

LES MUONS, LA CAVE ET LE TUFFEAU



Lise GERMON

Alice HUGUET

Elise BONIN

TS - 724

2014-2016

Sommaire

Introduction -----	3
Résumé de notre projet -----	3
Remerciements -----	4
<u>I-Comment détecter les muons ?</u> -----	5
1) Comment se forment-ils ? -----	5
2) Comment sont-ils détectés ? -----	6
3) De quels paramètres dépend le nombre de muons détectés ?-7	
<u>II- Mesures de l'absorption des muons par la roche</u> -----	8
1) L'épaisseur de roche traversée fait-elle varier le nombre de muons détectés ? -----	8
2) Peut-on mesurer l'épaisseur d'une roche grâce à l'absorption des muons ? -----	9
a-Construction d'une courbe d'étalonnage -----	10
b-Perte du caractère relativiste du muon -----	11
c-Construction d'un modèle mathématique simplifié-----	14
Conclusion -----	19
Bibliographie -----	20
Annexes -----	21

Introduction

Après avoir constaté plusieurs éboulements de caves dans notre région, nous nous sommes demandés si l'épaisseur du plafond des caves était connue. Cette information nous permettrait de connaître la fragilité des roches afin de prévenir les risques d'éboulements. Nous nous sommes alors renseignées sur des moyens permettant de déterminer l'épaisseur d'un plafond rocheux.

De plus, nous avons appris que le lycée allait recevoir un détecteur de muons (cosmodétecteur). Les muons sont des particules qui proviennent du ciel et qui ont la capacité de traverser la matière assez facilement. Ils sont déjà utilisés en géologie pour étudier le relief de volcans (tomographie).

Nous nous sommes alors demandées s'il était possible de mesurer l'épaisseur d'une roche grâce à la détection des muons.

Afin de répondre à cette problématique, nous allons tout d'abord nous intéresser aux muons et à leur détection, puis nous allons étudier leur absorption par la roche et essayer de trouver une façon de mesurer l'épaisseur de plafonds rocheux.

Vous pouvez également visiter <http://www.vaucanson.org/php5/Accueil/index.php/muons-et-profondeur-d-une-cave> de notre projet : pour plus d'informations.

Résumé de notre projet

*Le but de notre projet était d'utiliser les muons pour déterminer l'épaisseur d'un plafond rocheux composé de tuffeau. Nous avons donc réalisé des expériences pendant lesquelles nous avons mesuré le nombre de muons à l'extérieur et à l'intérieur de la cave grâce au cosmodétecteur afin d'obtenir le pourcentage d'absorption. Nous voulions trouver le lien entre ce pourcentage et l'épaisseur de roche traversée. Après divers calculs (basés sur nos mesures d'étalonnage), nous sommes arrivées à une équation :
$$\text{Epaisseur} = 10^{\frac{\%abs - 22,4}{21,8}}$$*

Après avoir testé cette équation sur des situations réelles, nous nous sommes rendues compte qu'elle ne fonctionnait pas et nous donnait des résultats aberrants. A l'aide de scientifiques, nous avons essayé de nouveau de trouver une réelle corrélation en partant d'un modèle mathématique théorique. Or, une fois de plus, la théorie ne correspondait pas à la réalité notamment à cause du fait que les muons arrivant au sol n'ont pas tous la même énergie ni la même trajectoire et ne vont donc pas se comporter de la même façon.

Pour conclure, nous n'avons pas réussi à trouver une façon de déterminer l'épaisseur d'une cave à partir du pourcentage de muons absorbé.

Remerciements

Pour ce projet, nous avons bénéficié de l'aide de nombreuses personnes. Tout d'abord nous tenons à remercier M. Étienne DUBRAY, un tailleur de pierre qui avait accepté de nous aider et surtout M. André ZULIANI qui nous a aimablement accueillis un samedi matin pour faire nos mesures d'étalonnage dans son atelier.

Nous remercions aussi les propriétaires des différentes caves dans lesquelles nous avons été faire nos mesures : celles situées à Perrière de Grandmont et M. et Mme LEDRU. Nous avons également apprécié l'aide de M. WANGER professeur de physique au lycée René Dayve, au pied du Mont Blanc, qui nous a fourni des mesures pour notre expérience concernant l'altitude.

Nous remercions aussi les différents préparateurs de physique du lycée qui ont pu nous aider pour ce TPE, ainsi que l'organisme Science à l'École dont l'aide nous a été précieuse.

De plus nous sommes reconnaissantes envers notre professeur de SVT, Mme LETISSIER pour nous avoir encadré pendant les heures de cours mais aussi particulièrement M. THIBAUT, notre professeur de physique qui nous a accompagné tout au long de ce projet.

Enfin, nous remercions les chercheurs et scientifiques qui nous ont apporté leur aide et sans qui nous aurions manqué de connaissances théoriques, notamment M. Nicolas ARNAUD, chercheur au laboratoire de l'accélérateur linéaire, M. José BUSTO, entre autres chercheur au Centre de Physique des Particules de Marseille (CPPM), M. Karim NOUI, maître de conférences sur les constituants élémentaires à l'université François Rabelais de Tours, et surtout M. Loic Villain, maître de conférences en physique à la faculté de médecine de Tours.

I-Comment détecter les muons ?

1) Comment se forment-ils ?

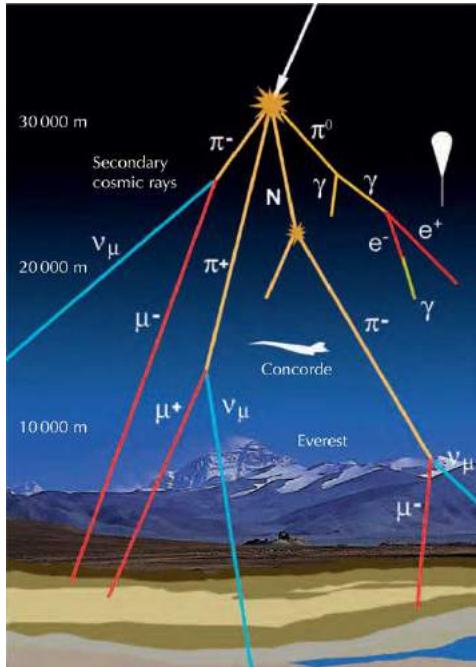


Figure 1 : Schéma de la gerbe de particules du rayon cosmique secondaire

Le rayonnement cosmique primaire, provenant notamment du soleil mais aussi de la galaxie entière, est un flux de noyaux atomiques et d'autres particules. Ce rayonnement entre en collision avec l'atmosphère de la Terre, et les protons qui le constituent interagissent alors avec les noyaux de l'atmosphère et forment une gerbe de particules (*fig.1*).

Les muons sont issus de la désintégration des pions chargés.

Ils se désintègrent à leur tour, à la fin de leur vie qui dure environ $2,2\mu\text{s}$ au repos, selon l'équation :

$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$ c'est-à-dire que le muon se « transforme » en un électron et deux neutrinos.

On considère le muon comme une particule élémentaire : ce sont les composants fondamentaux de l'Univers. Ce sont les plus petites particules non sécables connues aujourd'hui. Elles sont répertoriées dans le modèle standard (voir fig. en annexe)

Le muon est en quelque sorte une copie conforme de l'électron mis à part le fait qu'il soit plus lourd (masse 207 fois plus grande) et donc assez instable, ce qui explique le fait qu'il ne compose pas la matière ordinaire.

En effet, on le retrouve seulement dans les rayons cosmiques, ou les accélérateurs de particules.

2) Comment sont-ils détectés ?

Le muon se forme dans les hautes couches de l'atmosphère à une altitude d'environ 10000 à 20000m. Son temps de vie théorique dans son référentiel propre est de $\tau_0 = 2,197 \mu s$.

