

AVEC NOS ÉLÈVES

Étude du flux de muons selon la nature des matériaux d'un établissement scolaire

Catherine Fauroux, Christine Tran, Lycée Jeanne d'Arc – Étampes (91)

Dans le cadre d'un TPE une belle illustration de la démarche expérimentale à l'aide d'un cosmodétecteur. Les élèves ont appliqué la tomographie muonique à la détermination de l'absorption des différents bâtiments du lycée construit avec des matériaux différents.

Dans le cadre d'un TPE en 2017-2018, trois élèves de 1^{re} S (Matthieu Colin, Éric-Junior Égéa et Natasha Krakowiak) ont eu l'opportunité d'utiliser un cosmodétecteur prêté par le dispositif ministériel « COSMOS à l'École ».

Cette roue cosmique permet de détecter les muons cosmiques, particules élémentaires produites dans la haute atmosphère et qui arrivent sur Terre à chaque instant. Après des recherches bibliographiques, dont un certain nombre en langue anglaise, les élèves se sont alors demandés si le flux de muons incidents pouvait dépendre de la nature du matériau traversé. Pour cela, ils ont effectué différentes mesures au sein de l'établissement en exploitant toutes les fonctionnalités de la roue cosmique. Ils ont ensuite exploité leurs mesures afin de répondre à la problématique qu'ils avaient choisie.



Derniers conseils de C. Tran avant les premières mesures dans la cour...

Leur démarche

Les muons cosmiques ne sont pas forcément des particules étudiées dans les programmes de lycée, mais il s'avère que cela est une expérience enrichissante pour nos élèves. Ces derniers avaient déjà été initiés aux particules du modèle standard lors de la participation à une conférence au Grand Rex à Paris en 2017. Ils avaient trouvé ce thème si passionnant que l'idée d'effectuer un scan de muons à différents endroits de l'établissement, dont les bâtiments datent de trois générations, est arrivée naturellement.

Bien évidemment, les élèves ont d'abord étudié le muon, et le principe de fonctionnement du cosmodétecteur. Pour les aider dans leur travail, Gérard Tristram, chercheur au CNRS et parrain de notre cosmodétecteur, est venu un mercredi après-midi dans l'établissement pour les initier aux rayons cosmiques et à l'utilisation du cosmodétecteur. À cette occasion, ils ont aussi découvert la mallette Cosmix, un autre détecteur à muons fonctionnant avec des barreaux de césium, apportée par un groupe d'élèves du lycée René Cassin à Arpajon. Ils ont pu réaliser des mesures simultanées et confronter ainsi les deux technologies.



Conférence de G. Tristram, IN2P3, CNRS.

Ils ont aussi cherché à comprendre l'utilité concrète des muons dans notre vie actuelle en se renseignant sur la mission ScanPyramids et sur le volcan de la Soufrière en Guadeloupe.

Lors des séances réservées au TPE, nos élèves ont d'abord réalisé une courbe de référence en allant sur le toit du lycée puis effectué des mesures en différents endroits de l'établissement pour établir des comparaisons avec l'expérience témoin et déterminer si la composition des bâtiments joue un rôle dans le nombre de muons qui nous parvient.

Le cosmodétecteur a permis aux élèves d'appliquer la démarche expérimentale et de se placer en position de chercheur. Ils ont utilisé un matériel scientifique développé par le CPPM (Centre de physique des particules de Marseille), dans le cadre du dispositif ministériel « Sciences à l'École ». Ils ont étoffé leurs connaissances en matière de physique des hautes énergies. Il s'est avéré très intéressant de travailler sur une machine que peu de personnes utilisent et de côtoyer une particule méconnue mais qui se révèle grandement utile dans notre vie quotidienne.

Pour la présentation du TPE, les élèves ont opté pour la rédaction d'une édition spéciale d'un magazine scientifique.



Mesures collaboratives organisées par Sciences à l'École en octobre 2017. Ces mesures ont contribué à l'élaboration d'un sujet de physique - chimie du baccalauréat S.



