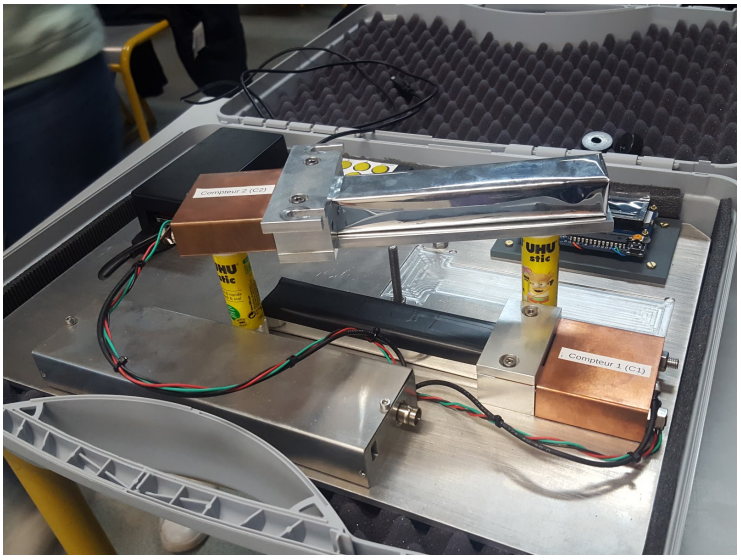
Mesure du flux de muons cosmiques

Les élèves de Première S du Lycée Plaine de Neauphle

Trappes en Yvelines



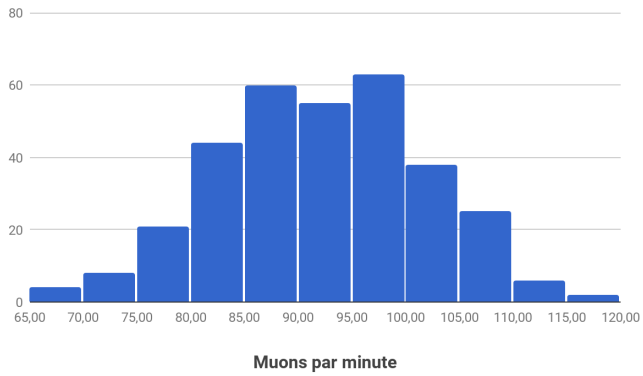


Table des matières

Introduction **3**

Problématique **5**

Développement **7**

Le détecteur COSMIX 7

Mesure du flux de muons cosmiques 10

Distribution angulaire du flux de muons cosmiques 13

Atténuation du flux de muons cosmiques dans les matériaux 16

Impact biologique du flux de muons cosmiques (travail en cours) 19

Conclusions et Perspectives **21**

Ce que nous avons fait 21

Ce qu'on est en train de faire 21

Ce qu'il nous reste à faire 21

ANNEXE - Affiche de la Conférence **22**

Bibliographie **23**

Introduction

La Terre subit une pluie incessante de particules chargées appelées les rayons cosmiques. Au début du XXéme siècle, Viktor Hess découvre par hasard la présence de rayons cosmiques qui interagissent directement avec l'atmosphère terrestre grâce à son galvanomètre.

Figure 1 - Portrait de Victor Hess

Plus tard les scientifiques ont découvert que ces rayons cosmiques sont constitués de particules chargées électriquement.

A la fin des années 1930, Pierre Auger découvrit que la création de celles-ci étaient due à une réaction en chaîne. En effet, à leur entrée dans l'atmosphère, les particules provenant de l'espace, principalement des protons, entrent en collision avec les électrons et les noyaux des atomes composant l'air en produisant une gerbe de particules secondaires. D'un proton suffisamment énergétique découle ainsi une multitude d'événements.

Lorsque les physiciens ont décidé de se pencher sur ce phénomène physique, ils ont remarqué la présence de nombreuses particules subatomiques dans les gerbes, notamment des muons cosmiques.

On peut trouver plusieurs mesures et estimations du flux de rayons cosmiques sur la Terre au niveau du sol, mais on retiendra qu'en intégrant toutes les directions possibles, on compte environ 1 muon/cm2 /min.

Ces données varient beaucoup selon l'endroit et surtout la hauteur où est placé le capteur. En effet, plus l'épaisseur d'atmosphère traversée est importante et plus la probabilité qu'un muon cosmique atteigne le sol diminue.

Pour ce qui concerne l'énergie des rayons cosmiques, les valeurs sont très diverses, par exemple les rayons cosmiques les plus énergétiques ont une énergie de plusieurs dizaines de joules, ou,

Figure 2 Laboratoire souterrain de Modane

selon l'unité de mesure utilisée en physique de particules, 10^{11}eV, tandis qu'un rayon cosmique de basse énergie possède une énergie d'environ 10-100 MeV. On dit ainsi que le spectre d'énergie des muons cosmiques est très large.

Plusieurs expériences et laboratoire dans le monde on comme objectif l'étude des rayons cosmiques.
L'observatoire Pierre-Auger qui étudie les rayons cosmiques de grande énergie. On peut aussi citer Antares qui est un télescope à neutrinos plongé au fond la Mer Méditerranée.
Certains laboratoire, comme le Laboratoire Souterrain de Modane, situé à 1800 mètres sous la pointe de Fréjus, se trouvent sous-terre pour protéger les expériences qu'ils accueillent du rayonnement cosmique. A Modane, par exemple, on ne détecte que 4 muons /m^2/jour.

