

Le bulletin de l'APMEP - N° 533

# AU FIL DES MATHS

de la maternelle à l'université...

Édition Juillet, Août, Septembre 2019

**Mathématiques et mouvement**



# APMEP

Association des Professeurs de Mathématiques de l'Enseignement Public

# ASSOCIATION DES PROFESSEURS DE MATHÉMATIQUES DE L'ENSEIGNEMENT PUBLIC

26 rue Duméril, 75013 Paris

Tél. : 01 43 31 34 05 - Fax : 01 42 17 08 77

Courriel : secretariat-apmep@orange.fr - Site : <https://www.apmep.fr>

Présidente d'honneur : Christiane ZEHREN



***Au fil des maths***, c'est aussi une revue numérique augmentée :  
<https://afdm.apmep.fr>

version réservée aux adhérents. Pour y accéder connectez-vous à votre compte via l'onglet *Au fil des maths* (page d'accueil du site) ou via le QRcode, ou suivez les logos .

Si vous désirez rejoindre l'équipe d'*Au fil des maths* ou bien proposer un article, écrivez à [aufildesmaths@apmep.fr](mailto:aufildesmaths@apmep.fr)

Annonces : pour toute demande de publicité, contactez Mireille GÉNIN [mcgenin@wanadoo.fr](mailto:mcgenin@wanadoo.fr)

À ce numéro est jointe la plaquette  
*Visages 2019-2020 de l'APMEP.*

## ÉQUIPE DE RÉDACTION

**Directeur de publication** : Sébastien PLANCHENAUT..

**Responsable coordinateur de l'équipe** : Lise MALRIEU..

**Rédacteurs** : Vincent BECK, Marie-Astrid BÉZARD, François BOUCHER, Richard CABASSUT, Séverine CHASSAGNE-LAMBERT, Frédéric DE LIGT, Mireille GÉNIN, Cécile KERBOUL, Valérie LAROSE, Lise MALRIEU, Jean-Marie MARTIN, Daniel VAGOST, Thomas VILLEMONTAIX, Christine ZELTY..

« **Fils rouges** » **numériques** : Gwenaëlle CLÉMENT, Nada DRAGOVIC, Laure ÉTÉVEZ, Marianne FABRE, Robert FERRÉOL, Adrien GUINEMER, Christophe ROMERO, Jacques VALLOIS..

**Illustrateurs** : Pol LE GALL, Olivier LONGUET, Jean-Sébastien MASSET..

**Équipe TeXnique** : François COUTURIER, Isabelle FLAVIER, Anne HÉAM, François PÉTIARD, Olivier REBOUX, Guillaume SEGUIN, Sébastien SOUCAZE, Michel SUQUET..

**Maquette** : Olivier REBOUX.

**Votre adhésion à l'APMEP vous abonne automatiquement à *Au fil des maths*.**

Pour les établissements, le prix de l'abonnement est de 60 € par an.

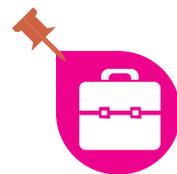
La revue peut être achetée au numéro au prix de 15 € sur la boutique en ligne de l'APMEP.

Mise en page : François PÉTIARD

Dépôt légal : Juillet, Août, Septembre 2019

Impression : Imprimerie Corlet

ZI, rue Maximilien Vox BP 86, 14110 Condé-sur-Noireau ISSN : 2608-9297



# Mesure du flux de muons cosmiques

*Cet article est le compte rendu du travail réalisé dans le cadre d'un projet avec une classe de Première S du lycée Plaine de Neauphle à Trappes, pendant l'année scolaire 2017-2018. Luca Agostino a profité de sa double casquette « maths-physiques » pour proposer un travail interdisciplinaire. Une sympathique rencontre entre des élèves et des muons.*

**Luca Agostino**

Je vous présente d'abord la belle machine que nous avons eu la chance de pouvoir utiliser : le détecteur COSMIX, distribué en Île-de-France par le Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire (LAL).