Il a également, dans ces conditions, une vitesse très proche de celle de la lumière : environ $0,9997c$, soit $2,9979 \cdot 10^8 m \cdot s^{-1}$. Statistiquement, ces données devraient lui permettre de parcourir seulement une distance d_0 proche de 660m au cours de sa vie :

$$d_0 = 0,9997c \times \tau_0 = 0,9997 \times 2,9979 \cdot 10^8 \times 2,197 \cdot 10^{-6} \approx 660m$$

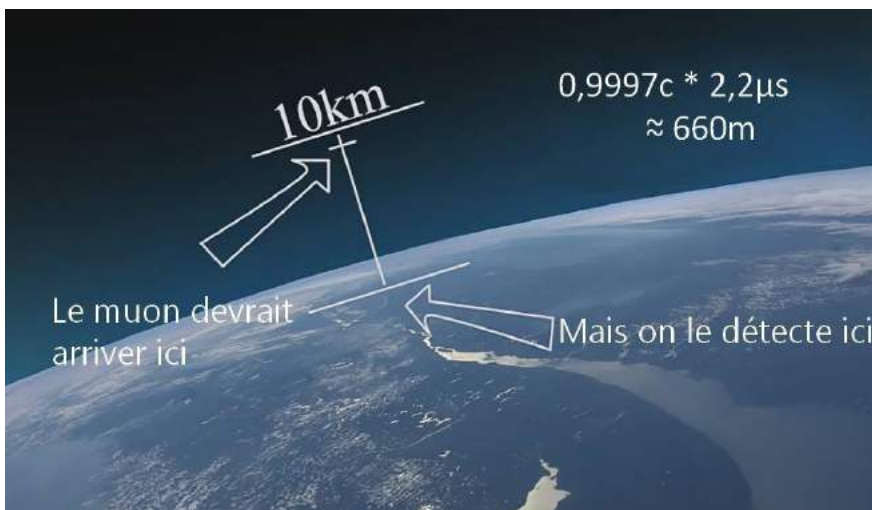


Figure 3 : Schéma de l'arrivée théorique et réelle du muon

Or, on parvient à le détecter à la surface de la Terre, plus de 9km plus bas. (fig 3)

Cette nette différence entre la distance théorique et la distance réelle s'explique grâce à la relativité restreinte et la théorie de dilatation du temps. Le muon se déplaçant à une vitesse très proche de celle de la lumière, son temps de vie va être plus long dans le référentiel terrestre.

Le facteur de dilatation du temps γ se calcule en fonction de la formule suivante, que l'on applique aux muons :

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{(2,9970 \cdot 10^8)^2}{(2,9979 \cdot 10^8)^2}}} \approx 40,814$$

Cet indice nous permet de calculer le temps de vie apparent τ_1 du muon :

$$\tau_1 = \tau_0 \times \gamma = 2,197 \cdot 10^{-6} \times 40,814 \simeq 8,967 \cdot 10^{-5} s$$

Et on en déduit la distance d_1 que le muon a en fait le temps de parcourir :

$$d_1 = \tau_1 \times 0,9997 c = 8,967 \cdot 10^{-5} * 2,9970 \cdot 10^8 \simeq 2,687 \cdot 10^4 m = 26,87 km$$

Grâce à sa très grande vitesse, le muon peut donc parcourir près de 27km dans le vide ; on comprend alors qu'une grande proportion des muons créés en altitude atteignent la surface de la Terre.

Notre lycée a obtenu grâce au programme Sciences à l'École une machine appelée cosmodétecteur, qui permet de détecter les muons. Cette machine comporte trois parties principales : le scintillateur, le photomultiplicateur et la partie électronique, reliée à l'ordinateur via un logiciel. Le fonctionnement est détaillé en annexe.

Grâce à la machine, on obtient un comptage des muons sur l'ordinateur, via un logiciel.

3) De quels paramètres dépend le nombre de muons détectés ?

Notons que le flux de muons arrivant à la surface de la Terre est décrit par un phénomène statistique. De fait, chacune des données exploitées au cours de ce projet sont des moyennes de nombreuses mesures consécutives, afin de limiter les imprécisions dues aux écarts entre la théorie et la réalité.

Le nombre de muons détectés peut varier en fonction de différents paramètres (au niveau du cosmodétecteur, et au niveau environnemental) que nous allons devoir prendre en compte pour interpréter nos mesures.

Nous avons donc réalisé plusieurs expériences qui nous ont permis de tester ces paramètres un par un : l'intervalle de comptage utilisé, l'orientation des raquettes du cosmodétecteur, l'heure de la journée (rayonnement solaire), la météo, et l'altitude. Le détail de ces expériences se trouve en annexe.

Nous avons conclu de ces expériences que les mesures pour un même lieu devront être réalisées le même jour afin de faire varier le moins de paramètres possible.

II- Mesures de l'absorption des muons par la roche

1) L'épaisseur de roche traversée fait-elle varier le nombre de muons détectés ?

Avant de chercher une quelconque corrélation entre l'épaisseur de roche et le pourcentage d'absorption des muons, il nous était essentiel de vérifier que cette absorption avait bien lieu.

Lors d'une expérience dans une cave à Benais, nous avons observé que la traversée d'une épaisseur de roche calcaire (le plafond de la cave) entraîne une diminution du nombre de muons détectés (226 ± 12 au dessus de la cave contre 47 ± 7 à l'intérieur de la cave).



Figure 12 : Photographie du cosmodétecteur dans les caves de Benais



Figure 13 : Photographie du cosmodétecteur à Benais

Cela a été déterminant pour notre TPE, car grâce à ce constat, nous avons pu chercher à établir une corrélation entre ces deux paramètres.

L'épaisseur de roche traversée influe-t-elle sur le nombre de muons détectés ?

- **Expérience 7**

Hypothèse : Nous pensons que l'augmentation de l'épaisseur de la roche traversée fait diminuer le nombre de muons détectés.

Protocole : Nous sommes allées chez Monsieur André Zuliani, tailleur de pierre à Ingrandes de Touraine (37), afin de mesurer le nombre de muons détectés en dessous de blocs de pierre de différentes épaisseurs afin d'obtenir des mesures étalons.

Nous avons donc réalisé plusieurs mesures, sous des blocs de tuffeau de différentes épaisseurs et une dernière mesure sans roche au dessus. Nos mesures ont été faites avec un comptage toutes les minutes pendant 10 minutes.



Figure 14 : Photographie du cosmodétecteur lors des mesures d'étalonnage

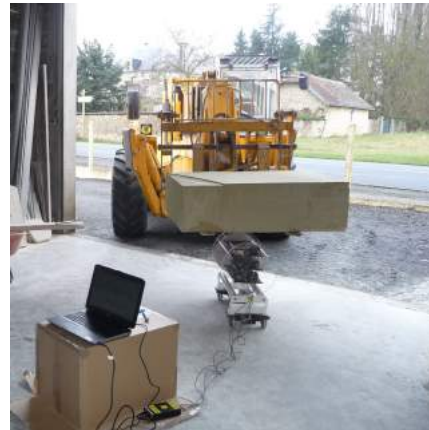


Figure 15 : Photographie du cosmodétecteur lors des mesures d'étalonnage

Résultats : Nous avons ensuite utilisé ces mesures pour obtenir un graphique nous montrant le nombre de muons détectés en fonction de l'épaisseur de roche traversée.

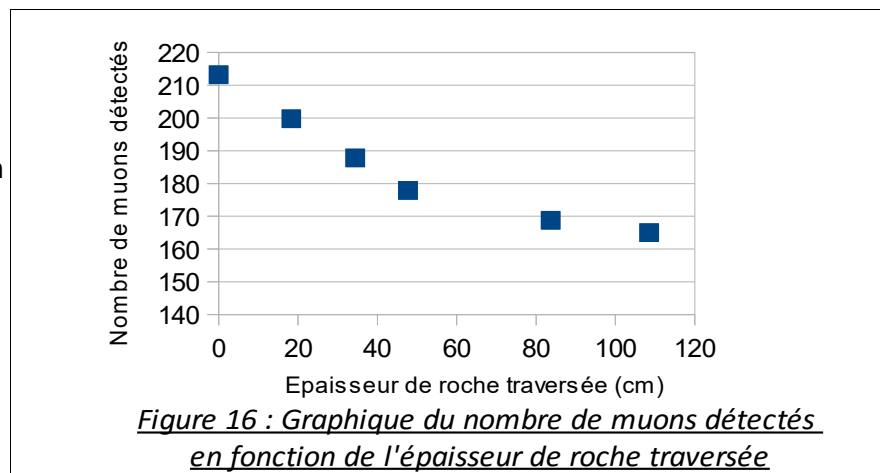


Figure 16 : Graphique du nombre de muons détectés en fonction de l'épaisseur de roche traversée

Observations/Interprétation : Nous observons que le nombre de muons détectés en dessous d'un bloc de tuffeau diminue quand l'épaisseur de celui-ci augmente. Notre hypothèse est donc validée.