Figure 3 Détail de l'observatoire AUGER

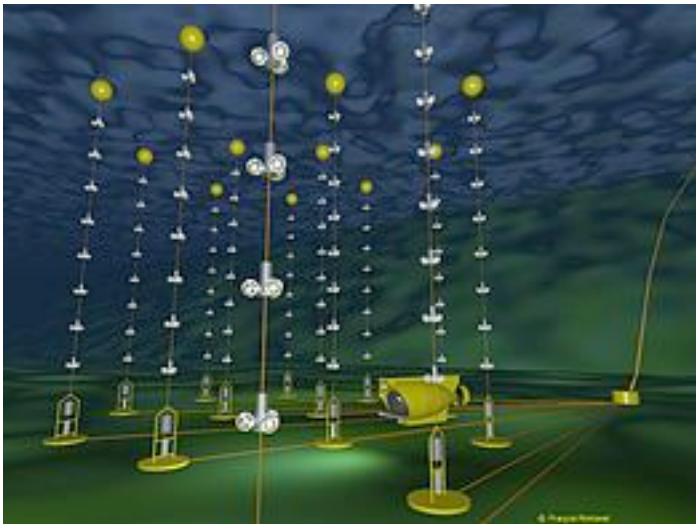


Figure 4 Schéma du détecteur ANTARES

Problématique

Dans ce compte-rendu, nous présentons les résultats du projet de mesure du flux de muons cosmiques au Lycée Plaine de Neauphle à l'aide du détecteur COSMIX, conçu par le laboratoire CENBG et distribué en Ile de France par le laboratoire LAL.
Grace à ce détecteur nous avons réalisé plusieurs mesures avec, comme objectif la compréhension du phénomène du rayonnement cosmique.

Dans un premier temps nous nous sommes intéressés à la valeur du flux de muons cosmiques dans notre Lycée en effectuant la mesure selon deux méthodes: une méthode de comptage et une méthode statistique.

La visite au Palais de la Découverte à Paris au mois de novembre a soulevé des questions auxquelles on a eu envie de répondre.

- Est-ce que le flux de muons est le même selon l'angle d'observation du ciel?
- Les muons traversent la matière? Et si oui, quelles sont les conséquences de leur passage sur le flux?
- Les muons peuvent être dangereux pour la santé? Ont-ils un impact sur les cellules vivantes?

On a donc étudié la distribution angulaire du flux de muons, l'atténuation du flux à travers les plafonds de notre Lycée et on a estimé quel pouvait être l'impact biologique des muons sur des cellules en partant des effets des UV.

Nous avons organisé une conférence scientifique qui se tiendra au Lycée le 15 mars 2018. A cette occasion nous présenteront nos résultats à trois astrophysiciens CNRS et aux concepteurs du détecteur (l'affiche de la Conférence est en ANNEXE). Les chercheurs vont nous présenter leurs recherche et répondront à nos questions sur l'orientation post-Bac.

Nous avons travaillé en équipes, chaque équipe ayant un objectif précis, nous avons partagé les résultats et les problèmes entre nous, nous avons manipulé et pris des initiatives pour optimiser les mesures. Nous avons échangé avec des chercheurs par mail, au Palais de la découverte.
Ce projet nous a permis de voir ce que c'est le travail de recherche scientifique.

Les élèves de Première S

1ere S1

AZIRAR Othmane
BEDOUI Anissa
BOU BAHRI Inès
BOURAHOUANE Mehdi
DIALLO Bassa
DJIBALENE Ghayas
DOGAN Ahmet
EVAIN Flavie
HIER Julien
IBBA Soraya
KEITA Rokiya
KORNIAK Lucie
LUTIN Ludivine
MAGHNOUJ Inès
MBOUROU N'DJAMBE AMEMAD Nick Romario
MOISE Julien
NUNES DA COSTA Pédro Miguel
VALENTE DA SILVA Inès

1ere S2

BAB-ERRIH Oussama
BELMEHDI Abdel Hakim
BEZZAOUYA Amel
BULLOCK Patrick
CHAIBDOUR Nebia
EL MIRI Walid
ESSABAR Sarah
FARDINY Adeleen
GONCALVES Mélanie
GOUABI Ibtisam
GUSTAVE Mélina
JDAINI Mehdi
KABA Fatima
KOUNDI Mohamed
LACHGAR Firdaws
LACHOUB Ahmed-Yacine
MESSAI Rafiq
NAHHAL Leila
OSISHVILI Emilia
SABRI Youssef
SAULET Flora
SCORNET Chloé

Développement

Le détecteur COSMIX

Le détecteur COSMIX est le résultat d'un projet pédagogique du Centre d'Etudes Nucléaires de Bordeaux Gradignan (CENBG) sous la direction de Benoît Lott et Denis Dumora. Il est constitué d'une mallette contenant un détecteur de muons cosmiques.

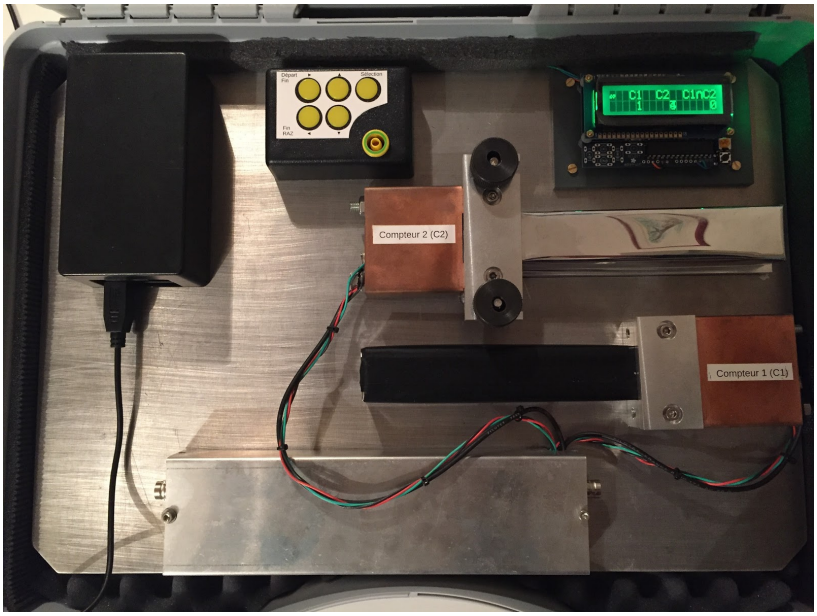


Figure 5 Intérieur de la mallette COSMIX

En Figure 5 on voit l'intérieur de la mallette. Le détecteur est constitué de deux barreaux de scintillateur inorganique en iodure de césium dopé au thallium.
L'un des deux barreau est fixé, l'autre est mobile.
Les dimensions des barreaux ont été mesurées et elles valent:

	Barreau 1	Barreau 2
Longueur (cm)	14,0	14,5
Largeur (cm)	3,0	2,5

Tableau 1 Dimensions du détecteur

Chaque mesure est affectée par une incertitude de 0,05 cm qui correspond à la résolution de la règle utilisée.
Les surfaces des 2 barreaux ont été calculées et elles valent :
42,00 cm² = 0,004200 m² pour le barreau n°1

36,25 cm² = 0,003625 m² pour le barreau n°2
soit une surface totale de 78,25 cm².