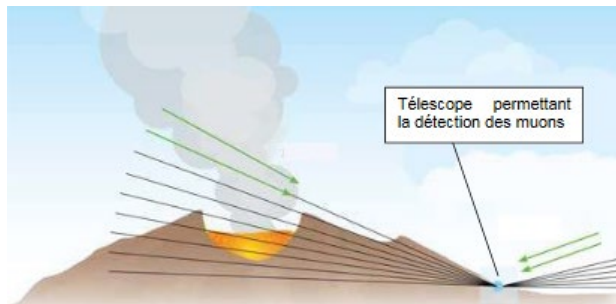
Appareil en fonctionnement.

Naissance d'une problématique

À travers leurs recherches sur les muons, les élèves ont découvert que ces particules pouvaient être

utilisées dans différents domaines d'investigation. Ils se sont particulièrement intéressés à la radiographie muonique pour explorer les volcans et à la tomographie muonique pour scanner des pyramides égyptiennes.

Le volcan de la Soufrière



Science in School, décembre 2013.

Depuis le début des années 2010, la tomographie muonique permet de renseigner précisément sur la densité de matière dans le volcan. En effet, cette technique se base sur l'absorption des muons par les roches à travers lesquelles ils sont passés. Plus la densité des roches est importante, plus les muons vont être absorbés. En confrontant le flux de muons ayant traversé le volcan au flux déterminé à ciel ouvert, les scientifiques peuvent connaître la quantité de matière que les muons ont traversée.

La radiographie muonique permet, par la même occasion, de déterminer la nature de la matière (aussi bien rocheuse que liquide ou encore gazeuse). Les chercheurs sont aussi capables de repérer une cavité et des zones fragilisées qui présentent un risque important pour la population. Le danger prépondérant n'est pas nécessairement une éruption volcanique mais un effondrement du volcan suite à une fragilité non détectée. Les chercheurs peuvent aussi étudier et observer les phénomènes qui ont lieu à l'intérieur des volcans. Ainsi, on sait grâce aux muons, que ce n'est pas moins d'un million de tonnes de fluide qui s'est déplacé dans le volcan durant l'été 2014.

Cependant, cette technique somme toute nouvelle ne permet pas de détecter et de prévenir d'une éruption volcanique imminente puisqu'il faudrait placer un capteur sous le volcan. À cela s'ajoute le fait qu'il faut presque 2 semaines de mesures pour obtenir la formation d'une image (il est donc à l'heure actuelle impossible par cette technique d'obtenir une image en temps réel) pour un volcan tel que la Soufrière qui ne fait pourtant qu'un kilomètre de large. Un volcan de plus grande envergure tel que l'Etna ou le Vésuve nécessiterait alors pas moins d'un an de mesures avec les matériels actuels.

Khéops, une fabuleuse découverte

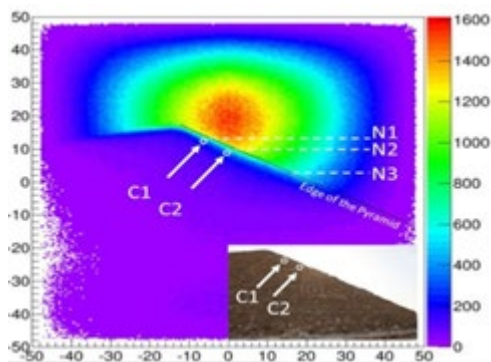
Mais ce n'est pas la seule utilité concrète des muons. En effet, depuis plus de 4 500 ans, la pyramide de Khéops, une des Sept Merveilles du monde, cachait en son sein une cavité d'une grandeur égale à celle d'un avion de près de 200 places ! Cette découverte du jeudi 2 novembre 2017, fruit des résultats obtenus par une équipe de scientifiques venant du monde entier (Français, Canadiens, Égyptiens et Japonais), est la plus grande découverte jamais effectuée depuis le Moyen Âge d'après un des directeurs du projet.

Le premier essai de détection des muons remonte en 1936 en Australie mais c'est au prix Nobel de physique américain, Luis Walter Alvarez, que l'on attribue le premier muogramme réalisé en 1970 sur d'autres pyramides telles que Khéphren.

La mission ScanPyramids, qui permet d'étudier les monuments de manière non invasive, a été lancée en octobre 2015. Les scientifiques ont observé le contraste entre les muons qui ont traversé l'objet étudié et ceux qui s'y sont arrêtés. Cette technique permet d'accéder à la densité des structures, voire de détecter du vide.



CEA Muon Telescope © CEA.



