

Tomographie muonique

Utilisation des muons cosmiques en géologie

Chloé Mayoraz
Gymnase français de Bienne
mayorazchloe@gmail.com

L'expérience dont il est question dans cet article a été menée dans le cadre de mon travail de maturité pour le gymnase français de Bienne sous la supervision de M. Aurousseau. Celle-ci a été conduite à l'université de Berne, sous la supervision du Dr. Nishiyama, entre avril et août 2018. Mon projet a consisté en une tomographie muonique d'un conduit d'ascenseur menant à un sous-sol. J'ai pu participer à l'entièreté de l'expérience : de la fabrication des détecteurs à l'analyse des données.

Une tomographie muonique consiste en la détection et l'analyse d'un flux de muons (μ) ayant traversé un objet/milieu. Ces particules secondaires¹ des rayons cosmiques (voir figure 1) arrivent partout sur terre à raison d'environ 1 muon/minute/cm². Elles sont très pénétrantes et l'intensité de leur flux diminue de façon linéaire avec la quantité de matière, de densité constante, qu'elles traversent. Une tomographie muonique reprend donc un principe d'imagerie similaire à celui de la radiographie : un flux plus important sera mesuré pour les zones traversées de plus faible densité (ex. cavité). L'utilisation des muons à l'avantage de permettre l'étude de beaucoup plus gros volume (ex. montagnes) que l'analyse par rayons X. Elles sont facilement détectables et relativement bien connues, ce qui permet des simulations informatiques des expériences.

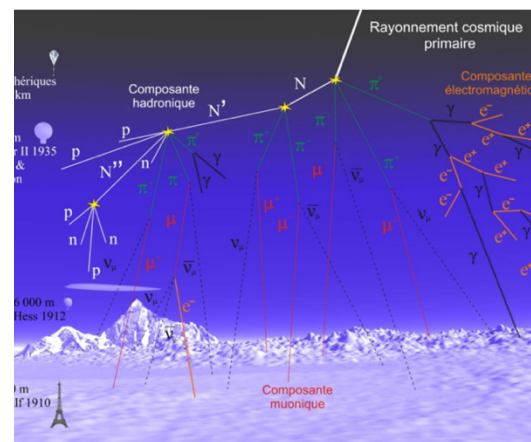


Figure 1 : Gerbe cosmique, [2]

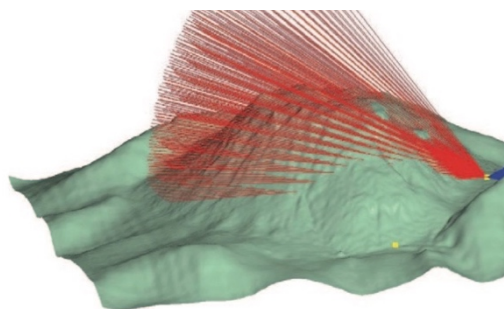


Figure 2 : Principe de la tomographie muonique, [1]

Cette technique date des années 50, mais a été récemment améliorée grâce à l'expérience Scan Pyramid (voir [1]), les recherches faites sur le volcan de La Soufrière en Guadeloupe (voir [2]) et sur le glacier de la Jungfrau (voir [3]). Dans le premier cas, cette technique a permis de découvrir une chambre secrète dans la pyramide de Khéops et, dans le second de mieux comprendre le conduit du volcan ainsi que sa dégradation afin d'aider à prévenir de potentiels accidents. Dans le dernier cas, l'université de Berne a tenté d'imager la forme du lit rocheux au-dessous du glacier de la Jungfrau afin de comprendre les mécanismes d'érosion dus à la fonte des glaces et de prévenir des catastrophes.

Mon expérience est une version simplifiée de la tomographie muonique d'une montagne. En effet, la durée nécessaire de l'expérience et les moyens nécessaires étaient trop importants pour moi. Afin de rendre l'expérience plus accessible, nous avons analysé le flux de muons ayant traversé le conduit d'un ascenseur descendant à un laboratoire sous-terrain de l'université de Berne.

¹ Particules après interaction

L'expérience se composait de 4 sites de détection : un premier en surface et trois au sous-sol.

Nous avons 3 buts principaux : Dans un premier temps, calculer le facteur de proportionnalité entre le flux de muons arrivant au détecteur en surface et le détecteur 4, à savoir le plus éloigné du conduit, soit le moins soumis à son influence. Dans un second temps, essayer de détecter une anomalie de densité dans nos résultats, et, en déduire les dimensions du conduit. Dans un troisième temps, elle devait, pour ma part, me permettre de mieux comprendre la méthode de l'expérience et me permettre de l'effectuer dans son entièreté : de la fabrication des détecteurs à l'analyse des données, afin de pouvoir appliquer fictivement cette méthode à plus grande échelle.