Ce détecteur a été conçu et réalisé par le Centre d'Études Nucléaires de Bordeaux-Gradignan (CENBG). Il est le résultat d'un projet pédagogique dirigé par Benoît Lott et Denis Dumora. Il est constitué d'une mallette pédagogique contenant un détecteur de muons cosmiques .

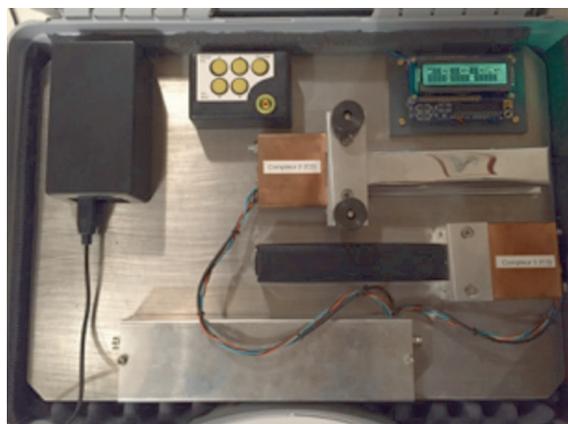


Figure 1. Intérieur de la mallette COSMIX.

En figure 1, on voit l'intérieur de la mallette. Le détecteur est constitué de deux barreaux de scin-

tillateur inorganique en iodure de césium dopé au thallium. L'un des deux barreaux est fixé, l'autre est mobile.

Un écran d'affichage permet d'observer l'évolution du nombre de muons qui traversent le barreau numéro 1 ( $C_1$ ), le barreau numéro 2 ( $C_2$ ) ou le nombre de muons qui traversent les deux barreaux ( $C_1 \cap C_2$ ).

## Présentation du projet

Le projet consiste à analyser le flux de muons cosmiques au lycée, en utilisant le détecteur pour les mesures. En plus des notions mathématiques en jeu, deux axes sont travaillés :

- **Axe interdisciplinaire** : la problématique relevant du domaine de la physique des particules, les élèves ont découvert cette thématique à l'aide d'études documentaires (voir bibliographie page 38) et ont approfondi les notions d'erreur de mesure et de propagation. De plus, une reprise du projet a été réalisée en SVT pour exploiter les mesures dans le cadre de l'impact biologique des particules chargées en comparaison avec celui des rayons UV. Plusieurs élèves ont exploité ce travail en TPE (Travaux Personnels Encadrés) .



- **Axe orientation professionnelle** : ce projet a été l'occasion pour les élèves de se confronter au monde de la recherche. Des échanges avec des chercheurs ainsi que des visites au Palais de la Découverte à Paris  et à des laboratoires universitaires leur ont permis de travailler leur projet d'orientation ou de découvrir ce qu'est un parcours d'études scientifiques après le baccalauréat.

Dans un premier temps, une étude documentaire préliminaire a permis aux élèves de découvrir l'existence des astroparticules et leur origine en tant que produits d'interactions des rayons cosmiques avec les atomes de l'atmosphère.

Ensuite, les élèves ont mesuré les caractéristiques du flux de muons cosmiques à l'aide du détecteur COSMIX, par des méthodes statistiques. La figure 2 montre le nombre de muons par minute détectés dans le lycée, dans les deux barreaux, en fonction du temps (en minutes) et sur une période de 110 minutes. La marge d'erreur (représentée par les segments noirs) correspond à la racine carrée du nombre de muons détectés, cela en accord avec l'écart-type de la distribution de Poisson.