Pour estimer l'incertitude sur la mesure de l'aire on a simulé le tirage aléatoire de 1000 valeurs de longueurs et largeurs des deux détecteurs et pour chaque tirage on a calculé l'aire totale correspondante.
La Figure 6 montre l'histogramme des valeurs d'aire ainsi trouvées.

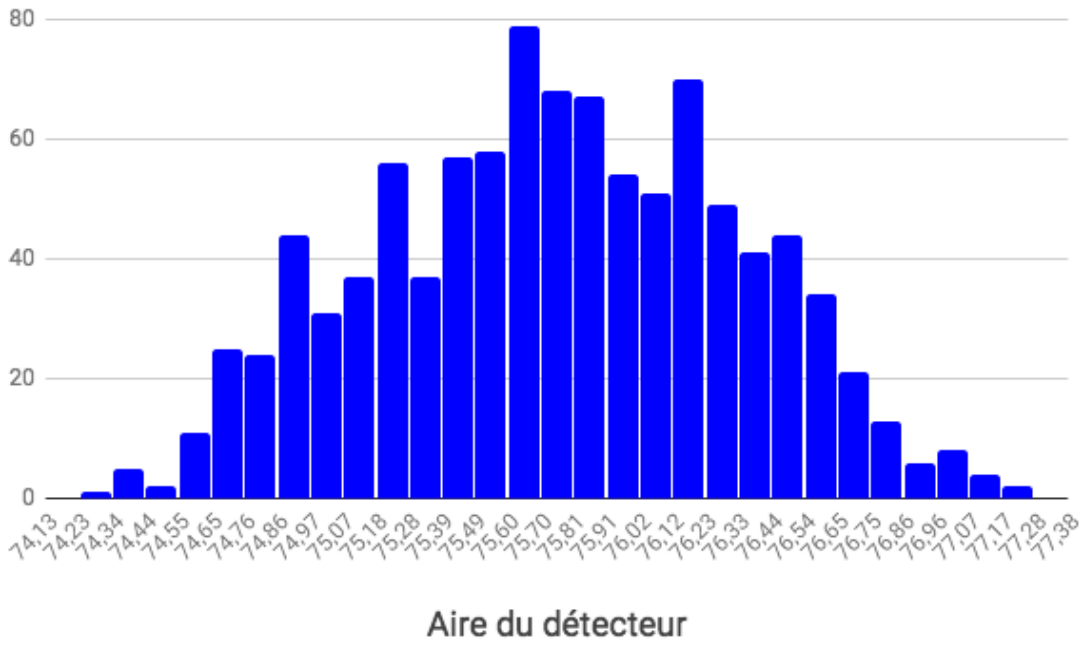


Figure 6 Distribution statistique des aires du détecteur simulées

L'incertitude sur la mesure de l'aire a été choisi comme étant l'écart-type de cette distribution. L'écart-type vaut 0,58 cm². Ainsi la surface du détecteur vaut $S = (78{,}25 \pm 0{,}58)cm^2$.

On remarque que l'erreur de mesure sur l'aire correspond au 0,75% de la surface même.
Le muon étant une particule chargée, quand un muon traverse l'un des deux barreaux, il y a une probabilité que le scintillateur émette des photons de lumière visible à cause de l'interaction du la particule chargée avec les atomes qui compose le scintillateur [5].
Les photons sont ensuite détectés par deux photo-diodes installées au bout des deux barreaux de scintillateur.

Un photomultiplicateur installé à la suite de la photo-diode convertit une partie de la lumière émise lors du passage des muons dans le scintillateur en courant électrique et cela permet d'incrément le comptage.
Un écran d'affichage permet d'observer l'évolution du nombre de muons qui traversent le barreau numéro 1 (C1), le barreau numéro 2 (C2) ou le nombre de muons qui traversent les deux barreaux (C1∩C2).

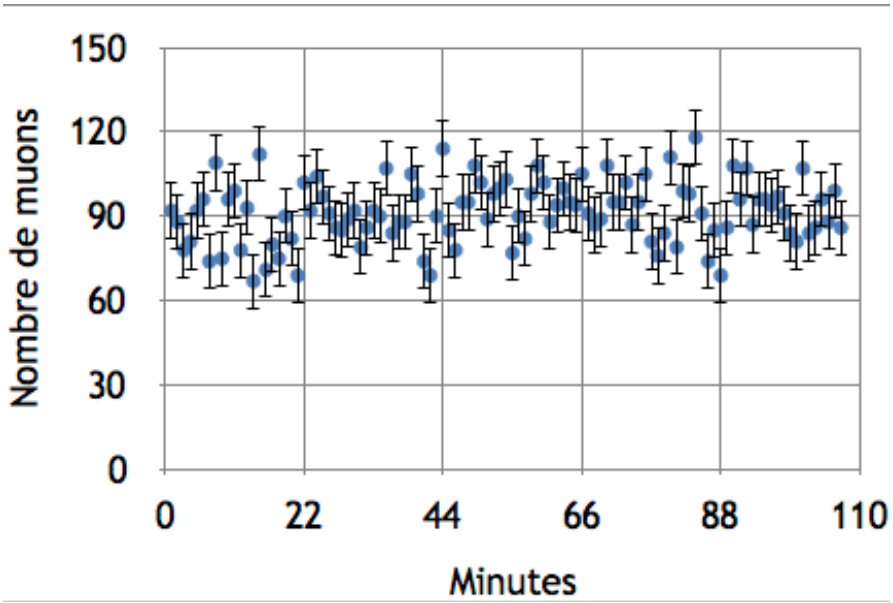


Figure 7 Stabilité du détecteur

La Figure 7 montre le nombre de muons par minute détectés sur les deux barreaux en fonction du temps (en minutes) sur une période de 110 minutes.
Si on fait l'hypothèse que le flux de muons cosmiques est un phénomène constant, on remarque à l'oeil que le nombre de muons est à peu près constant en fonction du temps ce qui nous permet d'affirmer que le détecteur est bien stable dans le temps.
Les barres d'erreurs correspondent à l'incertitude sur le nombre de comptages calculée comme la racine carrée du nombre de comptages[1].
L'incertitude sur la mesure du temps par le détecteur est, ici, négligée.