Muographie, image 2 D de la direction des muons détectés (octobre 2016). Rouge: moins de matière, moins d'absorption ; bleu : plus de matière, plus d'absorption.

Ainsi, comme le montre la muographie suivante, les scientifiques ont d'abord posé des plaques de détection au niveau N2 pour vérifier si les muons allaient mettre en évidence la cavité (C2) déjà connue. Les muons ayant révélé cette cavité, cette mesure témoin a validé la méthode. Après quoi, au niveau N1, les muons ont révélé une nouvelle

cavité (C1). Cette découverte confirme l'hypothèse de Jean-Pierre Houdin, architecte français, quant à l'existence de couloirs intérieurs derrière la façade de la pyramide servant à monter les blocs de pierre durant la construction de l'édifice.

À l'issue de leurs recherches, les élèves ont choisi d'étudier la variation des flux de muons selon l'endroit et la composition des bâtiments de leur lycée.

Matériel utilisé par les élèves

Principe de fonctionnement du cosmodétecteur

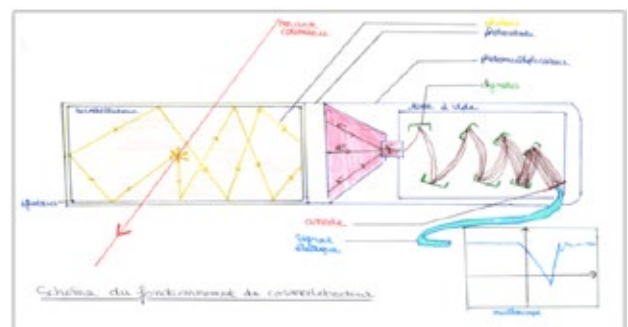


Cosmodétecteur en fonctionnement relié à l'ordinateur.
Crédit Sciences à l'École.

La roue cosmique est composée de quatre parties :

- 2 à 3 raquettes de scintillateurs qui détectent le passage éventuel des muons, en réagissant au passage d'une particule chargée en émettant un signal lumineux ;
- le photomultiplicateur associé à chaque raquette pour amplifier le signal détecté par le scintillateur ;
- la partie électronique pour le traitement des signaux ;
- et le logiciel installé sur un ordinateur portable.

La roue cosmique permet de détecter les particules chargées et particulièrement les muons lorsque ceux-ci traversent presque simultanément au moins deux scintillateurs.



Reproduction de Natasha Krakowiak.

Le scintillateur, constitué d'une matière organique de type plastique, émet de la lumière par fluorescence lors du passage d'une particule chargée.

Le signal lumineux est converti en signal électrique lorsque les photons issus du scintillateur parviennent à une photocathode et donnent naissance à des photoélectrons. Mais, ce courant électrique étant très faible et difficilement détectable, il doit être amplifié grâce à un photomultiplicateur. Le gain obtenu devient alors suffisamment important pour permettre la détection.

Conditions expérimentales

Les différents bâtiments étudiés sont de nature variée : certains, datant de la Révolution, ont des murs en brique. D'autres, ayant été bombardés pendant la Seconde Guerre mondiale ont été reconstruits en béton standard, dans les années 1950. Enfin, le bâtiment lycée, qui est sorti de terre en 2015, est composé de béton armé et de bois sur sa façade.

Les élèves ont positionné le cosmodétecteur à différents endroits de l'établissement : dans les caves, dans les laboratoires en rez-de-chaussée, dans une salle de classe au premier et au second étage du bâtiment, au CDI situé au troisième étage et sur le toit-terrasse du bâtiment lycée.

Pour chaque endroit de l'établissement, caractérisé par des couches de matériaux différents, les élèves ont mesuré le nombre de muons par minute pour une inclinaison déterminée de la roue cosmique. Ces mesures ont été reconduites plusieurs fois pour s'assurer de la reproductibilité des résultats. Dans cette étude, les conditions météorologiques pour les mesures en extérieur n'ont pas été prises en compte.

Résultats et analyse

Après une visite complète de l'établissement de la cave au plafond dans le sens propre du terme, nos jeunes élèves ont voulu exploiter cette source naturelle de muons qui vient de l'interaction du rayonnement cosmique avec la haute atmosphère. Ces particules sont très pénétrantes et se propagent en moyenne en ligne droite. Les élèves ont ainsi obtenu huit courbes différentes dont une enregistrée dans un environnement découvert sur le toit de l'établissement et qui servira de courbe de référence.