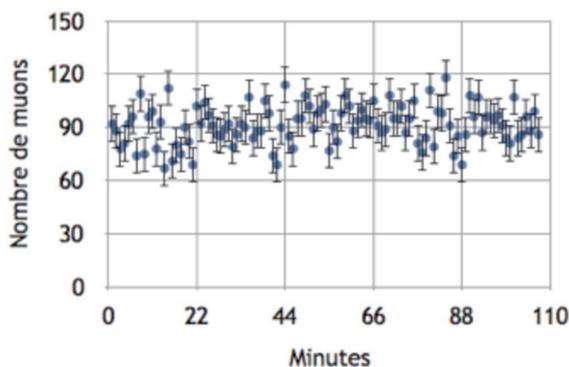


Figure 2. Stabilité du détecteur.

Cette première étude, non détaillée ici, a été suivie d'un « remue-méninges » en classe entière qui a permis d'aborder les notions de variance et d'écart-type en lien avec le chapitre des statistiques en 1<sup>re</sup> et a abouti à de nouvelles questions comme :

- les muons traversent-ils la matière ? Et si oui, quelles sont les conséquences de leur passage ?
- le flux de muons est-il le même selon l'angle d'observation du ciel ?
- ces particules sont-elles dangereuses pour la santé ?

Les élèves ont donc étudié l'atténuation du flux à travers les plafonds de notre lycée, sa distribution angulaire et prolongé leurs recherches en SVT pour comprendre l'impact biologique des particules ionisantes. Cette seconde phase du projet est détaillée dans la suite de l'article.

### Déroulement du projet et organisation des séances

Les séances du projet se sont déroulées sur une heure d'AP (Accompagnement Personnalisé), toutes les deux semaines à partir du mois de septembre et jusqu'au mois d'avril.

Les deux premières séances ont été centrées sur la découverte de la problématique et l'étude documentaire selon un dispositif de classe inversée : le cours avait comme objectif de fixer les points clés des lectures effectuées en amont et de dégager des questionnements qui restaient sans réponse par une approche de « remue-méninges ». Une fois les questions listées et organisées par thématiques, les élèves ont découvert la mallette en observant une prise de données et en essayant d'en comprendre le principe et l'intérêt. Une fois clarifiées les questions à étudier, la classe s'est organisée en groupes avec l'objectif de concevoir des protocoles de mesure et d'analyse. C'est à ce moment que des questions comme « Comment utiliser le détecteur pour qu'il *regarde* dans une direction précise ? » ou « Combien de temps faut-il laisser le détecteur allumé pour avoir un résultat significatif ? » se sont posées.

Que ce soit l'atténuation du nombre des muons ou la distribution angulaire du flux, les groupes ont organisé les tâches de la façon suivante :

- mise en place concrète de la mesure : choix du lieu de positionnement du détecteur, de la durée et du nombre de répétitions, enregistrement des résultats ;



- analyse et représentation des données, calcul des erreurs de mesure ;
- rédaction du compte rendu, présentation à la classe.

Chaque groupe disposait d'un même temps de mesure pour faire ses essais ; les élèves pouvaient se déplacer dans l'établissement et choisir tout lieu de mesure en accord avec leur protocole. Une fois les données récoltées, les élèves avaient comme consigne de les représenter et de les exploiter pour mettre en évidence, si possible, un phénomène qui permettrait de répondre à leurs questions. La totalité de la classe a travaillé au tableur en réalisant soit des histogrammes, soit des nuages de points. Les mesures et l'analyse ont duré quatre mois. À la fin du mois de janvier, une fois le rapport pour le concours CGénial  rédigé, les élèves ont organisé une conférence scientifique : ils avaient comme consigne de penser au programme en invitant des chercheurs en astrophysique, de concevoir l'affiche et de préparer leur propre exposé de 30 minutes en répartissant le temps entre les élèves qui s'étaient spécialisés sur les différents aspects de l'étude. La conférence s'est déroulée au lycée Plaine de Neauphle le 15 mars 2018. Trois astrophysiciens du CNRS sont intervenus à cette occasion pour illustrer leurs recherches et également répondre aux questions des élèves sur l'orientation post-bac. Enfin, le 25 mai 2018, quatre élèves ont participé à la finale du concours CGénial à Toulouse. Le travail a remporté le troisième prix.