[1] D'après la loi statistique dite « de Poisson »

Mesure du flux de muons cosmiques

Le flux de muons cosmiques est le nombre de muons par seconde par mètre carré.

$$\Phi = \frac{\mu}{S * T}$$

où μ représente le nombre de muons détectés, T le temps de détection (en seconde) et S la surface du détecteur (en mètres carrés).
Dans un premier temps on a laissé le détecteur allumé pendant 6 heures et on a détecté un total de 32857 muons dans les deux barreaux.
Le flux de muons cosmique calculé à partir de cette mesure est

$$\Phi = \frac{328576}{0{,}0078 * 6 * 60 * 60} = (195 \pm 1) m^{-2} s^{-1}$$

L'erreur sur le flux a été calculé comme la racine du nombre de muons détectés divisé par le temps de détection et la surface du détecteur. Les erreurs sur la mesure de la surface et du temps ont été négligées.

Ce résultat a été ensuite comparé à une étude statistique: le caractère à étudier étant le nombre de muons cosmiques détectés par minute.
La mallette fournit un fichier qui contient seconde par seconde l'évolution du nombre de particules détectées sur les deux compteurs. On a donc analysé ce fichier et on a déterminé le nombre de muons détectés par minute lors des 6 heures de prise de données.

L'histogramme du nombre de muons détectés est montré en Figure 8.

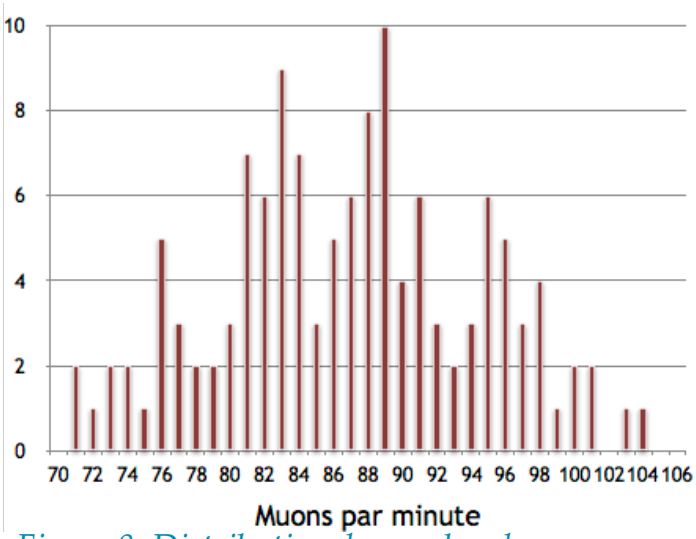


Figure 8 Distribution du nombre de muons par minute

Cette distribution est à peu près symétrique par rapport à une valeur comprise entre 81 et 90.

Les Figures 9 et 10 montrent les histogrammes de la même distribution par classes de 5 et de 10. Le caractère symétrique de la distribution est plus évident (sur tout en Figure 10) ainsi que la valeur centrale de la distribution qui semble être proche de 90.

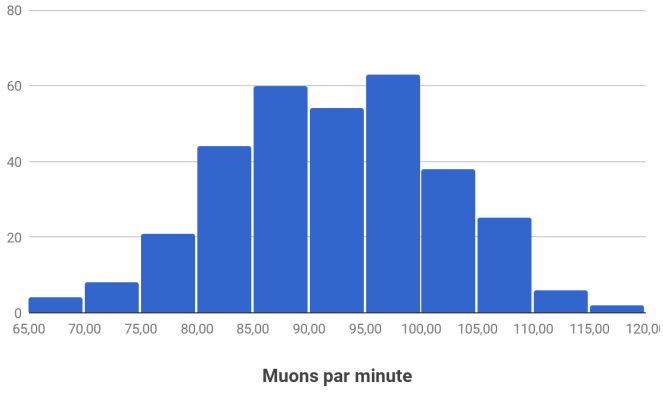


Figure 9

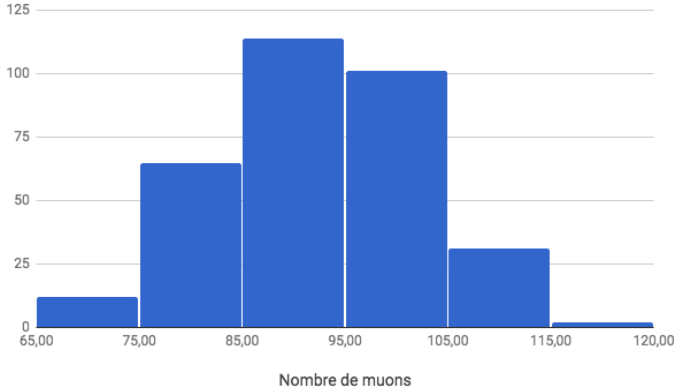


Figure 10

La moyenne et l'écart-type de la distribution statistique du nombre de muons ont été calculées avec les formules suivantes

- Moyenne: $\bar{\mu} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\mu_i = 91{,}8$

où $\bar{\mu}$ est la moyenne du nombre de muons détectés par minute, *N* est le nombre de mesures effectuées c'est à dire 328 et μ_i est le nombre de muons détectés pendant la i-ème minute.

- Variance: $V = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(\mu_i - \bar{\mu})^2 = 93$

- Ecart-type: $\sigma = \sqrt{V} = 9{,}6$

Avec ces résultats le flux de muons cosmiques vaut

$$\Phi = \frac{91{,}8}{60 * 0{,}0078} = (199 \pm 1)\ m^{-2}s^{-1}$$

L'erreur sur le flux a été calculé comme l'écart type de la distribution statistique des muons divisé par la racine carrée du nombre de mesures, par le temps de détection et la surface du détecteur.

Les deux méthodes donnent deux résultats très similaires.

De plus les deux résultats exprimés en $cm^{-2}min^{-1}$sont respectivement 1,17 $cm^{-2}min^{-1}$ et 1,19 $cm^{-2}min^{-1}$ résultats très similaires à ceux qu'on trouve dans la littérature scientifique à savoir 1 $cm^{-2}min^{-1}$ [1].

