaires. En effet en pénétrant dans l'atmosphère ils entrent en collision avec des noyaux d'oxygène ou d'azote, et produisent des générations successives de particules secondaires, appelées gerbes qui peuvent soit être absorbées par l'atmosphère, soit atteindre le niveau de la mer, voir pour certaines de leurs composantes s'enfoncer profondément dans le sol.

2.1 Production

Les rayons cosmiques sont présents partout dans l'Univers. De plus la gamme d'énergie couverte par les rayons cosmiques est très grande, en effet elle s'étend de quelques eV jusqu'à 10^{20} eV, ce qui laisse penser qu'il y a plusieurs mécanismes de production plus ou moins violents. Ils peuvent être associés par exemple à des réactions de fusion au cœur des étoiles ou aux accélérations dans les explosions de supernovæ.

2.2 Détection

On peut distinguer schématiquement deux techniques de détection des rayons cosmiques.

La première est celle des expériences embarquées sur des satellites ou dans des ballons. L'intérêt majeur de cette technique est qu'elle mesure directement les rayons cosmiques primaires. Par conséquent la mesure de l'énergie et la détermination de la composition de ceux-ci sont plus simples. En revanche, l'inconvénient de cette technique est que la taille des détecteurs qu'il est possible d'embarquer à bord d'un satellite ou d'un ballon est limitée. Par conséquent, cette technique est utilisée pour détecter le flux de rayons cosmiques primaire dans une gamme d'énergie où il reste élevé, c'est-à-dire jusqu'à des énergies de l'ordre de 10^{15} eV où le flux est d'environ 10 particule par km^2 et par an.

La seconde technique est en quelque sorte complémentaire de la première, puisqu'elle utilise des détecteurs au sol permettant de couvrir de grandes superficies. Ils peuvent donc mesurer le flux de rayons cosmiques quand celui-ci est faible, c'est-à-dire à des énergies élevées. Mais l'inconvénient de cette technique est que ces détecteurs ne mesurent pas directement le flux de rayons cosmiques primaires mais les gerbes atmosphériques que ceux-ci provoquent en interagissant avec l'atmosphère.

2.2.1 Exemple de détecteurs au sol : l'observatoire Pierre Auger

L'observatoire Pierre Auger est un observatoire astronomique implanté en Argentine. Un projet prévoit l'extension de cet observatoire sur un second site dans l'hémisphère nord au États-Unis afin d'observer le ciel dans sa intégralité.

Son but est de détecter des rayons cosmiques à très hautes énergies. Pour cela, l'observatoire dispose d'un détecteur hybride, c'est-à-dire qu'il utilise deux modes de détection complémentaires des gerbes afin d'analyser de façon optimale les caractéristiques de celles-ci et de pouvoir ainsi remonter jusqu'au rayon cosmique initial (mesure de l'énergie, reconstruction de la direction, voir identification de la nature du rayon incident). Comme schématisé sur la figure 2.1, Auger est ainsi muni de :

- détecteurs de surface couvrant 3000 m^2 , composé chacun de trois photo-multiplicateurs placés dans des cuves remplies d'eau qui comptent les particules qui les frappent. Ils détectent par effet Tcherenkov la composante chargée des gerbes (électrons, muons).
- télescopes de fluorescence qui observent le profil de la gerbe la nuit. Pour cela, ils captent la lumière ultraviolette émise lors du passage des particules chargées de la gerbe dans l'atmosphère. En effet, lorsque les particules chargées de la cascade traversent l'atmosphère, elles excitent les molécules d'air et celles-ci émettent un rayonnement dans l'ultra-violet quand elles se désexcitent.

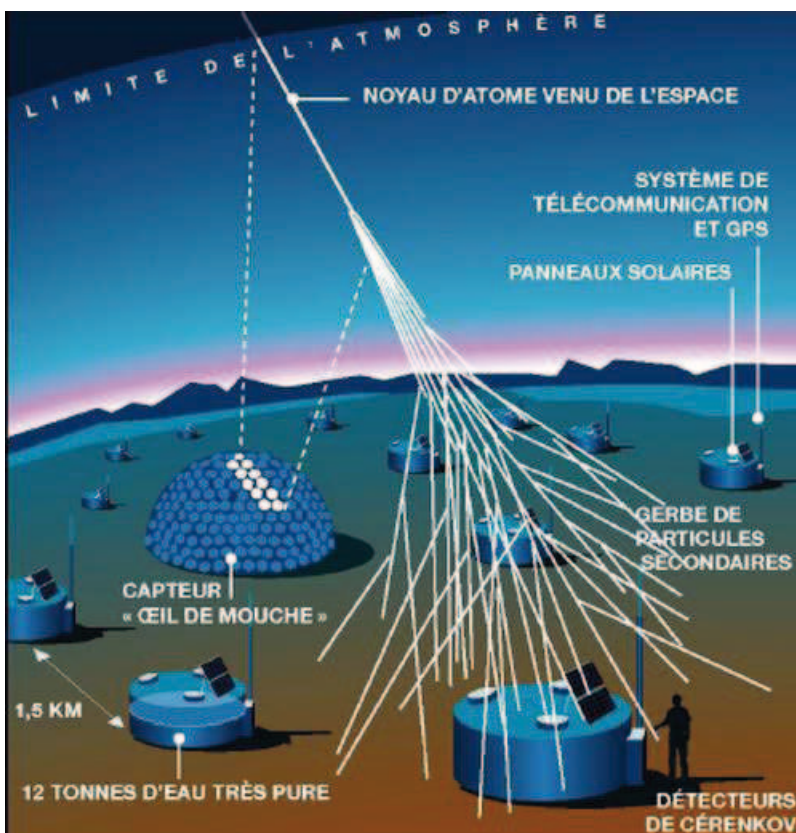


FIGURE 2.1: Schéma de l'Observatoire Pierre Auger

2.3 Recherche bibliographique

2.3.1 Composition

Notre recherche bibliographique nous a permis de conclure comme indiqué sur la figure 2.2 que quelle que soit l'énergie entre 100 GeV et 5 PeV, le flux de rayons cosmiques primaires est principalement composé de protons pour environ 50%, d'hélium pour environ 25%, viennent ensuite le fer, l'oxygène

et le carbone. Nous remarquons également que le flux de rayons cosmiques primaires suit une loi de puissance de l'énergie.