2) Peut-on mesurer l'épaisseur d'une roche grâce à l'absorption des muons ?

La validation de notre hypothèse précédente nous a permis de nous poser la question cruciale pour notre TPE ; peut-on déterminer l'épaisseur d'une roche grâce à l'absorption des muons ?

a- Construction d'une courbe d'étalonnage

À partir des valeurs obtenues lors de l'expérience d'étalonnage, nous établissons le pourcentage d'absorption des muons grâce à la formule suivante :

$$\% \text{ d'absorption} = \frac{(v_{\text{muons sans roche}} - v_{\text{muons avec roche}})}{v_{\text{muons sans roche}}} \times 100$$

Grâce à nos mesures étalons, nous avons tracé le graphique du pourcentage d'absorption des muons en fonction de l'épaisseur de roche traversée, puis nous avons voulu modéliser une équation qui lui corresponde.

Mesures étalons

Pourcentage absorbé= f(épaisseur)

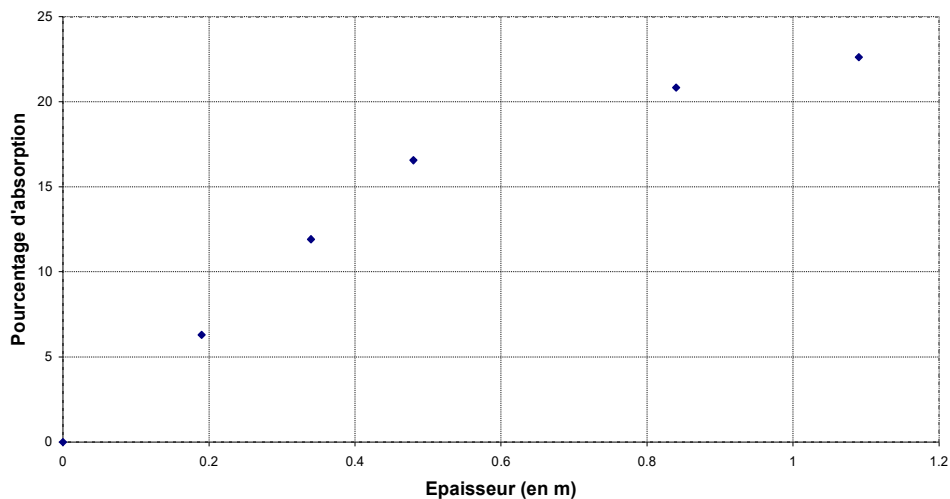


Figure 17 : Graphique du pourcentage d'absorption des muons en fonction de l'épaisseur de roche traversée

A l'aide de nos professeurs, nous avons pensé que l'allure de la courbe obtenue ressemblait à celle du logarithme décimal; ils nous ont donc conseillé de tracer le pourcentage d'absorption en fonction du logarithme de l'épaisseur. Avec la droite obtenue et son équation, nous sommes remontés à l'épaisseur en fonction du pourcentage d'absorption :

$$\boxed{Epaisseur = 10^{\frac{\%abs - 22,4}{21,8}}}$$

Cette équation nous donne des valeurs d'épaisseurs presque similaires à celles trouvées expérimentalement, mais nous notons toutefois quelques imprécisions.

Nous avons réfléchi aux facteurs pouvant expliquer ces faibles imprécisions.

D'abord, il est probable que les roches pour nos mesures d'étalonnage effectuées chez le tailleur de pierre n'aient pas été assez épaisses et donc pas forcément représentatives des épaisseurs de roches que l'on peut trouver dans la nature.

De plus, ces mesures étaient probablement réalisées sur des temps trop courts pour nous apporter des résultats assez précis. En effet, comme nos mesures sont basées sur des moyennes, il faut que ces dernières soient représentatives de la réalité. Il nous faut donc effectuer des mesures sur des temps plus longs.

Nous avons ensuite voulu appliquer cette relation aux mesures que nous avons faites lors de notre première expérience.

Rappel :

- Mesure dans la cave : 47 ± 7 muons par min
- Mesures en extérieur : 226 ± 12 muons par min

Soit un pourcentage d'absorption $\%abs = \frac{226-47}{226} \times 100 = 77,9\%$

Avec la relation établie : $e = 10^{\frac{77,9-22,4}{21,8}} = 350 \text{ m}$

Ce résultat est aberrant, et bien sûr faux ! L'équation ne fonctionne donc pas pour une épaisseur telle que celle des caves de Benais (probablement autour d'une dizaine de mètres).

b- Perte du caractère relativiste du muon

Face à ce problème, nous avons cherché un moyen d'expliquer pourquoi nous n'avions pas réussi à déterminer l'équation précise nous permettant de répondre à la problématique.

Hypothèse : Nous pensons qu'à partir d'une certaine épaisseur de roche traversée, les muons ne respectent plus l'équation trouvée précédemment.

Explications : Nous pouvons expliquer cela par le fait que le muon a perdu tellement d'énergie que son caractère relativiste ne peut plus être pris en compte, sa durée de vie dans le référentiel terrestre τ_0 tend alors vers sa durée de vie propre τ_1 de $2,2 \mu\text{s}$.

Or τ_1 est lié à τ_0 par γ , qui dépend lui-même de l'énergie E du muon.

Grâce au forum de Sciences à l'école, nous avons trouvé que la perte d'énergie E des muons dans un milieu en fonction de l'épaisseur traversée est donnée par la relation suivante :

$$\frac{dE}{dx} = -2\rho \text{ MeV.cm}^{-1} \quad \text{avec } \rho \text{ la masse volumique du matériau traversé en g.cm}^{-3}.$$

Ainsi le calcaire ayant une masse volumique moyenne de $2,5 \text{ g.cm}^{-3}$, la perte d'énergie est de $5,0 \text{ MeV/cm}$, soit $0,5 \text{ GeV/m}$.

L'énergie d'une particule relativiste est la somme de son énergie de masse et son énergie cinétique soit :

$$E = E_{\text{masse}} + Ec = mc^2 + (\gamma - 1)mc^2 = \gamma mc^2$$

Connaissant l'énergie moyenne d'un muon au sol, soit $E_0 = 4,3 \text{ GeV}$, on peut étudier l'évolution de cette énergie avec l'épaisseur de tuffeau traversée.

En considérant que l'énergie des muons décroît de $0,5 \text{ GeV/m}$ tant qu'il peut être considéré relativiste, il est aisé d'exprimer l'énergie du muon en fonction de l'épaisseur de tuffeau traversée : $E = E_0 - 0,5 \times x$

L'énergie du muon étant donnée par $E = \gamma mc^2$, nous pouvons en déduire le coefficient γ de dilatation du temps : $\gamma = \frac{E}{mc^2}$

La masse d'un muon est 207 fois plus grande que celle de l'électron, soit $m = 1,88 \cdot 10^{-28} \text{ kg}$.

L'énergie de masse du muon est donc $E_{\text{masse}} = mc^2 = 1,68 \cdot 10^{-11} \text{ J} = 0,105 \text{ GeV}$.

Il est donc possible de remonter à la durée de vie du muon dans le référentiel terrestre :

$$\tau = \gamma \tau_0 = \frac{E \times \tau_0}{m c^2}$$

Remarque : la durée de vie du muon dans le référentiel terrestre étant proportionnelle à son énergie, et son énergie variant linéairement avec l'épaisseur de roche traversée, la durée de vie du muon va donc décroître linéairement avec l'épaisseur de tuffeau traversée.