Distribution angulaire du flux de muons cosmiques

Nous cherchons à savoir comment et de quelle manière le nombre de muons varie-t-il en fonction de la direction d'observation, c'est à dire la distribution angulaire du flux des muons cosmiques.
Nous avons donc réfléchis à un protocole qui nous permettra de connaître le nombre de muons à différentes inclinaisons.
Pour le faire, nous avons décidé de surélever un des deux barreaux du détecteur de muons à l'aide de deux tubes de colles. En mesurant avec un rapporteur nous avons fixé le barreau mobile à la position qui nous permettait de regarder à une certaine inclinaison θ.
Plusieurs configurations de détection ont été réalisées comme illustré en Figure 11.

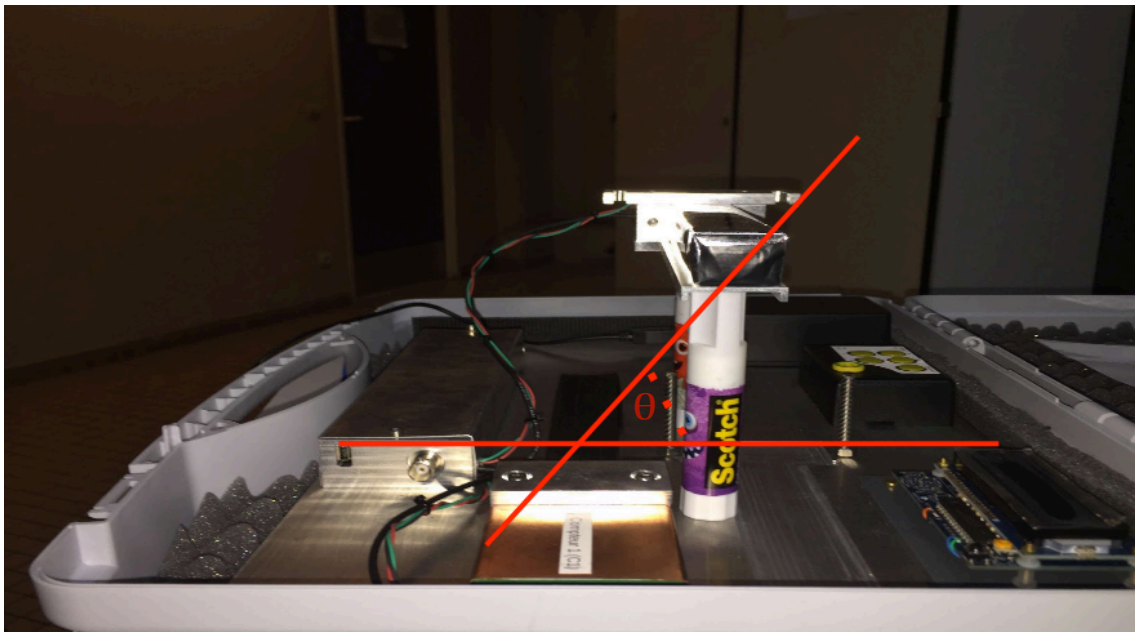


Figure 11 Configuration de mesure

Ainsi, plus le barreau mobile est éloigné, plus l'angle d'inclinaison est petit.
Quatre configurations différentes ont été installées: 0°, 35°, 60° et 90°.
Pour chaque inclinaison on a choisi une durée de mesure identique de 10 minutes et on a mesuré le nombre de muons qui traversaient les deux détecteurs à l'aide du compteur C1∩C2.

Ces muons correspondent à ceux que arrive au sol selon la direction fixée par la configuration choisie. Les résultats sont résumés dans le Tableau 2

Inclinaison θ	*n ° d e muons*	*Incertitude*
0°	*5*	*2,23*
35°	*20*	*3,15*
60°	*48*	*6,92*
90°	*72*	*8,48*

Tableau 2 Nombre de muons détectés par chaque angle d'inclinaison

Nous avons alors remarqué que plus l'inclinaison était grande, plus le nombre de muons est élevé. La Figure 12 montre le nombre de muons détectés en fonction de l'angle d'inclinaison.

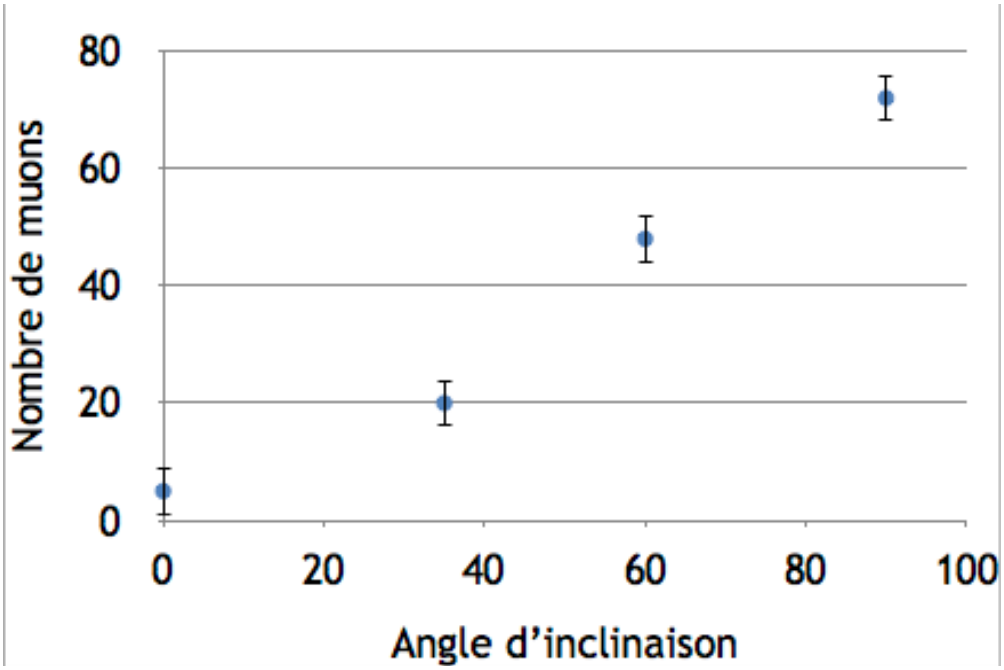


Figure 12 Distribution angulaire des muons cosmiques

On en conclut que le nombre de muons dépend de la direction d'observation.