Flux de rayons cosmiques primaires

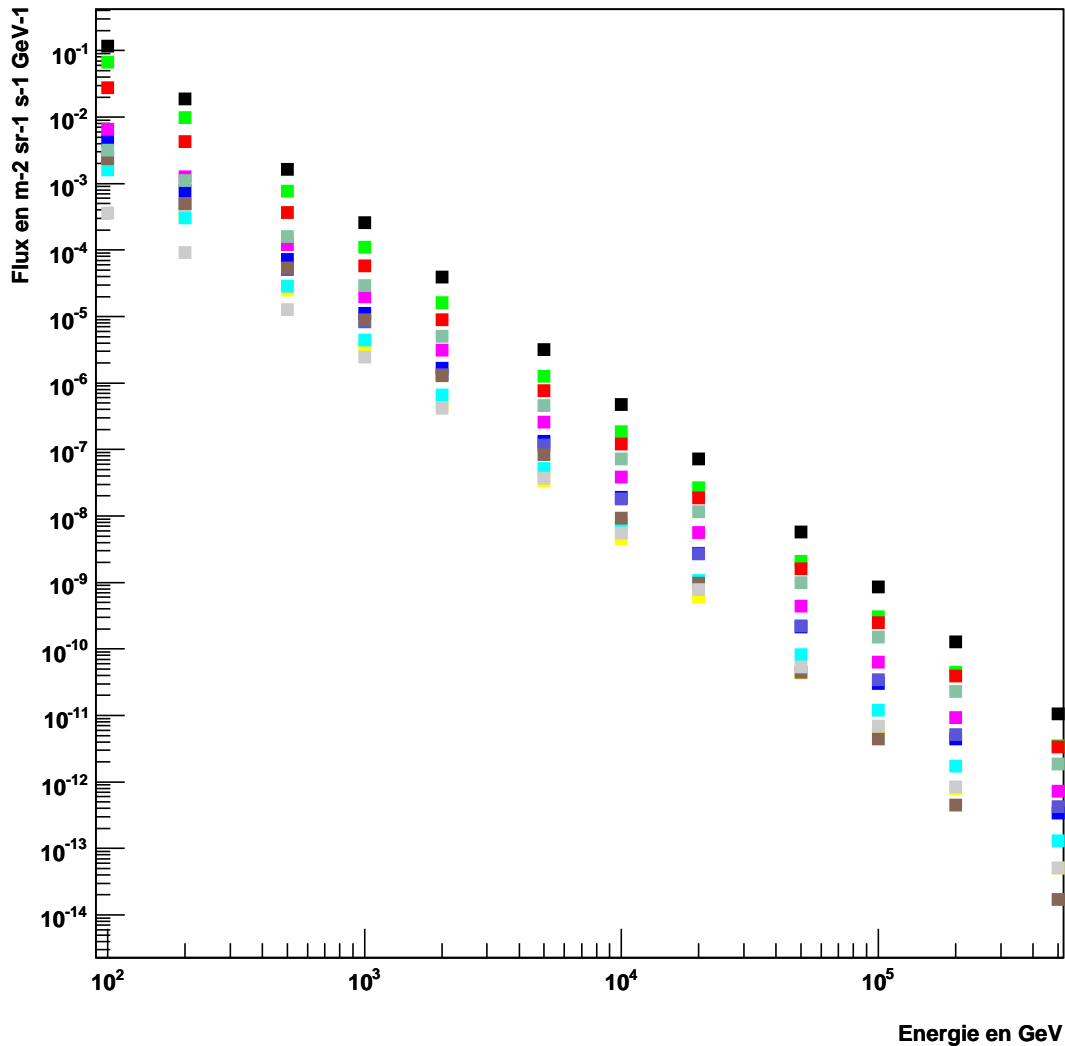


FIGURE 2.2: Flux primaire de différents éléments pour des énergies de 100 GeV à 1 PeV. Est représenté en noir le flux total, en vert le flux de protons, en rouge le flux d'hélium, en vert pâle le flux de fer, en bleu de le flux de carbone, en jaune le flux d'azote, en magenta le flux d'oxygène, en cyan le flux de néon, en marron le flux de silicone et en gris clair le flux de sulfure. Les points expérimentaux ont été obtenus à partir de la référence [1].

2.3.2 Spectre en énergie

Comme nous pouvons le voir sur les figures 2.3 et 2.4 il décroît rapidement quand l'énergie augmente. Nous pouvons le représenter par une loi de puissance en énergie. L'exposant de la loi de puissance est appelé indice spectral. Il est de -2,75 pour le spectre du flux primaire de proton et de -2,61 pour le spectre du flux primaire de noyaux d'hélium pour des énergies de 100 GeV à 1 PeV. Pour se donner un ordre d'idée, chaque m^2 de la haute atmosphère est frappé par une particule de 100 GeV toutes les secondes, mais par une particule de 100 TeV tous les ans.

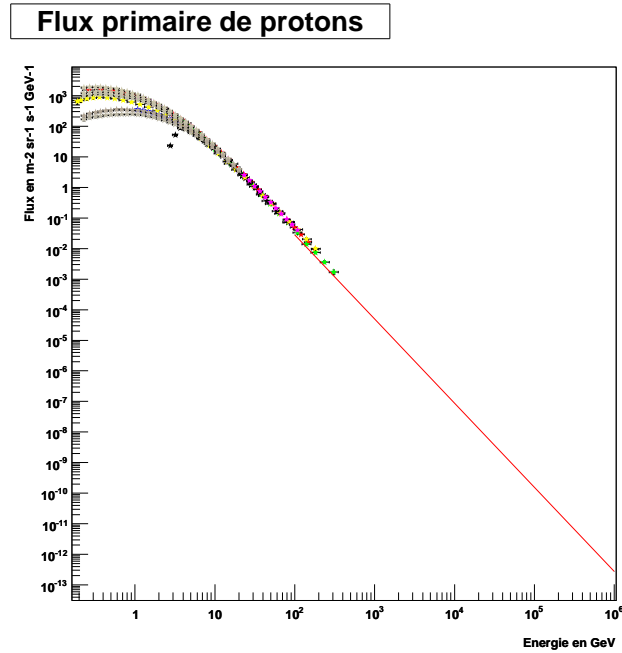


FIGURE 2.3: Flux primaire de proton entre 1 GeV et 10^6 GeV. Les points expérimentaux ont été obtenus à partir des références [2] [3] [4] [5] [6] [7] [8] et la ligne rouge représentant la loi de puissance en énergie du flux primaire de protons a été obtenue à partir de la référence [9].