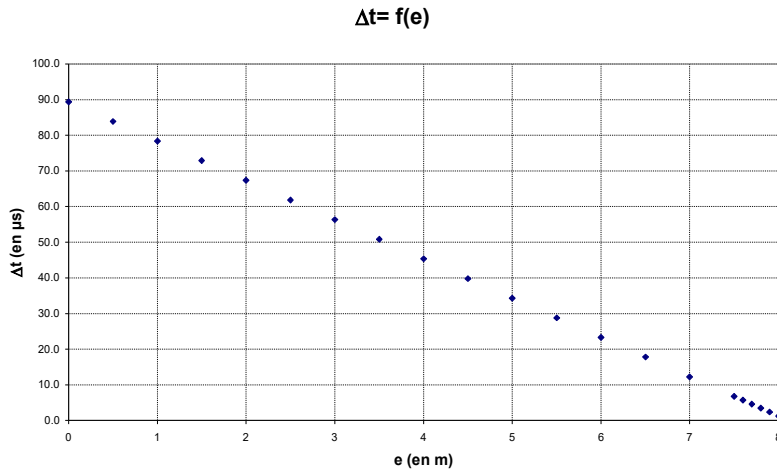


Figure 19 : Graphique de la durée de vie du muon en fonction de l'épaisseur de roche traversée

Observations/Interprétation

On constate donc qu'après 8 m de calcaire, les muons ne sont plus en moyenne relativistes. En effet, leur énergie serait inférieure à leur énergie de masse, ce qui n'est pas possible et on voit que le coefficient γ devient plus petit que 1, ou la durée de vie plus

petite que la durée de vie propre, ce qui est impossible.

Ainsi au-delà de 8 m de tuffeau, la plupart des muons ne sont plus relativistes car plus assez énergétique et donc leur durée de vie est réduite à leur durée de vie propre soit 2,2 μ s. Ceci peut donc expliquer que leur nombre va fortement diminuer par la suite. Notre hypothèse est donc validée.

Il nous faudra alors établir une équation différente de la première trouvée, celle ci ne pouvant probablement s'appliquer que sur les épaisseurs de moins de 8m.

Nous avons tout de même voulu vérifier que la relation établie plus haut fonctionnait réellement pour des épaisseurs de tuffeau inférieures à 8m. Nous sommes donc allées chez M et Mme LEDRU, qui possèdent une cave à Nouzilly. Cette cave était pratique puisque nous pouvions estimer sa hauteur depuis l'extérieur.



Figure 20 : vue transversale de la cave à Nouzilly

Nous pouvons remarquer ici que le plafond de cette cave se compose de deux parties : la roche calcaire et l'humus végétal (terre). Nous avons estimé l'épaisseur globale de ces deux couches à environ 1 m50.

Nous avons donc effectué une mesure à l'intérieur de la cave et une seconde à l'extérieur, pendant 20 minutes avec un comptage toutes les minutes.

Lieux de la mesure	Intérieur (dans la cave)	Extérieur (au-dessus de la cave)
Nombre de muons détectés (moyenne)	131,2 ± 12	206,6 ± 12

Ces résultats nous montrent bien une diminution du nombre de muons. Le pourcentage d'absorption est ici de $\frac{206,6-131,2}{206,6} \times 100 = 36,5\%$.

Or, si on exploite ce pourcentage à travers l'équation trouvée précédemment, dont voici un

rappel : $Epaisseur(en\ m) = 10^{\frac{\%abs - 22,4}{21,8}}$

Le résultat obtenu est de 4,43m. Il n'est pas cohérent avec l'épaisseur réelle de roche du plafond de la cave.

En réfléchissant aux raisons de cette incohérence, nous avons pensé au fait que le milieu n'était pas homogène (humus), mais au vu de sa masse volumique (nettement inférieure à celle de la roche), il n'a pas pu fausser nos mesures à ce point.

Nous devons donc admettre que notre équation n'est pas applicable en réalité, même sur une épaisseur relativement faible telle que celle de cette expérience.

Cependant, puisqu'elle vérifiait nos valeurs d'étalonnage, l'équation est tout de même valable pour des épaisseurs assez faibles, probablement jusqu'à environ 1m d'épaisseur.

c- Retour à la théorie : construction d'un modèle simplifié

Comme nous l'avons conclu dans nos précédentes expériences, suivre la diminution du nombre de muons avec la profondeur de roche n'est pas lié à une simple décroissance radioactive ou diminution énergétique, mais est également liée au caractère relativiste des muons qui évolue étant donné que leur énergie diminue. La relation que nous avons établi était alors trop simple, et il nous a fallu chercher autre chose. Nous avons alors pris contact avec plusieurs scientifiques, en espérant qu'ils puissent nous donner de nouvelles pistes.

À l'aide de Loïc Villain de l'UFR de Sciences et Technique de Tours, nous avons essayé

de construire un modèle simplifié de l'évolution du flux de muons au cours du temps et en fonction de la profondeur de roche traversée.

Premières hypothèses :

- On considère un faisceau monoénergétique de muons
- Tous sont supposés avoir la même vitesse v orthogonale au détecteur.

Ainsi le flux de particules est proportionnel à la densité de particules ρ (en muons/m³) et à leur vitesse v :

$$\Phi(x) = \rho(x) \times v(x)$$

Au sol, avant de pénétrer dans la roche, on a alors :

$$\Phi(0) = \rho(0) \times v(0)$$

- **On cherche d'abord à exprimer $\rho(x)$**

Le muon est une particule radioactive, c'est-à-dire qu'il se désintègre en suivant une loi de décroissance radioactive de la forme :

$N(t) = N_0 e^{-\frac{t}{\tau}}$, avec τ son temps caractéristique, temps propre ou encore constante de temps (c'est-à-dire le temps nécessaire pour que 63% des muons d'un échantillon se désintègre), et N le nombre de muons.

La densité de particules va subir la même loi de décroissance radioactive :

$$\rho(t) = \rho(0) e^{-\frac{t}{\tau}}$$

Mais le temps propre τ varie avec le temps ou la profondeur (ces deux derniers facteurs étant liés car le muon perd de l'énergie).

Ainsi on aura $\tau(t) = \gamma \tau_0$

ou $\tau(x) = \gamma(x) \tau_0$

Avec $\tau(x)$: temps caractéristique pour le référentiel terrestre

τ_0 : temps caractéristique du muon (dans son propre référentiel)

$\gamma(x)$: facteur de Lorentz (de dilatation du temps) qui varie avec la profondeur

On a alors, en rajoutant le fait que le temps t et la profondeur x sont liés :

$$\rho(x) = \rho(0) e^{-\frac{t(x)}{\gamma(x)\tau_0}}$$

On va donc chercher à exprimer γ , dont on sait qu'il dépend de l'énergie du muon.

On suppose que l'énergie des muons décroît linéairement avec la distance parcourue, comme M. Nicolas ARNAUD nous l'avait indiqué. Pour rappel :

$$\frac{dE}{dx} = -2 \times \rho \text{ MeV.cm}^{-2}$$

avec $\frac{dE}{dx}$: perte d'énergie par unité de longueur, en MeV.cm^{-2}

ρ : masse volumique de la roche en g.cm^{-3}

Si on considère que le tuffeau a une masse volumique ρ de $2,5\text{g.cm}^{-3}$, il vient

$$\frac{dE}{dx} = -5,0 \text{ MeV.cm}^{-1}$$

$$\frac{dE}{dx} = -500 \text{ MeV.m}^{-1}$$

$$\frac{dE}{dx} = -0,5 \text{ GeV.m}^{-1}$$

Ainsi $E(x) = E(0) - 0,5x$,

et comme $E = \gamma mc^2$, on a $\gamma = \frac{E}{mc^2}$ (avec E en Joules),

On a $\gamma(x)mc^2 = \gamma(0)mc^2 - 0,5x$

$$\text{D'où } \gamma(x) = \gamma(0) - \frac{0,5}{mc^2}x$$

$$\gamma(x) = \gamma(0) - \alpha x$$

$$\text{Avec } \alpha = \frac{0,5 \times 10^9 \times 1,6 \times 10^{-19}}{9,1 \times 10^{-31} \times 207 \times (2,9979 \times 10^8)^2} \simeq 4,7$$