Nous avons cherché une explication à ce phénomène.
Dans un premier moment nous avons fait l'hypothèse que le flux de muons cosmiques n'a pas la même intensité selon la direction de provenance. En faisant une recherche documentaire on s'est rendu compte que cette conjecture était peu convaincante.

En réalisant des schéma comme celui en Figure 13 nous avons alors compris que les muons parcourent un chemin plus ou moins long dans l'atmosphère selon l'angle sous lequel on les regarde.

Ainsi, on peut imaginer que les muons qui arrivent dans notre détecteur à 0° ont traversé beaucoup plus d'atmosphère que ceux qui arrivent à 90°.
En traversant l'atmosphère, les muons interagissent avec les molécules et ils peuvent ainsi être arrêtés.
Pour vérifier cette hypothèse on devrait pouvoir refaire notre mesure a un autre endroit assez éloigné de notre Lycée pour voir si on retrouve le même résultat.

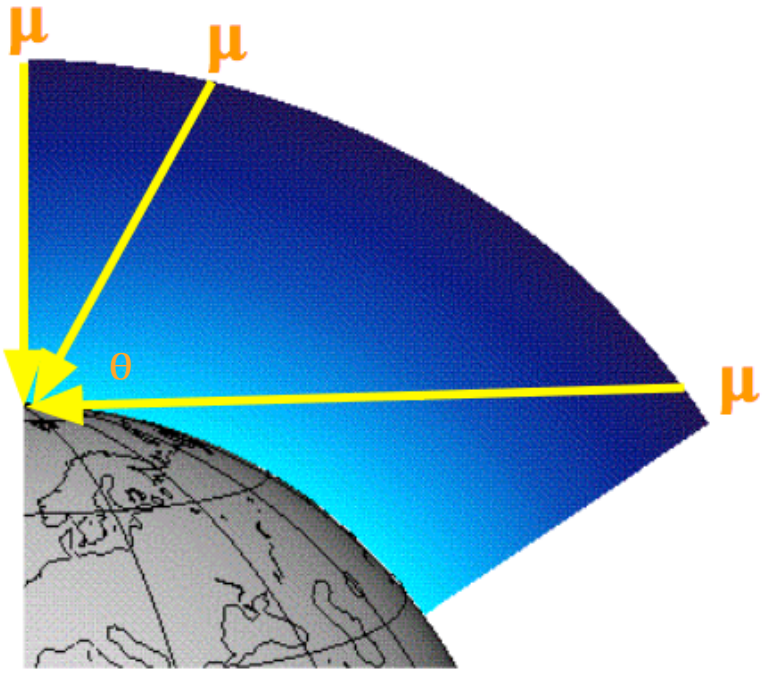


Figure 13 Explication de l'effet observé

Atténuation du flux de muons cosmiques dans les matériaux

On s'est alors demandé si le fait de traverser la matière pouvait avoir un impact sur le flux de muons cosmiques.
Nous avons donc émis l'hypothèse que plus il y a de matière à traverser par les particules moins on en détecte. Pour valider notre hypothèse on a procédé à la réalisation d'une mesure.
Dans un premier moment on a laissé les deux capteurs positionnés côte à côte, nous avons mesuré le nombre total de muons qui les traversent à chaque étage de notre lycée afin de voir combien de muons sont arrêtés par la matière des plafonds du Lycée.
Les résultats ne montraient pas une véritable atténuation en fonction de l'étage du bâtiment. Nous nous sommes expliqué cette « incohérence » par le fait que la configuration choisie ne sélectionnait pas que les muons qui proviennent du plafond mais aussi tous ceux qui arrivent sur les capteurs par les cotés du lycée. Ces derniers ne subissent aucun impact par l'étage auquel le détecteur est installé.
Nous avons donc superposé les deux capteurs le plus parallèlement possible en utilisant deux tubes colle identiques comme dans la Figure 4.

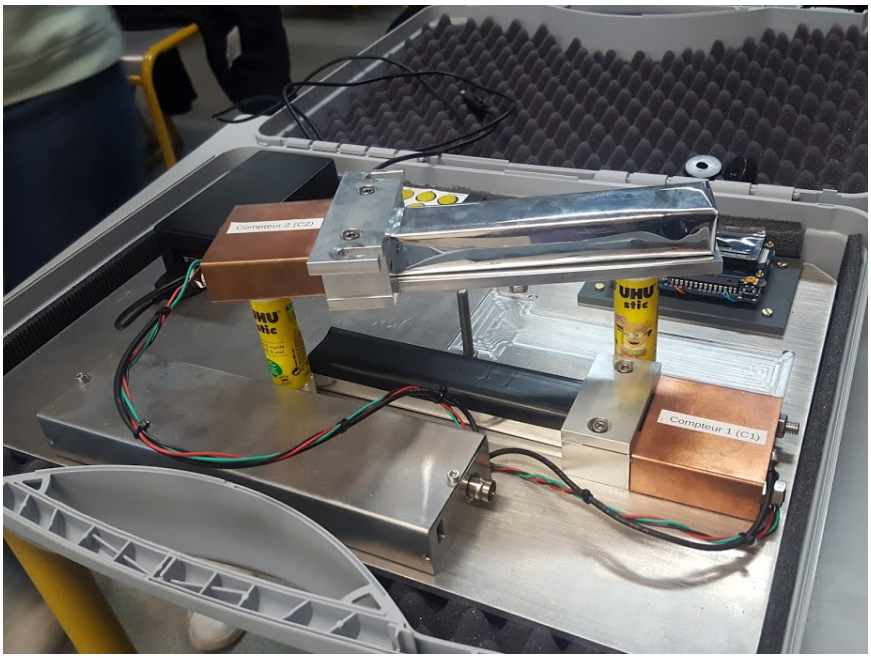


Figure 14 Configuration de mesure

Cette deuxième configuration nous a permis de compter exclusivement les muons qui traversent les deux capteur, c'est à dire les muons qui ont une direction perpendiculaire au sol et qui sont donc susceptibles de traverser les plafonds.
On a ainsi éliminé du comptage les muons provenant par les cotés du bâtiment et pour lesquels l'effet de traverser la matière ne dépend pas de l'étage auquel on effectue la mesure.
De plus, cette fois, la mallette à été installée à chaque étage du lycée, dans des salles positionnées du même côté afin de se mettre pour chaque mesure dans les mêmes conditions.
Nous avons laissé la mallette avec les capteurs positionnés de même façon pendant 140 minutes pour chaque étage.