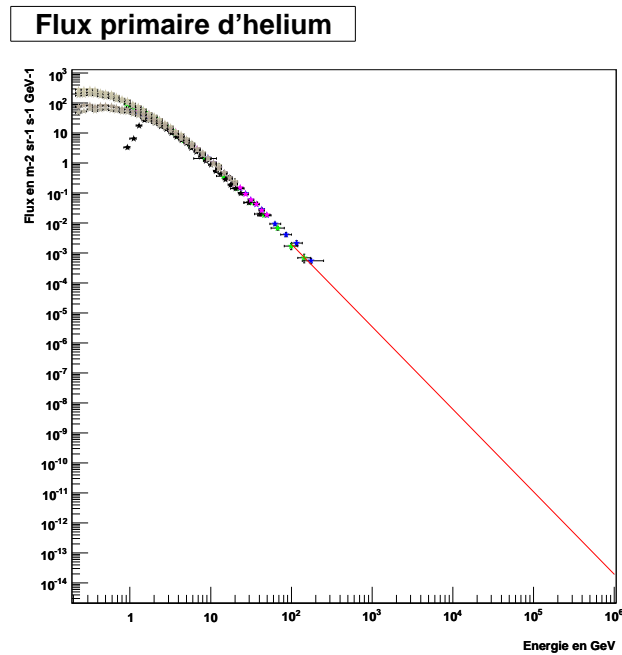


FIGURE 2.4: Flux primaire d'hélium entre 1 GeV et 10^6 GeV. Les points expérimentaux ont été obtenus à partir des références [2] [3] [4] [5] [6] et la ligne rouge représentant la loi de puissance en énergie du flux primaire d'hélium a été obtenue à partir de la référence [9].

Chapitre 3

Simulation des gerbes avec CORSIKA

Connaissant le flux de rayons cosmiques primaires, il reste à simuler le développement des gerbes produites pour connaître le flux de muons atmosphériques en fonction de l'altitude, de la direction d'observation (angles zénithal et azimutal) ainsi que de l'énergies du flux cosmique primaire. Cette simulation se fait grâce au programme de simulation CORSIKA. Ce programme prend en compte la composition de l'atmosphère, les interactions possibles entre les particules du flux cosmique primaire et les molécules de l'atmosphère pour simuler le développement des gerbes atmosphériques en fonction entre autres de la particule incidente, de son énergie, de l'altitude d'observation ainsi que des angles zénithal et azimutal d'observation.

3.1 Développement des gerbes atmosphériques

Lorsqu'un proton ou un noyau de très haute énergie entre dans la haute atmosphère, il y produit en cascade diverses sortes de réactions qui font naître une gerbe « hadronique ».

Cela commence par l'éclatement du noyau et la projection de protons, de neutrons et de noyaux légers qui, à leur tour provoquent des réactions analogues. Dans ces mêmes conditions sont aussi créés des pions et des kaons qui instables vont aussi à leur tour se désintégrer. Ce sont principalement ces réactions, chacune répétée des milliers de fois, qui engendrent le développement d'une gerbe atmosphérique.

Les pions neutres donnent naissances à des photons qui engendrent des gerbes électromagnétiques, alors que les pions chargés sont à l'origine de nouvelles réactions nucléaires. Certains se désintègrent en muons et neutrinos.

Les neutrinos s'échappent sans interagir ou presque, alors que les muons soit se désintègrent en électrons, soit pour les plus énergétiques d'entre eux, parviennent jusqu'au sol.

Ainsi les particules qui atteignent le niveau de la mer sont principalement des muons et des électrons.

Ce sont les muons et non les électrons qui sont utilisés pour la tomographie car les électrons n'arrivent pas à traverser le volcan. De plus tous les muons n'auront pas suffisamment d'énergie pour réussir à traverser le Puy-de-Dôme. L'énergie nécessaire pour que les muons puissent traverser le Puy de Dôme dépend de la distance R parcourue par les muons dans le volcan, celle-ci dépend des angles zénithal et azimutal d'incidence des muons. Quand R est maximale, il faut que les muons aient une énergie d'au moins 1 TeV pour réussir à traverser le volcan.

3.2 Les résultats de la simulation

Grâce au programme CORSIKA, nous avons pu simuler le développement de 5000 gerbes atmosphériques pour différentes particules incidentes et différentes énergies. Lors de ces simulations, les observations du flux de muons atmosphériques ont été effectuées à la verticale (angle zénithal nul) et à une altitude de 900 m.

3.2.1 Muons atmosphériques engendrés par les protons

Comme le montre les figures 3.1, 3.2, 3.3 et 3.4 représentant le nombre de muons engendrés en fonction de l'impulsion de ceux-ci divisée par l'énergie des protons initiant la gerbe, plus l'énergie des protons incidents est élevée et plus il y a de muons engendrés.

Néanmoins ce sont principalement des muons de basse énergie qui sont créés. En effet, on remarque que l'impulsion moyenne des muons est de 5 GeV/c pour des protons incidents de 100 GeV et de 15 GeV/c pour des protons incidents de 10 TeV.

De plus on remarque qu'il y a un facteur 2 entre l'impulsion du muon la plus élevée et l'énergie des protons, ceci quelle que soit l'énergie des protons incidents. Autrement dit les muons prennent au plus 50% de l'énergie du proton initiant la gerbe.

Par conséquent, pour qu'il y ait création de muons ayant une énergie de 1 TeV, il faut que l'énergie des protons du rayonnement cosmique soit d'au moins 2 TeV. Le flux de protons ayant une énergie supérieure à 2 TeV du rayonnement cosmique primaire reste suffisant pour faire des mesure dans le cadre du projet TOMUVOL, puisqu'il est de l'ordre de 5000 protons par km^2 et par seconde.