On recherche alors $\gamma(0)$. Sachant que l'énergie moyenne des muons au sol est de $4,0\text{GeV}$, on a :

$$\gamma(0) = \frac{E(0)}{mc^2} = \frac{4,0 \times 10^9 \times 1,6 \times 10^{-19}}{9,1 \times 10^{-31} \times 207 \times (2,9979 \times 10^8)^2}$$

$$\gamma(0) = 37,8 \simeq 38$$

On peut donc écrire

$$\frac{\Phi(x)}{\Phi(0)} = \frac{\rho(x) v(x)}{\rho(0) v(0)}$$

$$= \frac{\rho(0) e^{-\frac{t(x)}{y(x) \tau_0}}}{\rho(0)} \times \frac{v(x)}{v(0)} = e^{-\frac{t(x)}{y(x) \tau_0}} \times \frac{v(x)}{v(0)}$$

Or on ne connaît pas $v(x)$. On peut par contre écrire :

$$y(x) = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$$1 - \frac{v^2}{c^2} = \frac{1}{y^2} \Leftrightarrow \frac{v^2}{c^2} = 1 - \frac{1}{y^2} \Leftrightarrow \frac{v^2}{c^2} = \frac{y^2 - 1}{y^2} \Leftrightarrow v^2 = c^2 \left(\frac{y^2 - 1}{y^2} \right)$$

D'où $v(x) = \frac{c \times \sqrt{y^2 - 1}}{y}$ et $v(0) = \frac{c \sqrt{y_0^2 - 1}}{y_0}$

Soit $\frac{\Phi(x)}{\Phi(0)} = e^{-\frac{t(x)}{y(x) \tau_0}} \times \frac{y_0}{y(x)} \times \frac{\sqrt{y(x)^2 - 1}}{\sqrt{y_0^2 - 1}}$

Avec $y(x) = y_0 - \alpha x$.

La difficulté est donc de relier t et x .

Or $v(x) = \frac{dx}{dt} = \frac{c \times \sqrt{y(x)^2 - 1}}{y(x)}$ (par définition)

où dx est une petite variation de la profondeur pendant le temps dt , autrement dit $dx = x(t+dt) - x(t)$

On a donc :

$$\frac{x(t+dt) - x(t)}{dt} = \frac{c \times \sqrt{y(x(t))^2 - 1}}{y(x(t))} \Leftrightarrow x(t+dt) = \frac{c \times \sqrt{y(x(t))^2 - 1}}{y(x(t))} \times dt + x(t)$$

Ainsi, connaissant les conditions initiales $x(t=0) = 0$ et $y(0)$, on va pouvoir pas à pas, en prenant un pas suffisamment petit, remonter à la position et résoudre l'équation, $y(x) = y_0 - \alpha x(t)$, à l'aide d'un tableur.

$$x(t+dt) = \frac{c \times \sqrt{[y_0 - 4,7x(t)]^2 - 1}}{y_0 - 4,7x(t)} \times dt + x(t)$$

On a donc résolu numériquement cette équation différentielle, et remonté au pourcentage d'absorption en fonction de la profondeur, tel que $\% \text{ abs} = 1 - \frac{\Phi(x)}{\Phi(0)}$.

t		$\gamma(x)$	$\frac{\Phi(x)}{\Phi(0)}$	% d'absorption
0	x_0	γ_0		
dt	x_1	$\gamma_0 - 4,7 x_1$		
$2dt$	x_2	$\gamma_0 - 4,7 x_2$		
$3dt$				

Ainsi, nous avons commencé par utiliser cette résolution numérique avec $\gamma = 37,8$, ce qui correspond à un muon d'une énergie de 4,0GeV.

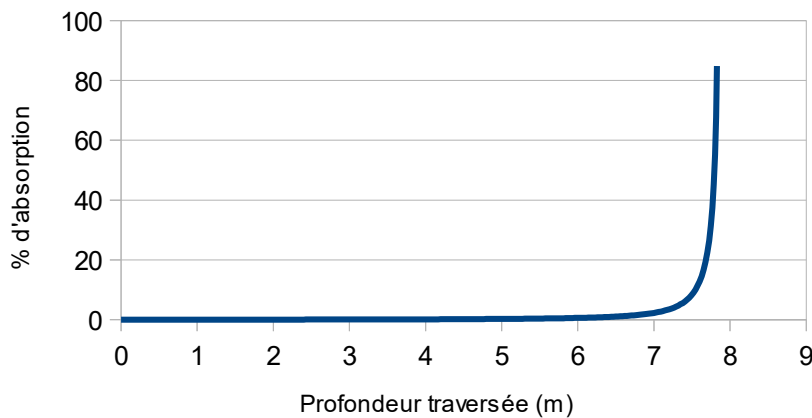


Figure 21 : Graphique du pourcentage d'absorption en fonction de la profondeur pour $\gamma=37,8$ (soit un flux de muons d'énergie 4,0 GeV)

Le graphique obtenu n'est pas cohérent avec nos mesures. En effet, à Nouzilly, pour un plafond d'une profondeur d'environ 2m, nous avons obtenu un pourcentage d'absorption de 36,5%, alors que d'après ce modèle, le pourcentage d'absorption pour deux mètres d'épaisseur traversée devrait être quasiment nul.

À titre de comparaison, nous avons également réalisé le graphique en considérant un flux de muons avec $\gamma = 9$, soit une énergie d'environ 1GeV. Voici le résultat :

On voit que les muons ayant une énergie de 1GeV ont statistiquement disparu pour une épaisseur de 2m. Cela ne convient pas non plus avec les valeurs réelles.

Ce modèle n'est donc pas valable. Cela peut se comprendre, en effet le modèle possède une limite majeure : il considère les muons comme ayant tous la même énergie. Nous avons d'abord pris une énergie de 4,0GeV car d'après nos informations, il s'agissait de l'énergie moyenne des muons, mais on constate bien que cette moyenne ne suffit pas à représenter l'ensemble du flux ; une énergie de 1,0GeV ne convient pas non plus.

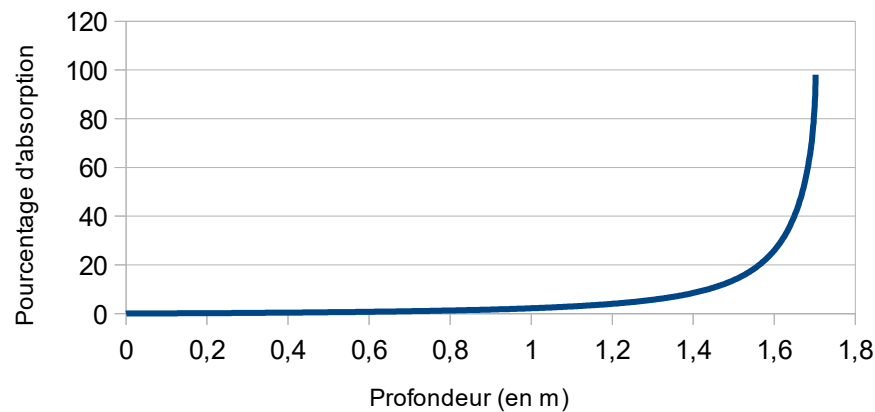


Figure 22 : Graphique du pourcentage d'absorption en fonction de la profondeur pour $\gamma=9$ (soit un flux de muons d'énergie 1,0 GeV)

En outre, pour un point donné, l'ensemble des muons n'ont pas traversé exactement la même épaisseur de roche, puisque même si la majorité des muons arrivent verticalement, il y en a toujours qui arrivent de directions différentes.

Conclusion

Tout au long de notre projet, nous avons essayé de répondre à notre problématique qui était « Peut-on déterminer l'épaisseur d'une roche grâce à l'absorption des muons ? ». Nous avons tout d'abord testé les différents paramètres pouvant influencer sur nos mesures puis nous avons essayé de trouver une **relation entre l'épaisseur de roche traversée et le pourcentage d'absorption des muons**.