étage	n° de muons	Incertitude
RDC	811	28
1	851	29
2	910	30
extérieur	960	31

Tableau 3 - Nombre de muons cosmiques détectés par étage

Les résultats sont résumés dans le Tableau 3 dans lequel on peut lire le nombre de muons détectés à chaque étage et l'incertitude correspondante.
On remarque que plus on monte dans les étages, plus il y a de muons. Et que, plus on descend dans les étages, moins de muons seront captés. Cela vérifie notre hypothèse, qui est : plus il y a de matière à traverser, moins on capte de muons, autrement dit, le flux de muons cosmiques est affecté par la matière traversée
La figure 15 montre le graphique du nombre de muons cosmiques en fonction du nombre d'étage traversés.

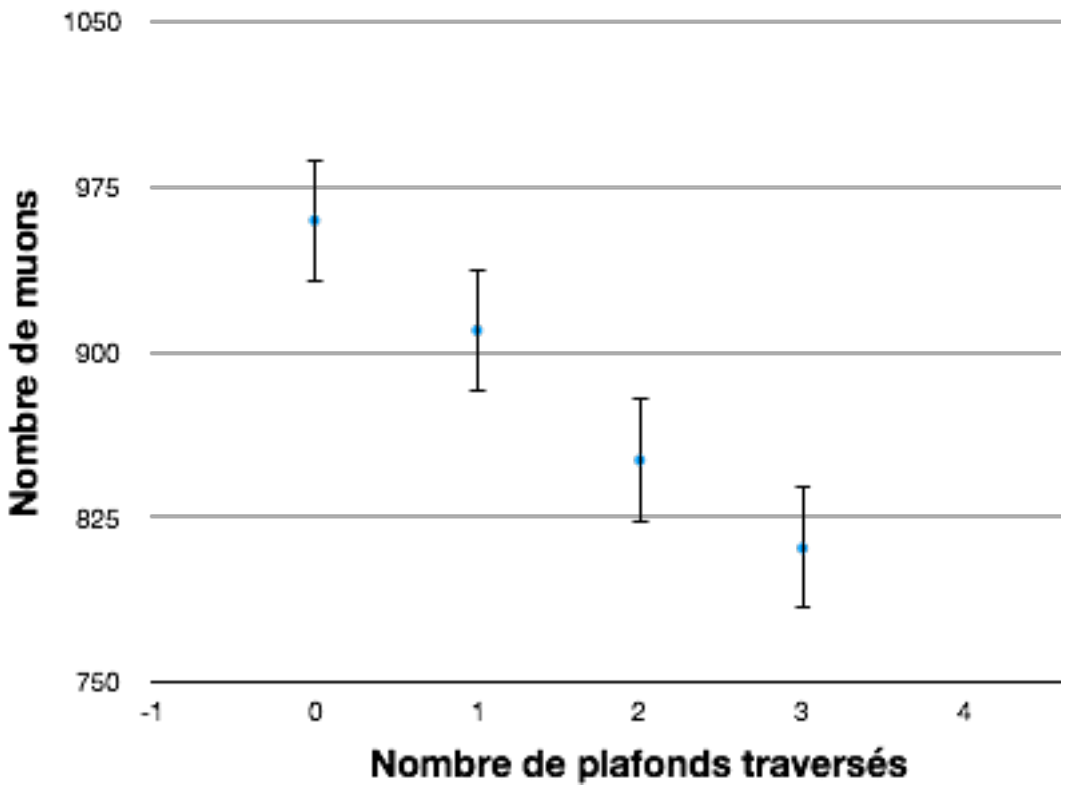


Figure 15 Nombre de muons détectés par étage

Ce phénomène permet de nombreuses applications dans d'autres domaines scientifiques comme l'archeologie et la volcanologie.
En 2017 des scientifiques ont découverte une chambre secrète à l'intérieur de la pyramide de Khéops [6] grâce à la mesure du flux de muons cosmique qui traverse la pyramide en le comparant eu flux théorique attendu.
De la même façon, en Auvergne, les scientifiques tiennent sous contrôle la présence de lave à l'intérieur des volcans afin de prévoir d'éventuelles éruptions [7].

Impact biologique du flux de muons cosmiques (travail en cours)

Le fait que les muons cosmiques interagissent avec la matière peut avoir un impact sur les cellules traversées. Pour déterminer si les muons cosmiques ont un impact biologique sur les êtres vivants plus particulièrement sur leur ADN, nous avons réalisé des expériences sur des cultures de levures des cultures saccharomyces cerevisiae.

Ce champignon unicellulaire peut être cultivé en milieu liquide, ou solide et il a la particularité, lorsqu'il subit une mutation au niveau du gène Ade2, de changer de couleur.
En effet, la mutation qui va endommager le gène Ade2 en une souche de levures Ade2-, va endommager la molécule AIR et donc engendrer l'arrêt de la production de la molécule CAIR.
La molécule AIR va donc s'accumuler dans la cellule et par oxydation, créer des molécules rouges.

Si une mutation est engendrée par le passage d'un muon cosmique on devrait donc à l'oeil nu, voir ce changement de couleur au niveau des levures.