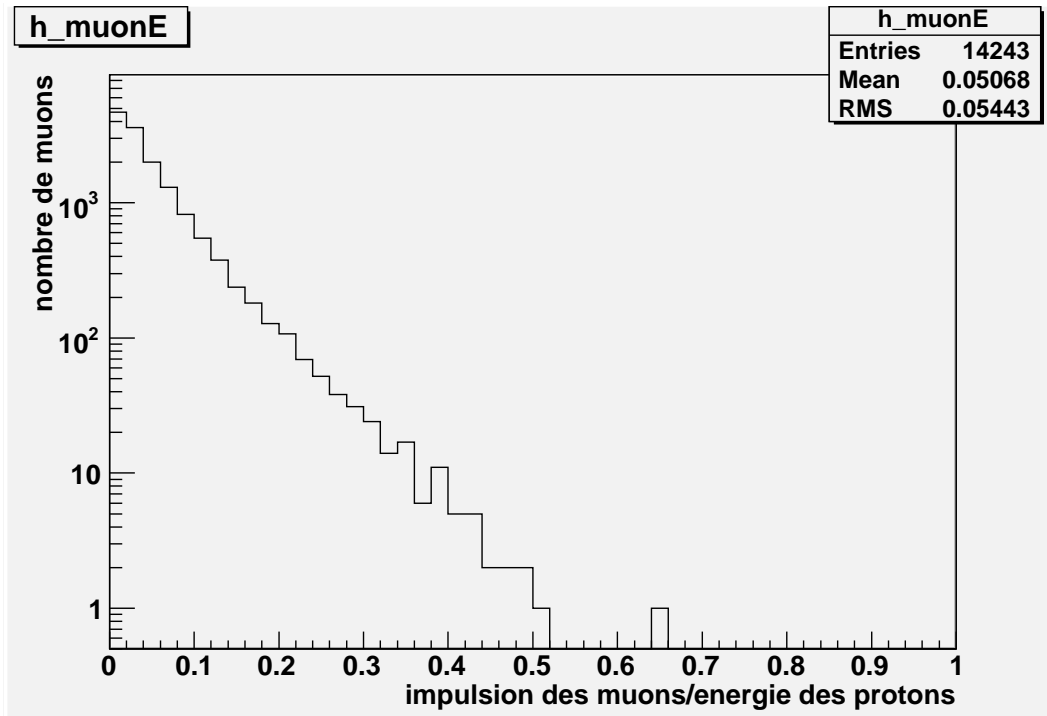


FIGURE 3.1: Muons engendrés au cours de 5000 gerbes créées par des protons de 100 GeV.

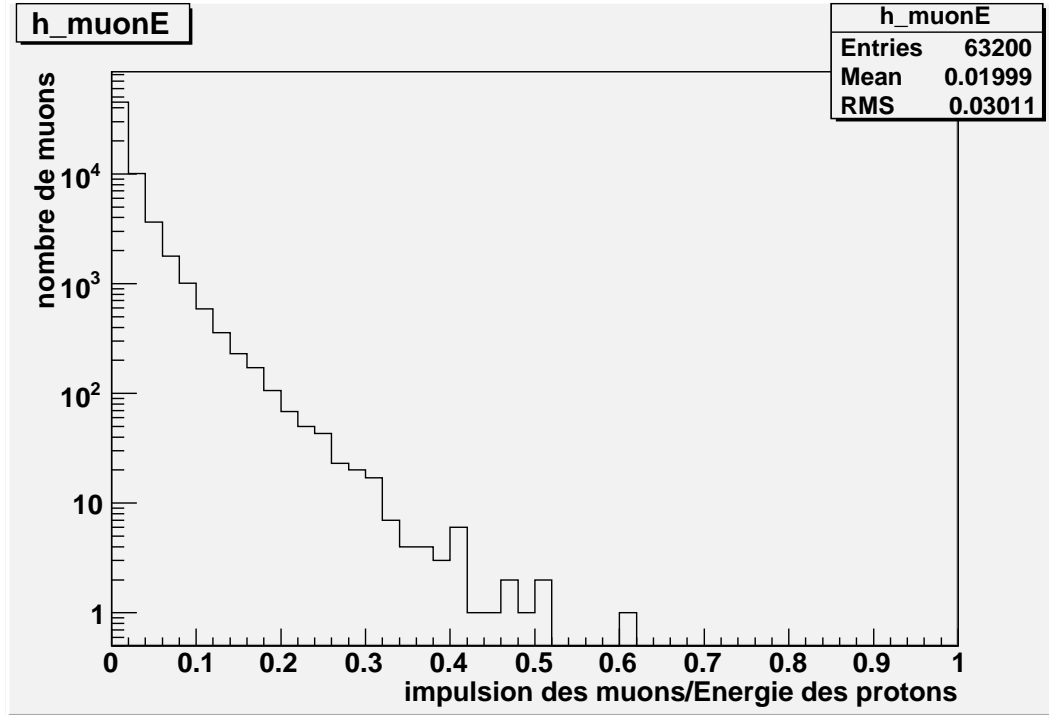


FIGURE 3.2: Muons engendrés au cours de 5000 gerbes créées par des protons de 500 GeV.

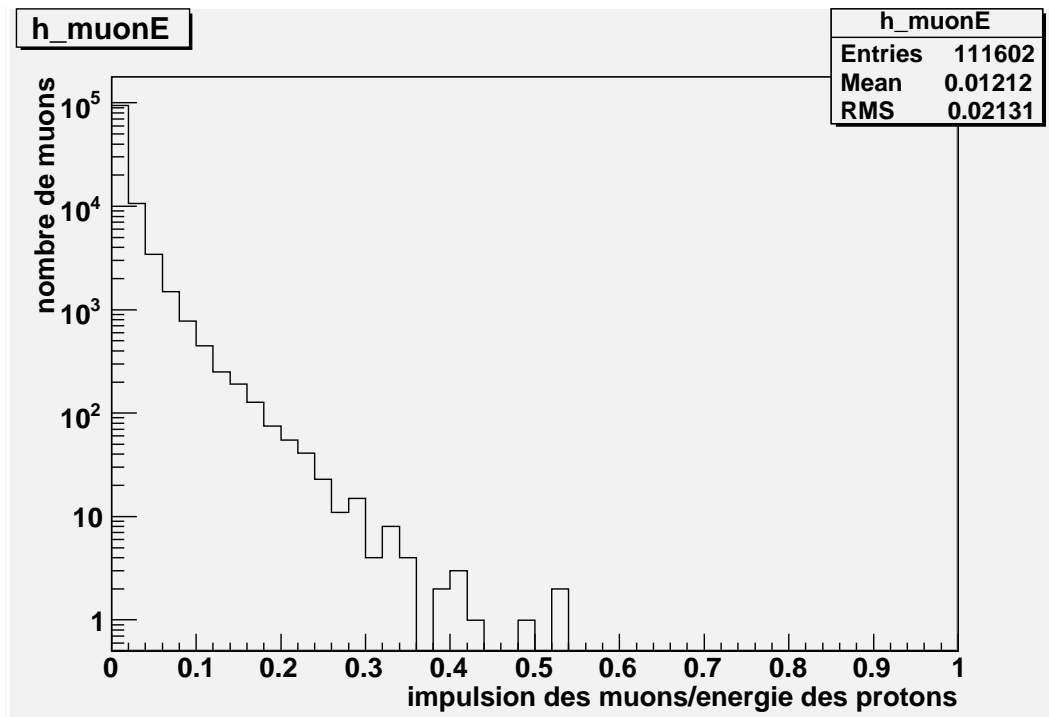


FIGURE 3.3: Muons engendrés au cours de 5000 gerbes créées par des protons de 1 TeV.