À l'aide de mesures d'étalonnage sur des épaisseurs de roche faibles, nous en avons trouvé une, modélisée sous la forme de l'équation suivante :

$$Epaisseur = 10^{\frac{\%abs-22,4}{21,8}}$$

Mais, après avoir pensé que cette équation n'était pas valable sur des épaisseurs de plus de 8m à cause de la perte du **caractère relativiste** du muon, nous avons constaté qu'en pratique, elle ne fonctionnait pas non plus sur des épaisseurs plus faibles, de l'ordre de 1m50.

C'est pourquoi nous avons créé un **modèle mathématique simplifié** de l'évolution du flux de muons avec la profondeur. Mais celui-ci, ne correspondant pas à nos observations réelles, n'est pas représentatif de la réalité, notamment car il ne prend pas en compte le fait que les muons arrivent à la surface de la Terre avec des **énergies** très différentes.

Nous allons donc devoir affiner ce modèle, notamment via l'établissement d'un **spectre d'énergie des muons** au niveau du sol et par l'application au modèle.

De plus nous allons devoir continuer à réaliser des expériences dans des caves et des carrières pour établir une **nouvelle courbe d'étalonnage** plus précise et comprenant des épaisseurs bien plus importantes.

Pour plus de précisions vous pouvez vous orienter vers notre site internet

Bibliographie

- Documents Science à l'École relatifs aux muons et au cosmodétecteur.
- <http://www.futura-sciences.com>
- <http://www.cidehom.com>
- <http://www.lyc-rudloff-strasbourg.ac-strasbourg.fr/>
- <http://www.donnees.centre.developpement-durable.gouv.fr/>

ANNEXES

I – Comment détecter les muons ?

1)

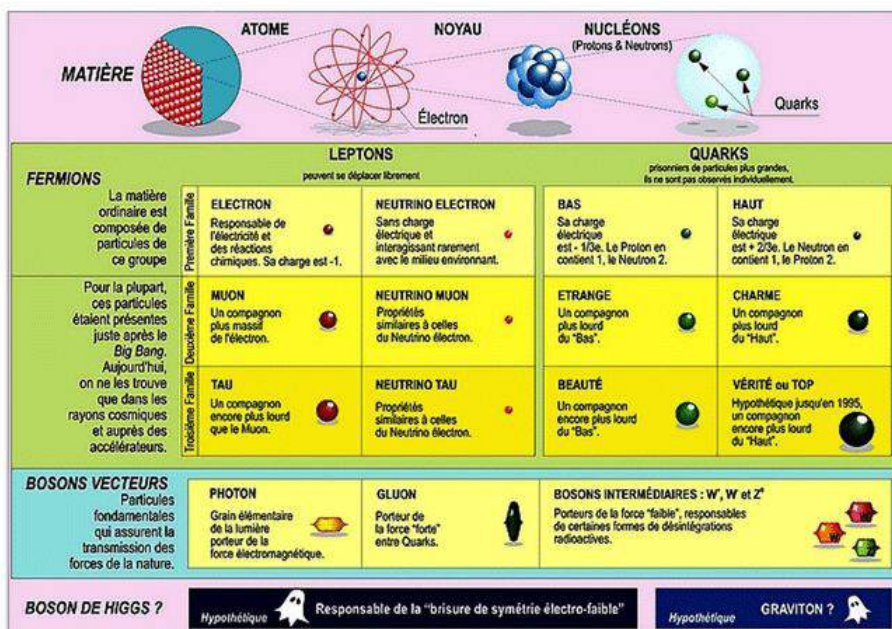


Fig I.1.A : Modèle standard

2) Fonctionnement du cosmodétecteur

Les raquettes du scintillateur sont composées d'un matériau plastique transparent, et utilisent le principe de la fluorescence : les muons, ou toute autre particule, qui traversent la raquette excitent des molécules du matériau, qui vont se désexciter immédiatement, en émettant un photon.

Mais ce courant est trop faible pour être détecté directement ; il faut donc l'amplifier, et c'est le rôle du photomultiplicateur (PM) (fig4). Ce système est composé d'un tube à vide dans lequel sont disposées à intervalles réguliers des électrodes, maintenues sous des tensions croissantes. Le tube doit donc être maintenu sous haute tension pour fonctionner. Dans le cas de notre machine, nous avons utilisé les PM1 et 3 que nous avons alimenté de tensions de 950V et 1000V (on règle les tensions à l'aide du logiciel sur l'ordinateur, après avoir branché la machine sur une alimentation secteur, puisqu'elle comprend un convertisseur).

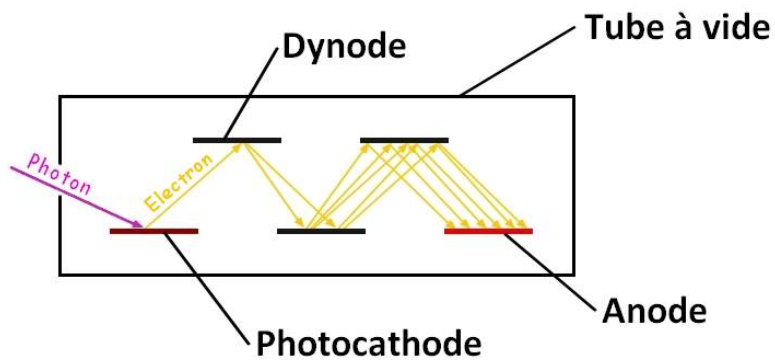


Fig 1.2.A : Schéma du photomultiplicateur

Revenons donc au photon émis par la fluorescence du plexiglas. Il va être réfléchi contre les parois du scintillateur, jusqu'à atteindre la première électrode du photomultiplicateur, appelée photocathode. Cette plaque est sous une tension positive assez faible. L'énergie du photon incident permet à un électron d'être arraché de cette plaque et de franchir le vide la séparant de la plaque suivante (dynode), un peu plus chargée (environ 100V de plus) et donc attirant l'électron.

Celui-ci, grâce à l'accélération qu'il subit en traversant le vide, possède une grande énergie cinétique en frappant la dynode. Cet apport d'énergie va arracher à la dynode environ 4 nouveaux électrons : c'est le phénomène d'émission secondaire.

Ces électrons vont à leur tour être accélérés vers la plaque suivante, et ainsi de suite; au bout de 10 émissions secondaires, ce n'est plus un seul électron mais un million d'électrons qui arrivent sur la dernière électrode : le courant qu'ils vont engendrer est alors suffisant pour être détecté.

La dernière électrode, appelée anode, collecte les électrons secondaires émis par la dernière dynode et les concentre dans un courant électrique, qui va être analysé par la partie électronique du cosmodétecteur.

Le signal est d'abord analysé par un module appelé discriminateur, qui va conserver ou éliminer les signaux en fonction de leur intensité ; un courant de tension trop faible va être considéré comme du bruit indésirable et va être discriminé. Les signaux retenus sont transformés en un signal carré d'amplitude constante et de durée réglable par l'utilisateur (fig5). Dans notre cas, le seuil de discrimination était fixé à 40mV.

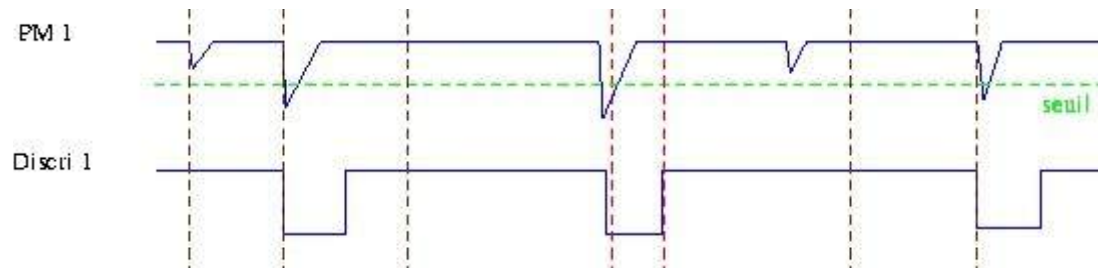


Figure 1.2.B : Exemple de signaux discriminés ou non

Le problème qui survient ici est que chaque signal que l'on obtient à la sortie du discriminateur ne correspond pas forcément à un muon ; en effet, il peut avoir été déclenché par une autre particule au niveau du scintillateur, ou résulter du bruit de fond thermique du photomultiplicateur, assez conséquent. En revanche, les muons sont les seules particules qui ont la capacité de traverser à la fois le premier et le second scintillateur, et ce quasiment en même temps ; en effet, leur vitesse est tellement élevée que si la particule est bien un muon, alors on observe un signal similaire à la sortie des deux photomultiplicateurs, avec à peine quelques nanosecondes de décalage.