## Atténuation du flux de muons cosmiques dans les matériaux

Pour comprendre les caractéristiques du flux de muons cosmiques, la première question que les élèves se sont posée est de savoir si le fait de traverser la matière pouvait avoir un impact sur le flux de muons cosmiques.

Les élèves ont conjecturé que plus il y a de matière à traverser par les particules, moins on

devrait en détecter à cause d'interactions des muons avec les atomes de la matière. Pour valider cette hypothèse, les élèves ont superposé les deux capteurs le plus parallèlement possible en utilisant deux tubes de colle identiques comme dans la figure 3. L'objectif était d'observer si le nombre de muons arrivant perpendiculairement au sol était affecté par le fait de traverser les plafonds du lycée.



Figure 3. Configuration de mesure.

Ainsi, en installant la mallette à chaque étage du lycée, ils ont détecté exclusivement les muons qui traversent les deux capteurs, c'est-à-dire les muons qui ont une direction perpendiculaire au sol et qui sont donc susceptibles de traverser les plafonds.

Cette configuration permet d'éliminer le comptage des muons provenant par les côtés du bâtiment et pour lesquels l'effet de traverser la matière ne dépend pas de l'étage auquel on effectue la mesure. De plus, la mallette a 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. Chaque mesure a duré 140 minutes. Les résultats sont résumés en figure 4, qui montre le nombre de muons cosmiques détectés en fonction du nombre d'étages traversés. L'hypothèse semble donc vérifiée<sup>1</sup>.

1. Un ajustement exponentiel de ces données permettrait de retrouver le coefficient d'atténuation et ainsi le type de matériel qui constitue les plafonds. Cette étude n'a pas pu être réalisée car la fonction exponentielle n'était pas au programme de la classe.

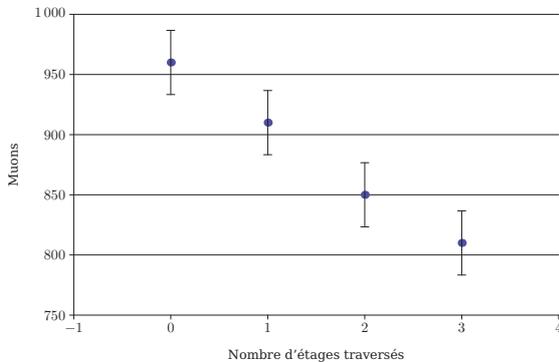


Figure 4. Nombre de muons détectés par étage.

Parmi les nombreuses applications de ce phénomène, on peut citer des travaux en archéologie [1] et en volcanologie [2].

## Distribution angulaire du flux de muons cosmiques

Pour répondre à la question « Le nombre de muons varie-t-il en fonction de la direction d'observation ? », les élèves ont réfléchi à un protocole expérimental pour déterminer la distribution angulaire du flux des muons cosmiques.

Ils ont décidé de surélever un des deux barreaux du détecteur de muons à l'aide de deux tubes de colle. En mesurant avec un rapporteur, ils ont fixé le barreau mobile pour que la direction d'incidence des muons détectés par les deux barreaux forme l'angle  $\theta$  souhaité pour effectuer la mesure.

Plusieurs configurations de détection ont ainsi été réalisées comme illustré en figure 5 : 0°, 35°, 60° et 90°.

Pour chaque inclinaison, le nombre de muons qui traversaient les deux détecteurs à l'aide du compteur  $C_1 \cap C_2$  a été mesuré pendant 10 minutes.

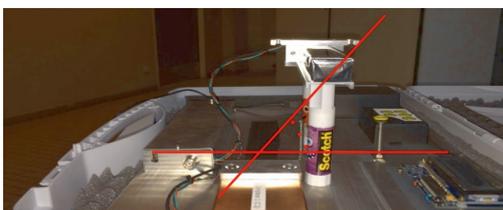


Figure 5. Configuration de mesure.