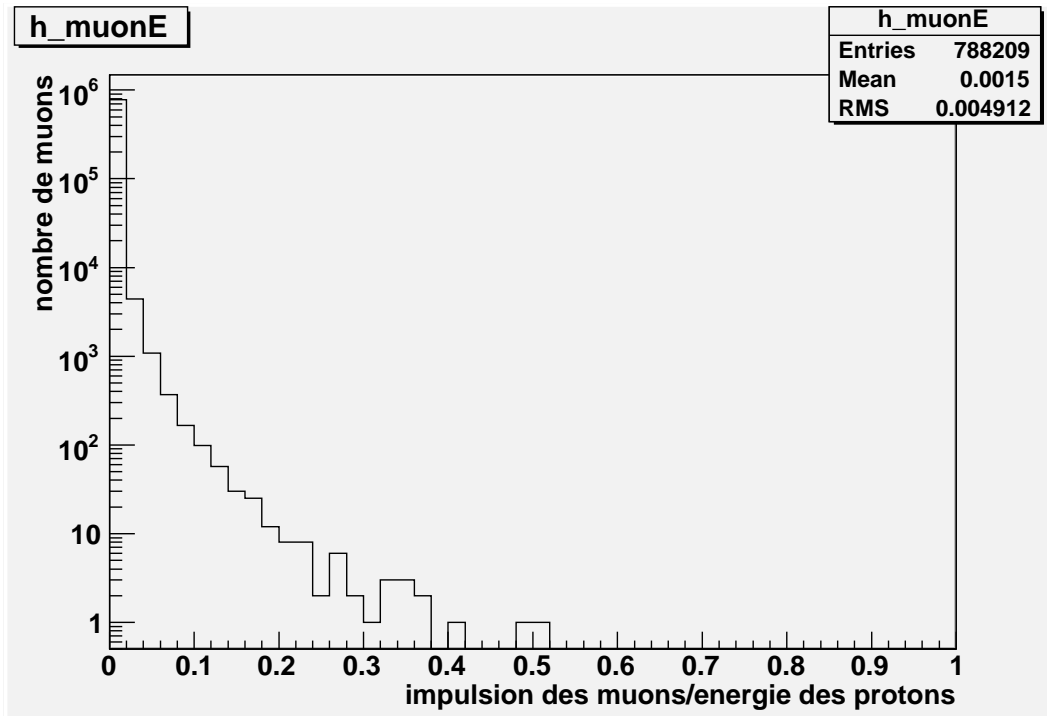


FIGURE 3.4: Muons engendrés au cours de 5000 gerbes créées par des protons de 10 TeV.

3.2.2 Muons atmosphériques engendrés par les noyaux d'hélium

De même que pour les protons, il faut que l'énergie des noyaux d'hélium du rayonnement cosmique primaire soit d'au moins 10 TeV pour qu'il y ait création de muons de plus de 1 TeV, comme le montre les figures 3.5, 3.6, 3.7 et 3.8 représentant le nombre de muons engendrés en fonction de l'impulsion de ceux-ci divisée par l'énergie des noyaux d'hélium du rayonnement cosmique.

De plus, quand l'énergie des noyaux d'hélium augmente c'est aussi au profit de la création de muons de basse énergie. En effet pour une énergie de 100 GeV des noyaux d'hélium l'impulsion moyenne des muons est de 2,5 GeV/c et elle est de 14 GeV/c pour une énergie de 10 TeV des noyaux d'hélium.

Il y a un facteur 5 entre l'impulsion des muons et l'énergie des noyaux d'hélium. Autrement dit les muons créés prennent au plus 20% de l'énergie du noyau d'hélium initiant la gerbe, alors que les simulations précédentes montrent que les muons engendrés par des protons prennent au plus 50% de l'énergie des protons. Cette différence s'explique par le fait que l'énergie du noyau d'hélium est répartie entre les deux neutrons et les deux protons le composant.

Hors les neutrons ne créent pas de muons lorsqu'ils rentrent en collision avec les molécules d'air de l'atmosphère. Par conséquent, lors des simulations des gerbes générées par des noyaux d'hélium, seuls les protons interviennent dans la création des muons, ces derniers sont donc engendrés par des protons qui ont une énergie inférieure à celle du noyau d'hélium.

Ces résultats montrent ainsi qu'un proton du noyau d'hélium prend au plus 40% de l'énergie de celui-ci.

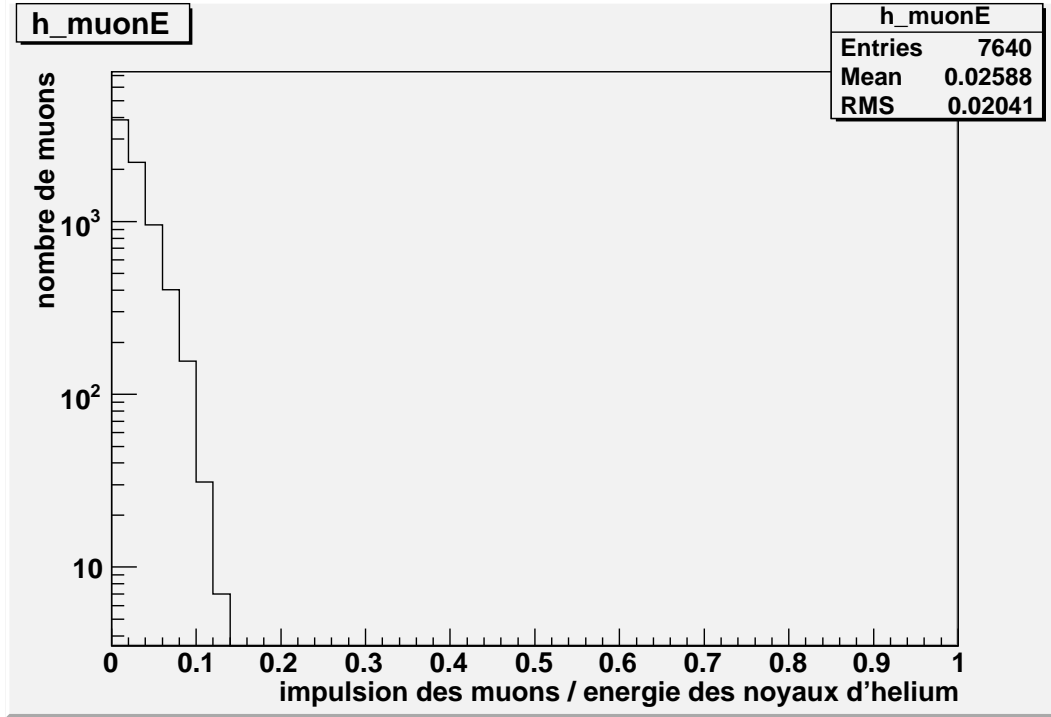


FIGURE 3.5: Muons engendrés au cours de 5000 gerbes créées par des noyaux d'hélium de 100 GeV.