Notons que les couches de matériaux considérées sont celles de l'établissement. Par ailleurs, les muons ne traversent pas les mêmes couches de matière sur la totalité de la roue cosmique. De plus, les degrés utilisés dans les expériences ne sont pas les degrés des points cardinaux mais ceux choisis par nos

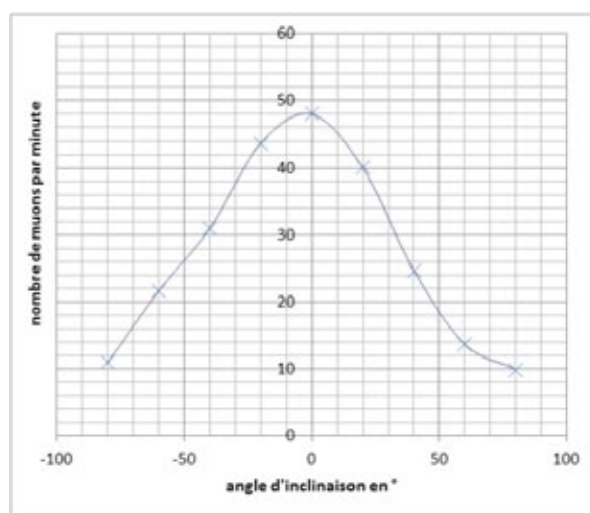
chercheurs. Si l'angle 0° correspond à la verticale, les mesures de 0 à -90° correspondent à une zone où il y a des habitations (vers le sud-est), les mesures comprises entre 0 et $+90^\circ$ correspondent à la colline de Guinette (vers le nord-ouest). Ainsi, nos élèves ont effectué leurs mesures de flux de muons pour un pas d'orientation de la machine de 20° . Pour des questions pratiques, lors des différentes acquisitions, le plan de rotation du cosmodétecteur a toujours été placé suivant la direction sud-est / nord-ouest.



Emplacements des différents lieux d'acquisition des mesures.

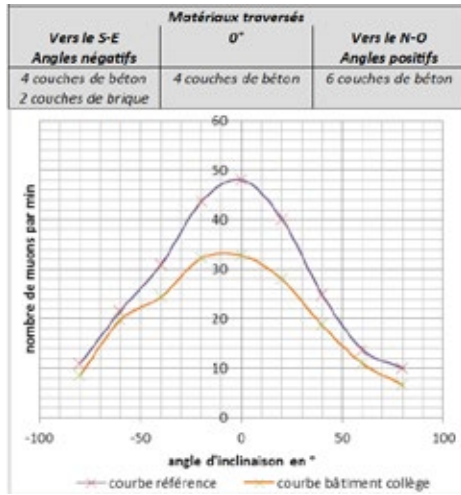
Les graphiques qui suivent montrent l'évolution du nombre de muons par minute en fonction de l'angle d'inclinaison du cosmodétecteur depuis différents lieux.

Mesure sur le toit, courbe de référence (1)

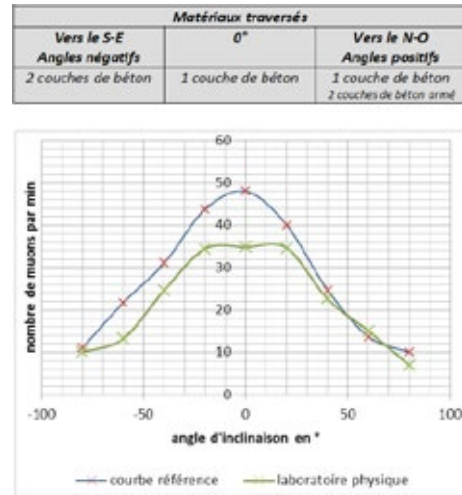


Ce graphique montre bien que le flux de muons est toujours maximal au zénith comme démontré par d'autres études. Il présente aussi une légère dissymétrie de part et d'autre de 0° , que l'on peut attribuer à la présence de la colline de Guinette qui surplombe la ville.