C'est pour cela qu'un second module utilise le principe de coïncidence, qui va analyser les signaux produits à la sortie de deux photomultiplicateurs différents, afin de retenir uniquement ceux présents sur les deux à la fois.

3) Paramètres

- **Expérience 1**

Hypothèse

Le flux de muons à un endroit et un moment donnés est constant et donc proportionnel à l'intervalle de comptage.

Protocole

Pour cela, l'expérience que nous avons mise en place consiste à faire plusieurs mesures de muons, au même endroit, le même jour, en faisant à chaque fois varier l'intervalle de comptage : toutes les minutes d'abord, puis toutes les deux, quatre, six et dix minutes.

Résultats

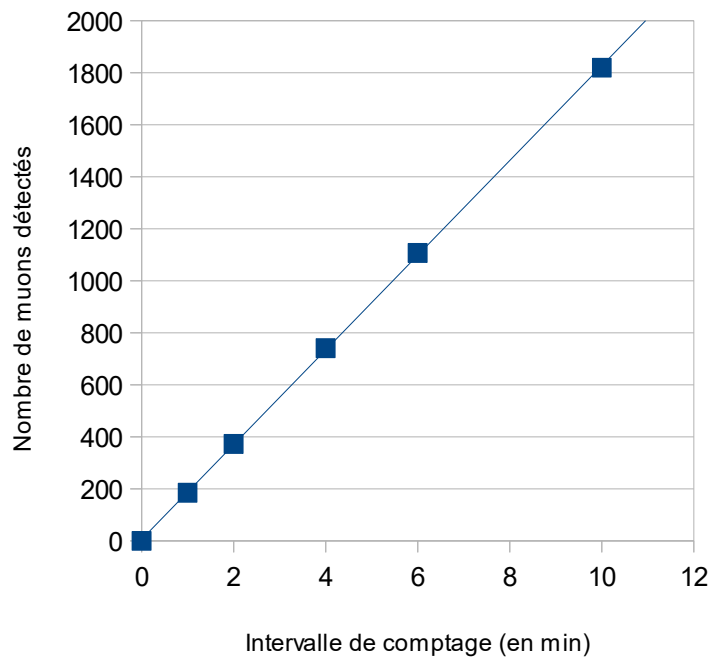


Figure 8 : Graphique du nombre de muons détectés en fonction de l'intervalle de comptage

Nous observons que la courbe modélisant le nombre de muons détectés en fonction de l'intervalle de comptage est une droite passant par l'origine du repère ; il y a donc bien situation de proportionnalité.

D'autre part, la machine, à chaque nouvel intervalle de mesure, doit respecter un temps d'étalonnage de l'ordre de 2,6 secondes, celui-ci pouvant donc entraîner un décalage et fausser légèrement la proportionnalité.

Interprétation

Nous pouvons en conclure que quel que soit l'intervalle de comptage, nos mesures seront équivalentes et ne changeront pas notre interprétation. Notre hypothèse est donc validée. Nous utiliserons cependant toujours le même intervalle de comptage pour chacune de nos expériences (soit un comptage toutes les minutes)

Après avoir vérifié ce critère, nous allons maintenant effectuer une expérience afin de déterminer la distribution angulaire des muons.

Expérience 2

Hypothèse

Nous supposons que le nombre de muons détectés dépend de l'orientation des raquettes du cosmodétecteur.

Protocole

Nous avons alors réalisé une expérience où nous avons mesuré le nombre de muons arrivant sur ces plaques, le même jour, au même endroit en faisant varier uniquement l'inclinaison à chaque mesure. Ces mesures sont faites sur 10 minutes avec un comptage toutes les minutes.

On commence donc par faire une mesure avec les plaques horizontales, puis inclinées de 10°, de 20°, de 30°, de 40° et ainsi de suite jusqu'à ce que les plaques soient totalement verticales (donc inclinées de 90°).

Résultats

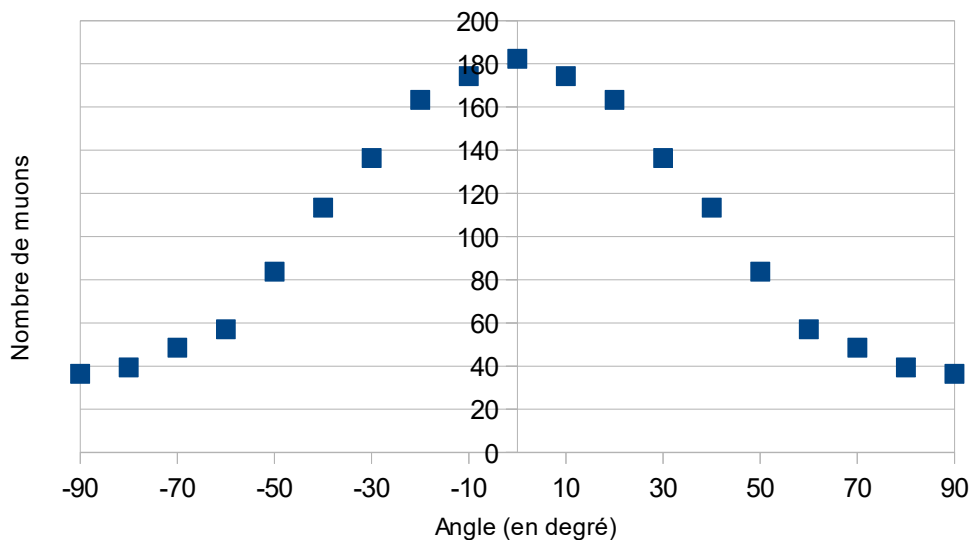


Figure 9 : Graphique de la distribution angulaire des muons

Observations

Nous observons que le nombre de muons détectés est plus élevé lorsque les plaques sont horizontales que lorsqu'elles sont verticales. En effet, plus les plaques se rapprochent de la verticale, moins le nombre de muons est élevé.

Interprétation

Nous en concluons que la majorité des muons arrive à la verticale du sol. Cela peut être en partie expliqué par le fait que les muons arrivant non verticalement au sol ont une épaisseur d'atmosphère plus importante à traverser (fig10). Il est donc logique qu'il en arrive moins à la surface de la Terre.

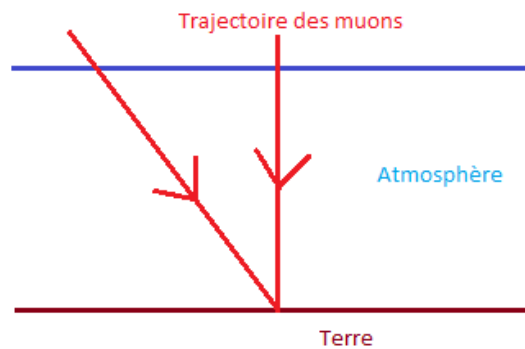


Figure 10 : Schéma de la trajectoire des muons

Cela confirme notre hypothèse ; il faudra alors effectuer nos prochaines mesures en s'assurant que les plaques du cosmodétecteur sont bien horizontales.

En outre, Karim Noui, un chercheur théoricien de l'université de Tours, nous a conseillé de vérifier si cette direction en provenance de laquelle on détectait le plus de muons était bien la verticale, et non pas la direction du soleil.

• **Expérience 3**

Hypothèse

Nous pensons que l'on observe un « bruit de fond » constant de muons en provenance des autres sources de rayon cosmique primaire que le Soleil, et que les autres muons viennent uniquement du Soleil : le nombre de muons détectés dépendrait alors de l'inclinaison des plaques par rapport au Soleil et non par rapport à la verticale.