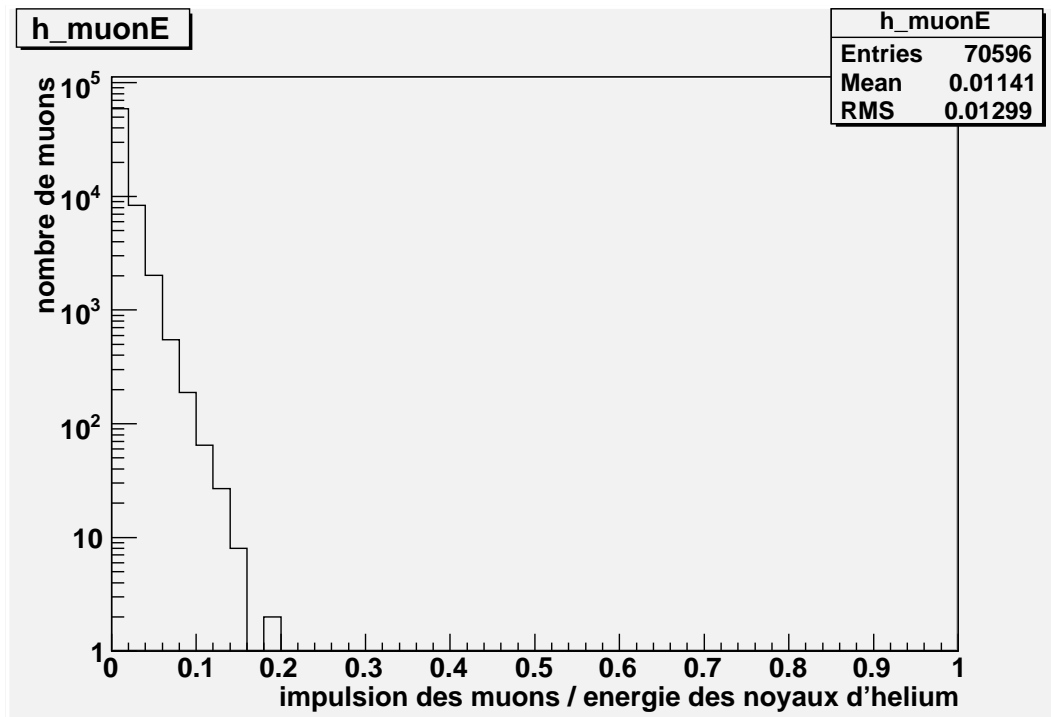


FIGURE 3.6: Muons engendrés au cours de 5000 gerbes créées par des noyaux d'hélium de 500 GeV.

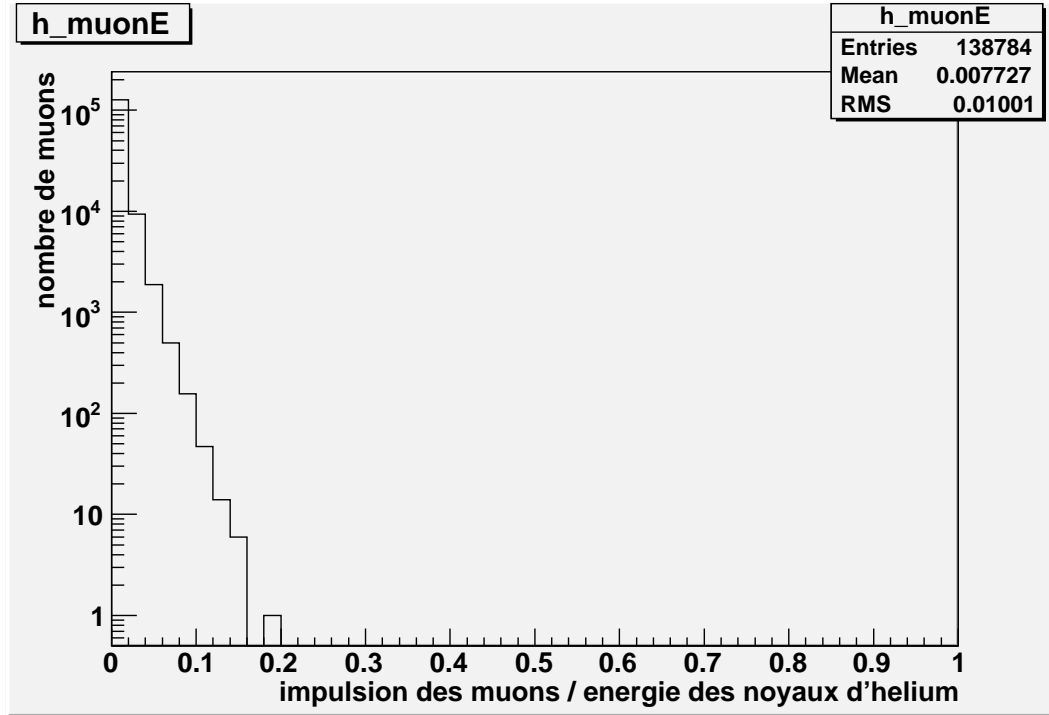


FIGURE 3.7: Muons engendrés au cours de 5000 gerbes créées par des noyaux d'hélium de 1 TeV.