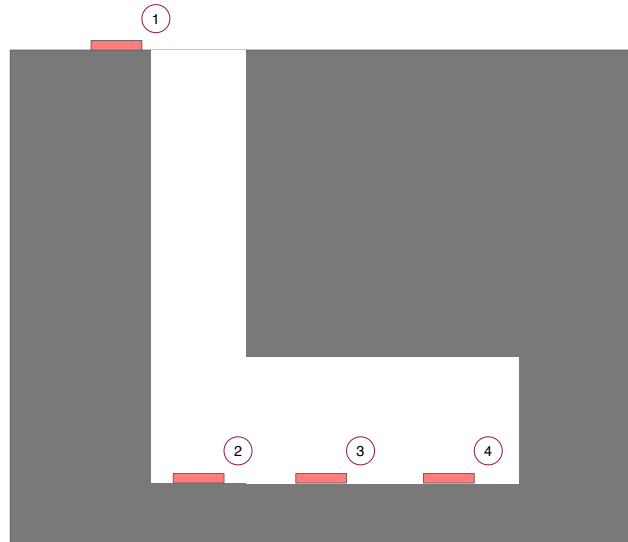


Figure 3 : Schéma de l'expérience

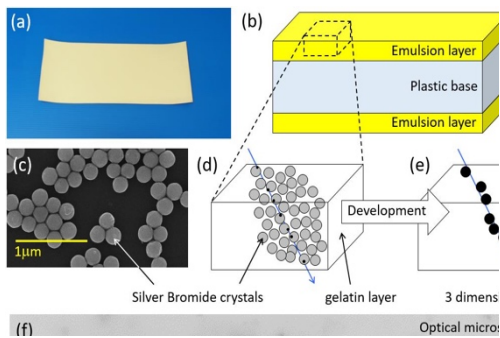


Figure 4 : Principe de fonctionnement d'un détecteur à émulsion, [4]

La fabrication des détecteurs se fait dans une chambre noire. On fixe tout d'abord, sur des tables chauffantes, une feuille de plastique de 200µm. On y déverse ensuite un mélange de gélatine et de sels de bromure d'argent jusqu'à obtenir une épaisseur d'environ 50µm. Après avoir laissé durcir cette première couche durant environ deux heures, on retire les feuilles des tables et on les laisse sécher deux jours avant de réitérer le processus de l'autre côté de la feuille de plastique. Les feuilles sont alors découpées et placées dans des enveloppes non sensibles à la lumière afin que les émulsions ne réagissent pas avec les photons.

Dans le cas de notre expérience, nous avons, pour chaque site de détection, un empilement de 4 émulsions, afin de pouvoir recréer les traces des particules, réparties dans 2 enveloppes, de manière à différencier les muons les ayant traversés durant la durée de pose de ceux les ayant traversés durant le stockage.

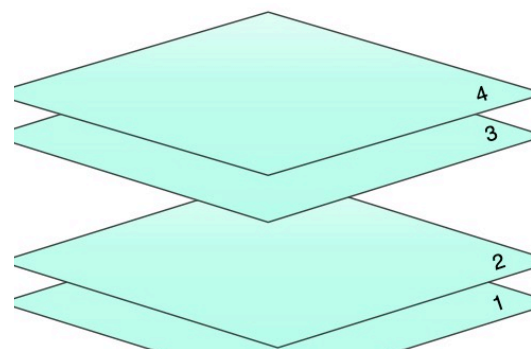


Figure 5 : Empilement des émulsions

Elles ont été coupées aux dimensions 12.5 x 9.5 cm, annotées selon leur emplacement et numérotées, comme illustré sur le schéma précédent, afin de pouvoir mettre en coïncidence leurs résultats.

Les paquets ont été placés dans des presses qui garantissaient leur stabilité. La durée de pose des émulsions a été d'environ deux semaines, après quoi nous les avons extraites et développées.

Le développement se fait lui aussi dans une chambre noire. Les détecteurs sont trempés dans trois bains consécutifs : un développeur, un stoppeur et un fixeur. Les émulsions, devenues transparentes, ont été scannées par des microscopes et leurs données ont été reconstruites par des logiciels. Nous n'avons scanné qu'une surface de 3cm x 3cm de chacune des émulsions pour des raisons de temps. Les données de l'un de nos détecteurs sous-terrain n'ont pas pu être correctement reconstruites car les enveloppes contenant les émulsions étaient pleines d'air.