Au rez-de-chaussée, dans une classe de collège (2)

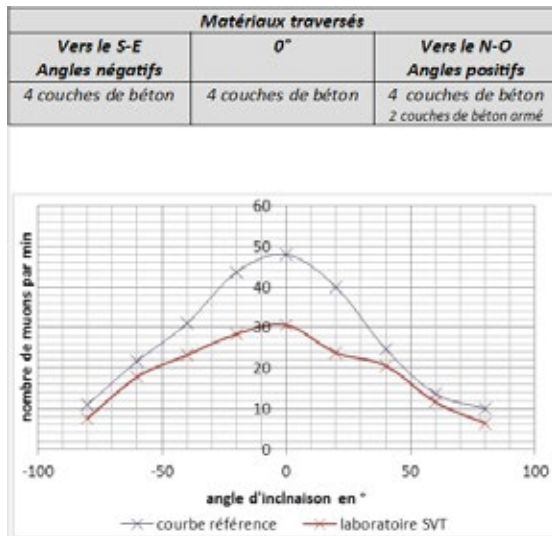


Au rez-de-chaussée, au laboratoire de physique (3)

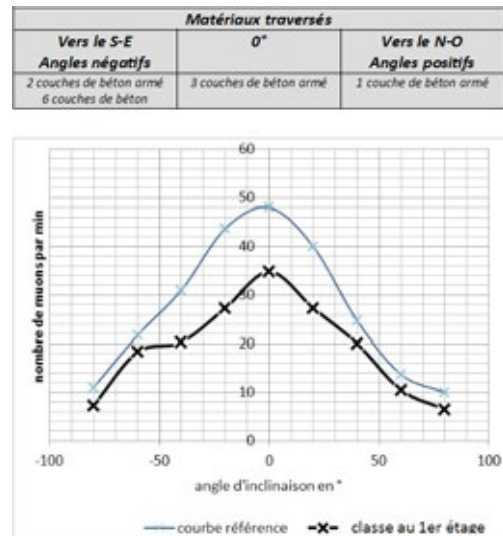


Le palier observé autour de 0° reflète la terrasse se trouvant au-dessus du laboratoire.

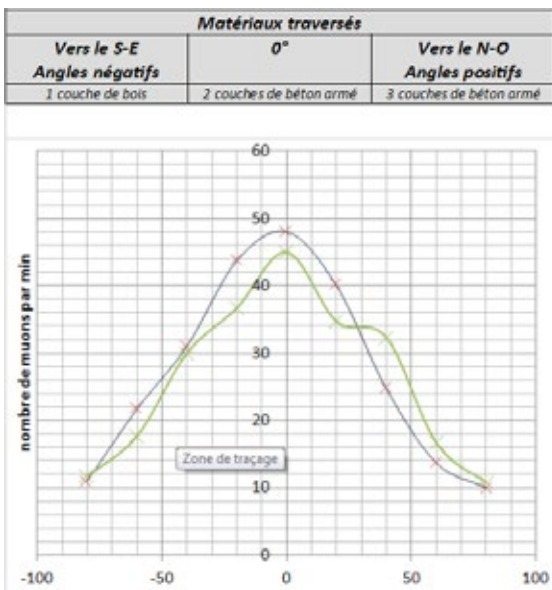
Au rez-de-chaussée, au laboratoire de SVT (4)



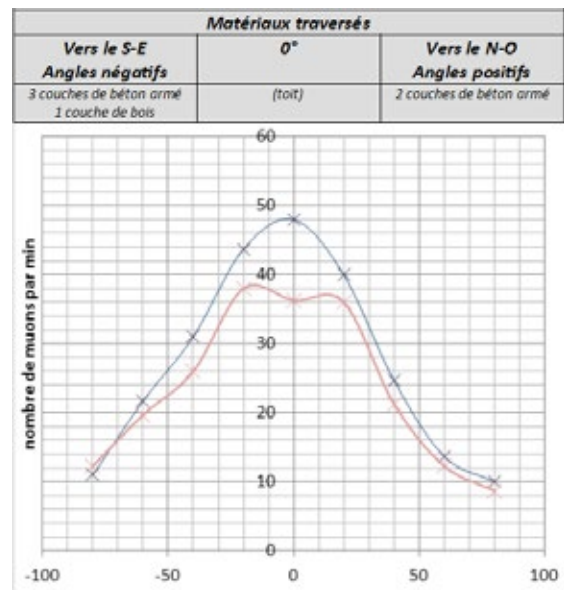
Au 1^{er} étage, dans le bâtiment lycée (5)