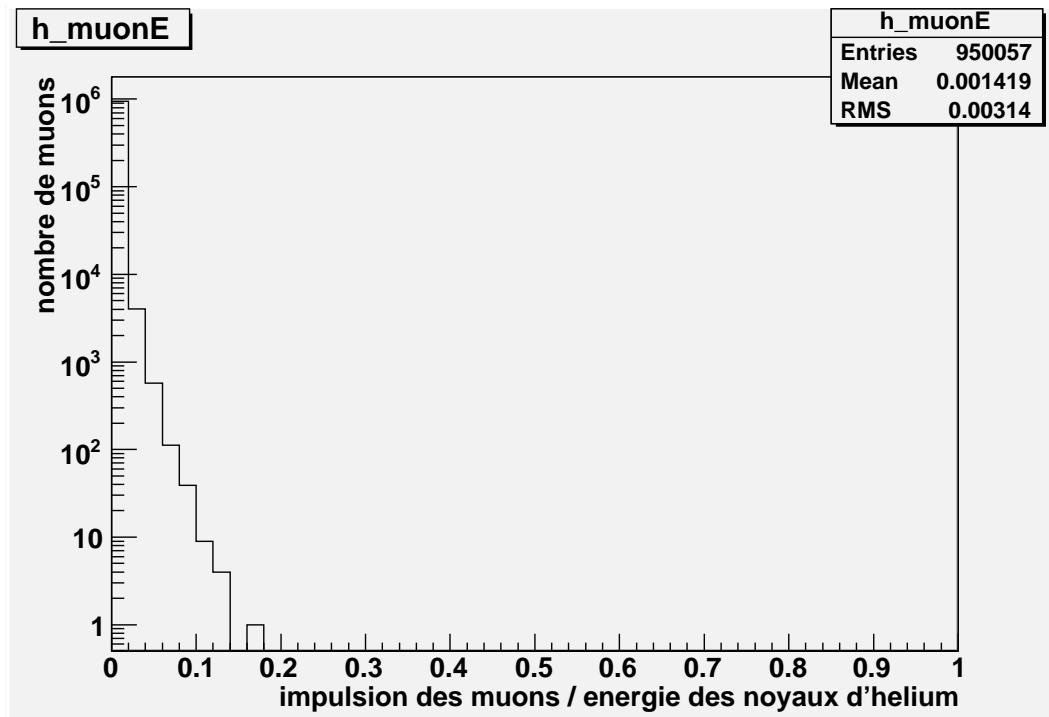


FIGURE 3.8: Muons engendrés au cours de 5000 gerbes créées par des noyaux d'hélium de 10 TeV.

3.2.3 Muons atmosphériques engendrés par les noyaux de fer

Comme le montre les figures 3.9, 3.10 et 3.11 représentant le nombre de muons engendrés en fonction de l'impulsion de ceux-ci divisée par l'énergie des noyaux de fer du rayonnement cosmique, le nombre de muons engendrés par les noyaux de fer est faible par rapport à ceux engendrés par les protons ou l'hélium. Comme au paragraphe précédent, l'explication vient du fait que l'énergie du noyaux de fer est répartie entre les trente neutrons et les vingt-six protons le composant. Les simulations montrent que les muons prennent au plus 1% de l'énergie du noyaux de fer initiant la gerbe, par conséquent, un proton du noyaux de fer prend au plus 2% de l'énergie du noyaux de fer.

En considérant qu'il faille des protons d'au moins 2 TeV pour engendrer des muons ayant suffisamment d'énergie pour traverser le Puy-de-Dôme, il faut que les noyaux de fer aient une énergie d'au moins 100 TeV. Hors le flux de noyaux de fer de 100 TeV est de l'ordre d'une particule par m^2 et par an. Par conséquent leur contribution pour créer des muons atmosphériques susceptibles d'être intéressants pour le projet TOMUVOL est négligeable.

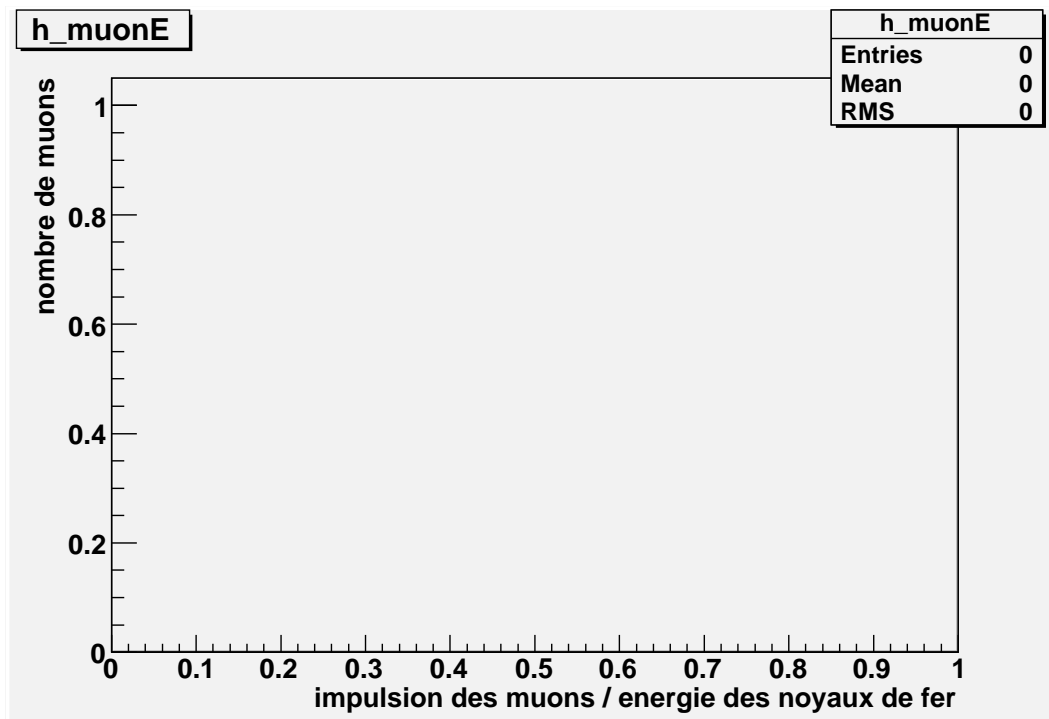


FIGURE 3.9: Muons engendrés au cours de 5000 gerbes créées par des noyaux de fer de 100 GeV.