Nous pouvons ainsi détecter l'apparition de mutations par la présence ou non de colonies rouges. Comme le flux de muons cosmique c'est pas contrôlable, autrement dit nous n'avons pas de moyen de bombarder des cellules avec des muons, nous avons décidé d' étudier l'impact du flux de photons sur les levures et d'effectuer ensuite une comparaison analogique avec les muons.
Le protocole expérimental suivant a été établi et réalisé:

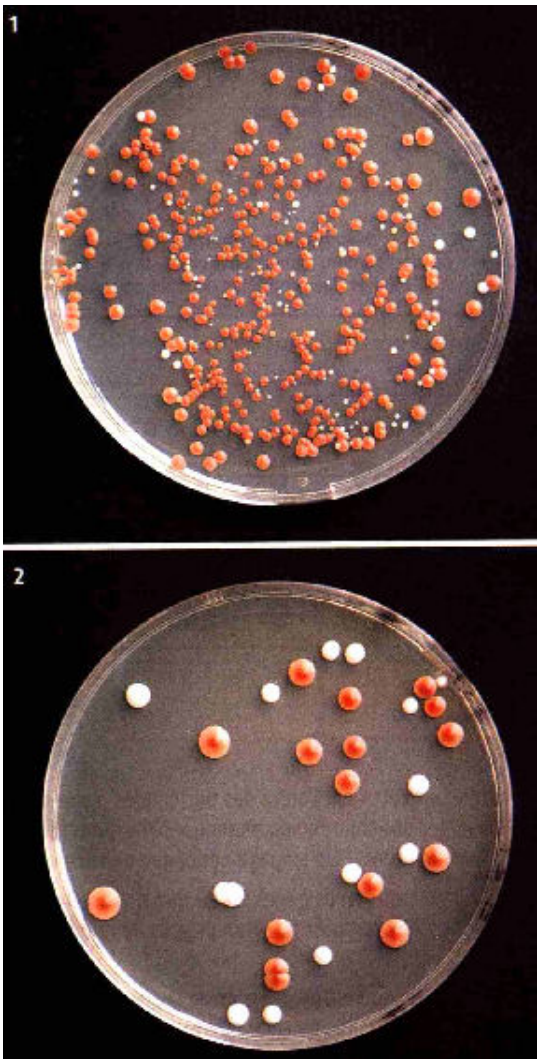


Figure 16 : Photographie des cultures de levures après exposition

Etape 1 : 5 boîtes de Pétri sont identifiées par temps d'exposition aux UV: t 0 s / t 15 s / t 30 s / t 60 s / t 120 s. (Une des boîtes à t 0 s servira de témoin)
Etape 2: 2 gouttes de solution de levure ont été étalées de façon circulaire.
Etape 3 : On ôte les couvercles le temps de l'exposition dans la boîte à UV (car le rayonnement ne traverse pas le polycarbonate). Après exposition, les boîtes sont déposées dans un incubateur à 28 °C.

A ce jour nous ne disposons pas encore de résultats définitifs; ce travail sera finalisé dans les semaines à venir.

Conclusions et Perspectives

Ce que nous avons fait

- Le flux de muons cosmiques au lycée Plaine de Neauphle à Trappes a été mesuré suivant deux méthodes différentes. Sa valeur est $\Phi = (195 \pm 1) m^{-2} s^{-1}$ avec la méthode 1 et $\Phi = (199 \pm 1)\ m^{-2} s^{-1}$. Les deux valeurs sont très proches entre elles et compatibles avec les résultats qu'on trouve dans la littérature scientifique.
- La distribution angulaire du flux de muons cosmiques a été étudiée. On a mis en évidence la dépendance du nombre de muons observés par rapport à l'angle d'observation.
- L'atténuation du flux de muons à travers les plafonds du lycée a été observée: le muons interagissant avec la matière sont arrêtés, ainsi le flux dépend de l'épaisseur de matière traversée.
- Un protocole expérimental pour l'étude de l'impact des muons cosmiques sur des cellules a été établi. Cette étude nous permettra d'estimer la dangerosité de ces particules.

Ce qu'on est en train de faire

- Dans les semaines à venir on va compléter l'étude de l'impact biologique des muons sur les cellules vivantes
- On a organisé une conférence scientifique qui se tiendra le 15 mars 2018 au Lycée. On exposera ns résultats et trois chercheurs CNRS interviendront pour nous guider dans nos projets d'orientation.
- A cette occasion, les concepteurs de la mallette COSMIX (M. Lott et M. Dumora) seront en vidéoconférence avec nous de Bordeaux et le responsable académique de la Mallette (M. Blitte) sera également présent.
- L' affiche de la conférence que nous avons réalisée est en pièces jointes

Ce qu'il nous reste à faire

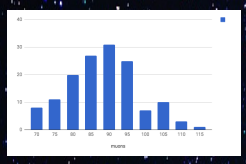
- Plusieurs élèves impliqués dans le projet sont inscrit en Section Européenne Anglaise - DNL Mathématiques on envisage l'écriture d'un article scientifique en anglais dans les deux mois à venir.

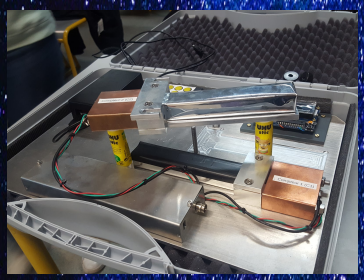
ANNEXE - Affiche de la Conférence

Lycéens Chercheurs

1ère Conférence Scientifique
au Lycée Plaine de Neauphle
autour des Mathématiques,
de la Physique et des SVT

15 / 03 / 2018 à 9 h 00 - salle Alain Lambert
Lycée Plaine de Neauphle - Trappes





Programme

- 9h00 « Etude statistique du flux de muons cosmiques » les élèves de 1ère S.
- 9h45 Coffee Break.
- 10h20 « Particules et Probabilités »Dr. Margherita Buizza Avanzini - LLR Ecole Polytechnique.
- 10h55 « Des nombres, des images et des étoiles » Dr. Maïca Clavel - IPAG Grenoble.
- 11h25 « Les Mathématiques au service de la Science » Dr. Bruny Baret - APC Paris 7.
- 11h55 Petite table ronde sur l'orientation post BAC visant le monde de la Recherche

Bibliographie

[1] Nicolas Arnaud et al, *Passeport pour les deux infinis,* DUNOD, 2016
[2] Nicolas Arnaud et al, *Elémentaire* - revue scientifique numéro 3, Elémentaire, 2006
[3] Claire Bonnoit-Chevalier et Jean-Christophe Pelhate, *Cahier Pédagogique « COSMO à l'Ecole »*
[4] Alessandro de Angelis, *Penetrating radiation at surface and in water,* arXiv: 1002.1810v2
[5] Benoit Lott et Denis Dumora, *La mallette COSMIX : un détecteur pédagogique de rayons cosmiques portable,* 2015
[6] http://www.laradioactivite.com/site/pages/Muographie_Pyramides.htm
[7] https://france3-regions.francetvinfo.fr/auvergne-rhone-alpes/un-volcan-sous-la-surveillance-des-muons-967147.html