La figure 6 montre le nombre de muons détectés en fonction de l'angle d'inclinaison.

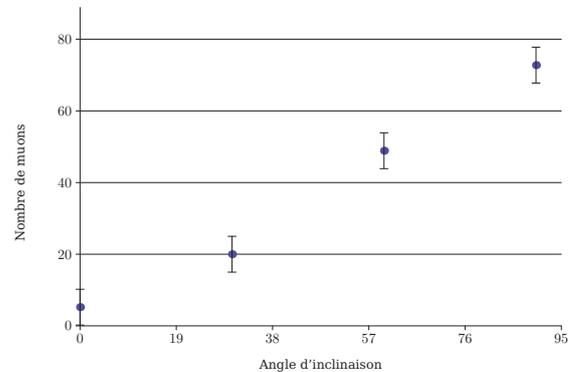


Figure 6. Distribution angulaire des muons cosmiques.

On peut donc conclure que le nombre de muons dépend de la direction d'observation. En effet, les muons parcourent un chemin plus ou moins long dans l'atmosphère selon l'angle qu'on considère. 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°.

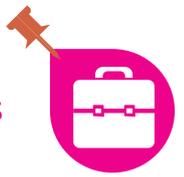
En traversant l'atmosphère, les muons interagissent avec les molécules et ils peuvent ainsi être arrêtés.

## Conclusion et perspectives scientifiques

L'atténuation du flux de muons à travers les plafonds du lycée a été observée : les muons interagissant avec la matière sont arrêtés, ainsi le flux dépend de l'épaisseur de matière traversée. Un ajustement exponentiel de ces données permettrait d'avoir plus de renseignements sur les matériaux traversés, cette étude pourra être réalisée en classe de Terminale une fois que la fonction exponentielle sera introduite.

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.

De plus, les applications en SVT, non détaillées dans cet article, ont permis aux élèves de comparer les effets biologiques de ce flux avec ceux



dus au flux de photons UV... et cela, en utilisant leurs propres résultats<sup>2</sup>.

## Implication, réactions et difficultés des élèves, posture de l'enseignant

La plupart des élèves ont adhéré au projet dès le début, malgré un premier moment d'étonnement par rapport à l'extrême autonomie et à la responsabilité qui leur étaient demandées. Je considère que cet aspect de la démarche demeure le plus problématique mais aussi le plus rentable. Mon rôle d'enseignant a été centré sur un travail de motivation et d'accompagnement des mesures et des analyses, plutôt que sur un apport de connaissances.

La peur de se tromper dans la démarche ou de réaliser une mesure inutile a constitué un véritable frein pour un certain nombre d'élèves.

L'atténuation du flux de muons cosmiques, par exemple, n'a été observée qu'après de nombreuses mesures, une fois compris qu'il fallait un autre type de configuration de mesure pour se débarrasser du « bruit de fond ». Le sentiment de frustration de se dire « on ne sait pas où on va » a permis de faire vivre une réelle expérience de l'approche scientifique de la recherche par tentatives (la plupart du temps infructueuses), et ainsi de développer chez les élèves une vision des métiers liés aux études scientifiques post-bac qui n'avait peut-être pas été considérée. Dans ce contexte, mon rôle d'enseignant a été double : d'un côté je devais être parfaitement au clair avec ce qu'on pouvait obtenir ou pas avec l'instrument de mesure ; d'un autre côté, je devais, avec les élèves, me placer comme quelqu'un qui découvre en classe, au même titre que les élèves, pour ne pas donner une direction *a priori* aux recherches ni être tenté de répondre autre chose que « Je ne sais pas, essaie ! » à la plupart des questions qu'ils me posaient.