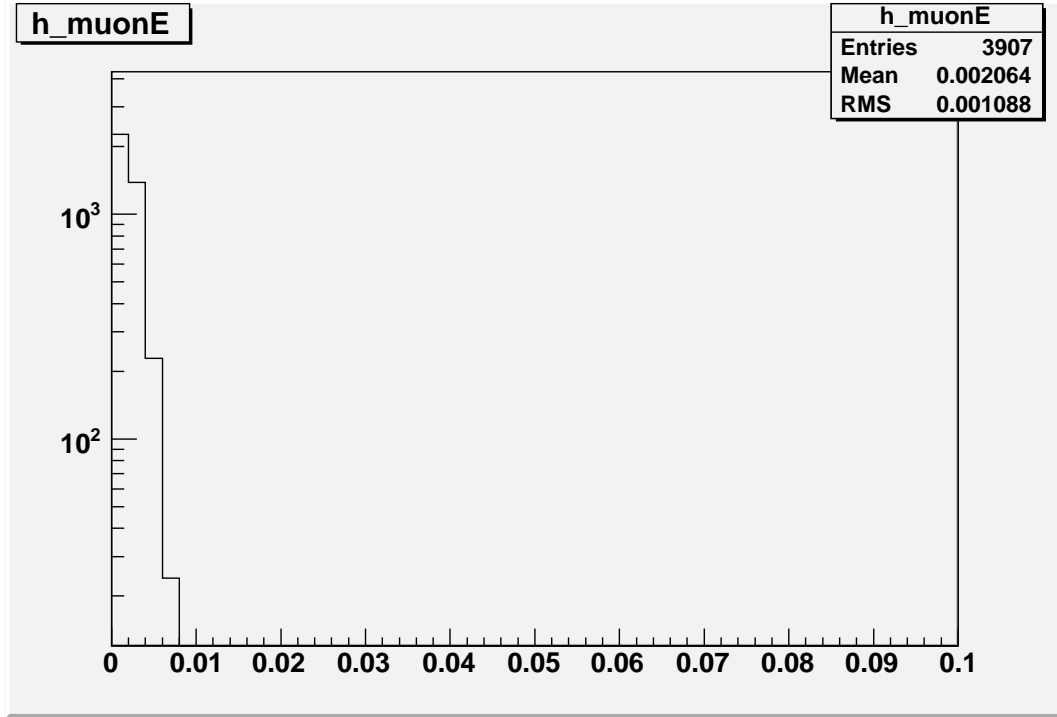


FIGURE 3.10: Muons engendrés au cours de 5000 gerbes créées par des noyaux de fer de 500 GeV.

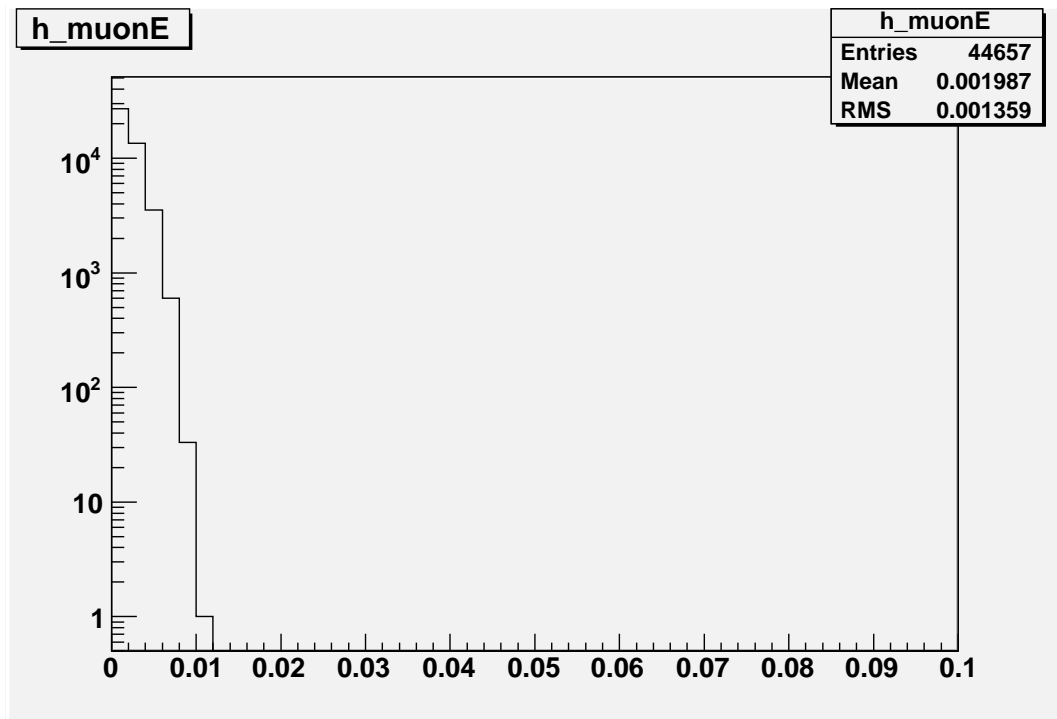


FIGURE 3.11: Muons engendrés au cours de 5000 gerbes créées par des noyaux de fer de 1 TeV.

Conclusion

Pour conclure cette étude des muons atmosphériques, il serait intéressant de continuer les simulations avec CORSIKA avec des énergies pour les protons et l'hélium de l'ordre du PeV et avec différents angles zénithaux et différentes altitudes.

Ce deuxième stage Janus m'a permis de continuer à découvrir le milieu de la recherche ainsi que d'apprendre beaucoup de choses autour des rayons cosmiques, puis de réutiliser le logiciel d'analyse ROOT et de m'initier au programme simulations CORSIKA.

Bibliographie

- [1] Ichimura et al. *Observation of heavy cosmic-ray primaries over the wide energy range from 100GeV/particle to TeV/particule : Is the celebrated "knee" actually so prominent?*. Physical Review D, volume 48, number 5 (1993)
- [2] Bellotti et al. *Balloon measurements of cosmic ray muon spectra in the atmosphere along with those of primary protons and helium nuclei over midlatitude*. Physical Review D, volume 60, (2002)
- [3] Boezio et al. *The cosmic-ray proton and helium spectra measured with CAPRICE98 balloon experiment*. Astroparticle Physics 19 (2003) 583-604
- [4] Haino et al. *Measurement of primary and atmospheric cosmic-ray spectra with the BESS-TeV spectrometer*. Physics Letters B 594 (2004) 35-46
- [5] Sanuki et al. *Precise measurement of cosmic-ray proton and helium spectra with the BESS spectrometer*. The Astrophysical Journal, 545 : 1135-1142 (2000)
- [6] Shikaze et al. *Measurement of 0.2-20 GeV/n cosmic-ray proton and helium spectra from 1997 through 2002 with BESS spectrometer*. Astroparticle Physics 28 (2007) 154-167
- [7] Alcaraz et al. *Cosmic protons*. Physics Letters B 490 (2000) 27-35
- [8] Menn et al. *The absolute flux of protons and helium at the top of the atmosphere using IMAX*. The Astrophysical Journal, 533 : 281-297 (2000)
- [9] Bertaina et al. *The cosmic ray primary spectrum in the transition region between direct and indirect measurements*. The Physical Society of Japan (2009)