Au 2^e étage, dans le bâtiment lycée (6)



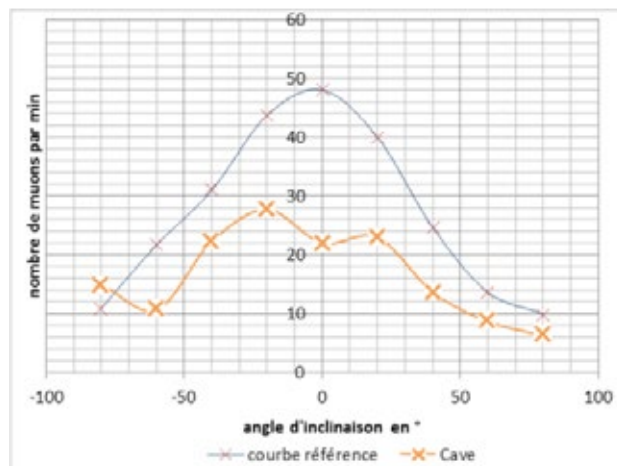
Au 3^e et dernier étage – CDI (7)



Au sous-sol (8)

Réalisée dans la cave, cette mesure sera la dernière expérience réalisée par nos jeunes élèves dans le cadre de cette étude.

Matériaux traversés		
Vers le S-E Angles négatifs (Fondations de l'établissement)	0° 5 couches de brique	Vers le N-O Angles positifs (Bitume de la route)



L'asymétrie observée aux alentours de -25° correspond à des mesures effectuées lorsque l'appareil visait une bouche d'aération donnant directement vers l'extérieur.

Remarque

Les élèves n'ont pas pris en compte les incertitudes. Celles-ci peuvent entacher les mesures effectuées. Toutefois, ce traitement n'était pas encore accessible pour des élèves de ce niveau scolaire.

Exploitation des résultats et réponse à la problématique

On observe dans un premier temps que le nombre de muons est toujours plus faible sur tous les graphiques par rapport à la courbe de référence, réalisée dans un environnement « sans » obstacle. Les mesures les plus faibles sont observées à la cave. Ainsi, plus il a de matière à traverser, plus le flux de muons diminue. Le nombre de couches de matériaux traversés semble donc avoir un impact sur le flux de muons. Il est alors intéressant de vérifier si le nombre de couches d'un même matériau ou si la nature des matériaux ont aussi une influence sur le flux de muons.

Ainsi, on constate que pour un même niveau, comme par exemple pour les trois mesures au rez-de-chaussée (figures 2, 3 et 4), plus le nombre de couches de

béton traversées est important, plus le flux de muons est faible. En comparant les mesures entre le 1^{er} et le 3^e étage (figures 5, 6 et 7), on observe que plus le nombre de couches de béton armé est important, plus le nombre de muons enregistrés est faible.

Il faut toutefois préciser que cette variation est plus significative lorsque l'observation est réalisée au zénith, région où le flux muonique est maximal. Ces observations tendent à montrer que le nombre de couches d'un même matériau a une influence sur le flux de muons.

Par ailleurs, en comparant le même nombre de couches de matériaux au zénith (figures 5 et 8), on constate que le flux de muons est beaucoup plus faible lorsqu'il traverse de la brique que du béton armé. Ce qui tendrait à prouver que la brique a un pouvoir absorbant plus important que le béton armé. Par contre, il semble difficile avec les seules courbes enregistrées de conclure sur le pouvoir absorbant des autres matériaux de l'établissement, à savoir, le béton et le bois.

Enfin, les formes particulières des figures 3 et 8 montrent que le cosmodétecteur est un bon outil pour obtenir une image fidèle de la topographie des lieux.

Pour conclure, cette étude réalisée sur des bâtiments en milieu urbain a permis de montrer que l'épaisseur de matière traversée et la nature des matériaux influence le flux de muons ce qui est en accord avec les études réalisées par les missions scientifiques actuelles.

Elle témoigne aussi de l'intérêt d'un matériel scientifique accessible pour des élèves de lycée, qui par ailleurs ont pu obtenir des résultats exploitables. Cela montre aussi que l'utilisation des muons permet d'explorer de façon non invasive la topographie d'un objet, tel qu'un bâtiment.

■