2. Pour plus de détails [fanny.untersinger@ac-versailles.fr](mailto:fanny.untersinger@ac-versailles.fr).



J'ai cherché à avoir une posture de directeur de travaux : les séances ont été organisées en amont en prévoyant le temps consacré à la mesure, le nombre de groupes, les salles adaptées, et en fournissant un travail conséquent de documentation. Le lien avec le programme de mathématiques, qui n'était pas forcément visible en début de projet, s'est clarifié pour les élèves quand ils ont dû d'eux-mêmes utiliser les notions de moyenne et d'écart-type d'une série statistique (première partie de l'étude). Ce qui est formateur dans cette démarche, c'est que l'enseignant construit son cours à partir d'une expérience concrète, sans annoncer le thème mathématique et en faisant ressentir aux élèves le besoin des connaissances et compétences mobilisées. Dans ce sens, l'objectif principal du projet est purement méthodologique : l'obtention de résultats exploitables est un beau couronnement du travail mais ce n'est en aucun cas la composante la plus riche du projet qui reste la mise en pratique d'une démarche de recherche et modélisation d'un phénomène.

## Références

- [1] Sébastien Procureur. *Muographie d'une pyramide*.
- [2] Sandra Méallier. *Un volcan sous la surveillance des muons...*
- [3] N. Arnaud et al. *Passeport pour les deux infinis*. Dunod, janvier 2010.
- [4] N. Arnaud et al. *Élémentaire - revue scientifique numéro 3*. Élémentaire, 2006.
- [5] Claire Bonnoit-Chevalier et Jean-Christophe Pelhate. *Cahier Pédagogique « COSMO à l'École »*.
- [6] Alessandro de Angelis. *Penetrating Radiation at Surface and in Water*. rXiv :1002.1810v2.
- [7] Benoît Lott et Denis Dumora. *La mallette COSMIX : un détecteur pédagogique de rayons cosmiques portable*. 2015.



Luca Agostino, docteur en physique des particules à l'Université Paris Diderot (2014), est professeur de mathématiques au lycée Plaine de Neauphle à Trappes (académie de Versailles).

© APMEP Septembre 2019

Journées nationales de l'APMEP

# La Saveur des Mathématiques

De la maternelle à l'université



les 19-20-21-22 octobre 2019

**DIJON**

infos: [www.apmep.fr](http://www.apmep.fr)

# Sommaire du n° 533

## Mathématiques et mouvement

### Éditorial

### Opinions

Des pistes pour sortir de la crise de l'enseignement des sciences — Gilles Dowek 3

Les labos de maths — Valérie Larose 6

L'Observatoire EVAPM, une aventure de l'APMEP — Antoine Bodin 8

### Avec les élèves

Mouvement mathématique en Bretagne — Claudie Asselain-Missenard 16

Coup de cœur pour une appli — Isabelle Audra 21

Sprint! — Romain Estampes 23

Histoire de ~~boîtes~~ Boole — Agnès Veyron 27

Mesure du flux de muons cosmiques — Luca Agostino 33

Les 6<sup>e</sup> ne manquent pas d'aire! — Anne Dusson & Nathalie Lecouturier 39

Algorithmique débranchée — Cyrille Kirch & Olivier Jutand (groupe Lycée de l'IREM de Poitiers) 43

### 1 Ouvertures

52

Mat'les ressources : un journal pour des ressources — Vincent Bansaye, Alain Camanes & Daphné Giorgi 52

Le transport optimal numérique — Gabriel Peyré 55

Sauver Walu, une aventure! — Dominique Cambrésy 65

Variations autour d'une formule — Attila Máder & Zoltán Matos 69

Mathématiques du jonglage — Vincent Pantaloni 74

### Récréations

83

Au fil des problèmes — Frédéric de Ligt 83

La coupe du monde de rugby — Michel Soufflet 85

### Au fil du temps

88

Matériaux pour une documentation 88

Anniversaires — Dominique Cambrésy 94



CultureMATH



APMEP

www.apmep.fr