Protocole

Pour tester cette hypothèse, nous avons réalisé une mesure en continu durant toute une nuit pour voir une évolution du nombre de muon détectés en fonction du soleil. Nous

avons obtenu une mesure par minute, entre 21h et 7h dans la nuit du lundi 11/05/15 au mardi 12/05/15.

Résultats

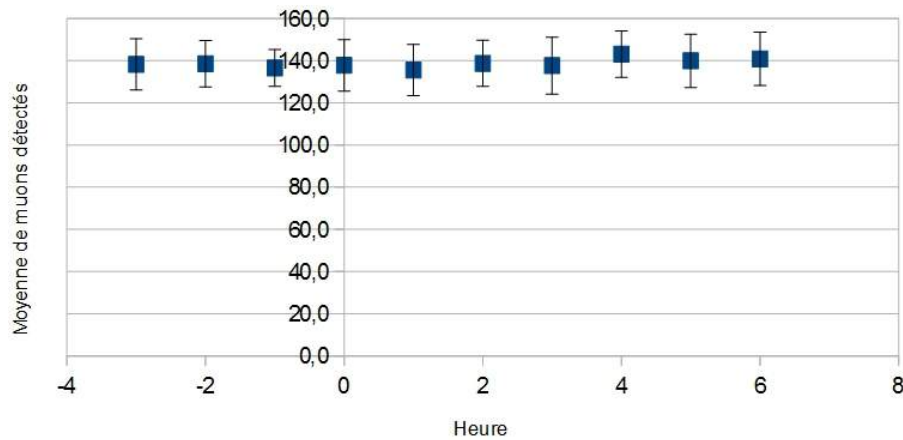


Figure 11 : moyennes de muons détectés par heure

Lecture : l'heure 0 correspond à minuit. Les heures « négatives » correspondent aux heures avant minuit. Chaque valeur est la moyenne des valeurs mesurées dans l'heure correspondante, par exemple la première valeur est la moyenne des valeurs mesurées entre 21h et 22h.

Observations

Nous voyons que le flux de muons reste constant au cours de la nuit.

Interprétation

Le flux de muons n'est pas ou très peu influencé par le Soleil.

Il provient donc en majorité de sources extérieures au Soleil.

Cela signifie que l'heure de nos expériences n'est pas un facteur à prendre en compte.

Penchons-nous désormais sur les facteurs environnementaux qui sont potentiellement capables d'influencer nos résultats.

• **Expérience 4**

Hypothèse

Nous supposons que la météo influe de façon significative sur le nombre de muons que l'on détecte au sol.

Protocole

Nous avons réalisé des mesures au même endroit, avec le même intervalle de comptage et sur la même durée (toutes les minutes pendant 10 minutes), lors de différentes

journées avec des météos différentes, puis nous avons déterminé les moyennes de chacune des séries de mesure afin de pouvoir les comparer.

L'objectif n'était pas de parvenir à une corrélation précise entre météo et muons détectés étant donné le nombre de facteurs (nuages ou non, pluie ou non, ensoleillement, vent, température...), mais simplement de vérifier si ces facteurs avaient une influence significative.

Résultats

Ciel	Nombre de muons détectés (moyenne)
Nuageux, pluvieux	196 ± 15
Neige	194 ± 14
Soleil	177 ± 12

Observations

Après cette expérience, nous remarquons que le nombre de muons détectés varie en fonction de la météo. En effet, on en détecte environ 10% de plus lorsque qu'il y a présence de nuages (pluie, neige) que lorsque le ciel est clair.

$$\text{Écart relatif} = \frac{\text{valeur pluie} - \text{valeur soleil}}{\text{valeur pluie}} \times 100 = \frac{196 - 177}{196} \times 100 = 9,69\%$$

Interprétation

Cette variation nous a semblé importante, et à l'aide de Karim Noui, nous avons pensé qu'il était possible qu'une atmosphère plus dense présenterait plus de noyaux et donc plus de possibilités de collisions créatrices de muons. Il serait alors logique que l'on détecte plus de muons lorsque le temps est humide. Toutefois, nous notons également que le temps qu'il fait à la surface ne nous donne pas forcément d'informations précises sur l'état de l'atmosphère dans ses hautes couches, où sont créés les muons.

Cependant, nos futures expériences ne devraient pas être influencées par ces variations car nous allons raisonner avec des rapports entre les nombres de muons (pourcentage d'absorption) et non directement avec les nombres moyens de muons détectés. De plus, ces expériences seront réalisées le même jour, à des moments où la météo ne changera pas et ne risquera donc pas de faire varier nos résultats.

Après cette expérience, nous étudierons la question de l'altitude.

Expérience 5

Hypothèse

Nous supposons que l'altitude à laquelle les mesures sont réalisées a une incidence sur le nombre de muons détectés.

Protocole

Nous avons réalisé des mesures à l'extérieur des caves Perrière de Grandmont à une altitude de 96m, avec un intervalle de comptage d'une minute pendant 10 minutes. Puis nous avons contacté un lycée au pied du Mont-Blanc possédant également un cosmodétecteur. Ce lycée étant situé à une altitude de 685m, nous leur avons demandé d'effectuer des mesures, avec les mêmes réglages que ceux que nous utilisons habituellement, afin de pouvoir les comparer avec les nôtres.

Résultats

Lieu (altitude)	Nombre de muons détectés (moyenne)
Extérieur caves Perrière de Grand Mont (96m)	226 ± 12
Lycée du Mont blanc (685m)	290 ± 20

Observations

On observe que le nombre de muons détectés est plus important lorsque l'altitude est plus élevée. Nous avons calculé l'écart relatif entre ces deux valeurs :

$$\text{Écart relatif} = \frac{N_{\text{Mont Blanc}} - N_{\text{Perrières}}}{N_{\text{Mont Blanc}}} \times 100 = \frac{290 - 226}{290} \times 100 = 22\%$$

Entre un lieu situé à une altitude de 96m et un autre à 685m on observe une différence de plus de 22%. Cette différence est suffisamment conséquente pour valider notre hypothèse.

Interprétation

On peut expliquer cela par le fait que les muons détectés à 685m ont parcouru une

distance dans l'atmosphère moins importante que ceux détectés à 96m, il est donc logique, statistiquement, qu'une plus faible quantité se soit déjà désintégrée.

Suite à notre entretien avec Loic Villain, maître de conférences en physique à la faculté de médecine de Tours, nous avons également constaté que les muons, étant des particules chargées, étaient déviées par le champ magnétique terrestre. Or, le Mont Blanc et notre lycée se situent à des latitudes différentes : le facteur de l'altitude n'était alors pas la seule variable dans notre expérience. Cependant, nous avons considéré que la différence de latitude entre les deux lieux n'était pas si importante ; de plus, l'énergie des muons est tellement élevée que l'influence du champ magnétique devrait être négligeable.

Dans cette première partie, nous avons vérifié tous les paramètres intervenant dans nos mesures. Lors de nos expériences qui nous permettront de répondre à la problématique, nous allons prendre les précautions nécessaires.

II) Mesures de l'absorption des muons par la roche

2) b- Perte du caractère relativiste du muon

e (en m)	E (GeV)	γ	tau (en μ s)
0	4.3	40.7	89.4
0.5	4.035	38.2	83.9
1	3.77	35.7	78.4
1.5	3.505	33.2	72.9
2	3.24	30.7	67.4
2.5	2.975	28.2	61.9
3	2.71	25.6	56.3
3.5	2.445	23.1	50.8
4	2.18	20.6	45.3
4.5	1.915	18.1	39.8
5	1.65	15.6	34.3
5.5	1.385	13.1	28.8
6	1.12	10.6	23.3
6.5	0.855	8.1	17.8
7	0.59	5.6	12.3
7.5	0.325	3.1	6.8
7.6	0.272	2.6	5.7
7.7	0.219	2.1	4.6
7.8	0.166	1.6	3.5
7.9	0.113	1.1	2.3
8	0.06	0.6	1,2