Afin d'analyser les données, nous avons utilisé le logiciel ROOT. Nous avons sélectionné nos données selon deux critères : le nombre d'émulsions traversées par la particule et le nombre de grains d'argent ionisés. Ces deux coupures nous ont permis de garantir que les traces de particules sélectionnées soient bien celles de muons.

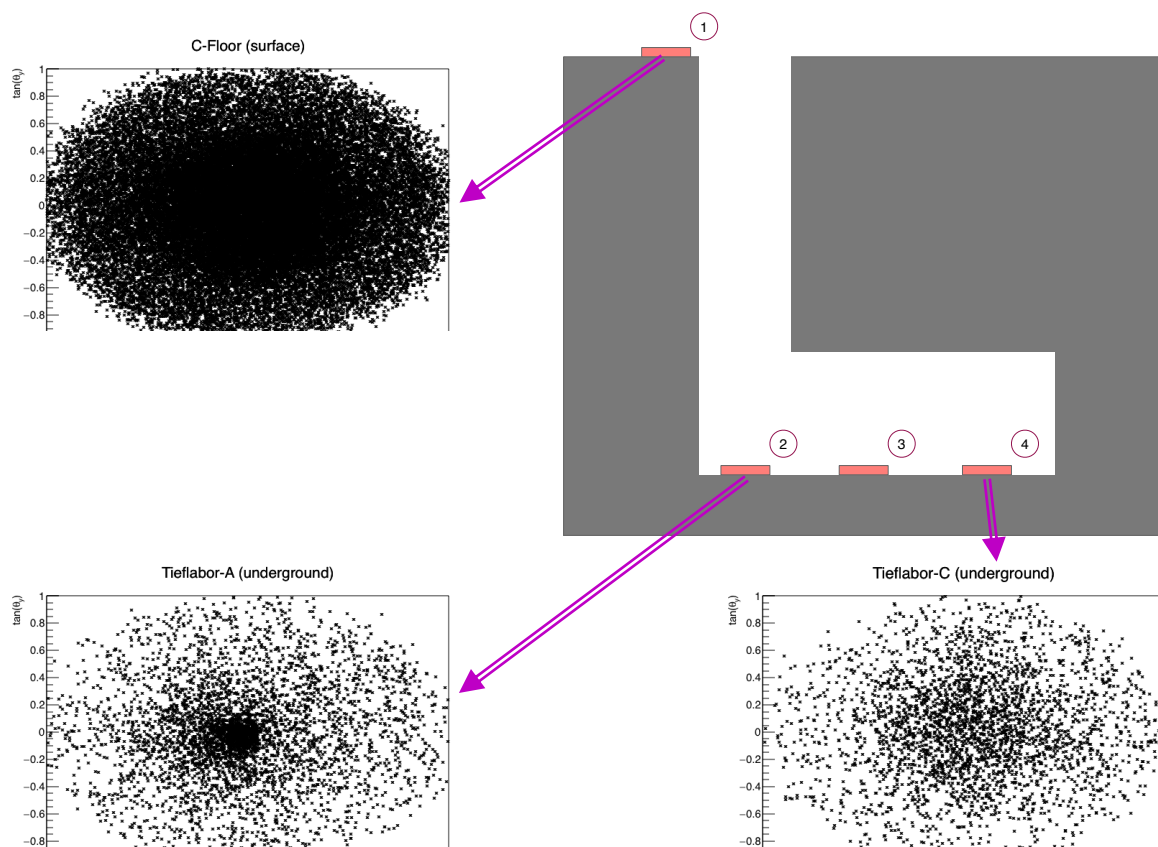


Figure 6 : Graphiques en nuage de points représentant le nombre de muons en fonction de la tangente de l'angle d'incidence sur X et Y pour les 3 détecteurs efficaces selon leur emplacement dans l'expérience

Grâce à ces graphiques de la distribution du nombre de muons selon la tangente de l'angle d'incidence (voir figure 6), nous avons remarqué que le détecteur en surface a reçu un grand nombre de muons provenant de toutes les directions. Le détecteur au sous-sol, non soumis à l'influence du conduit de l'ascenseur a, quant à lui, reçu peu de muons mais provenant aussi de toutes les directions. Nous observons donc bien un facteur d'atténuation entre ces deux flux.

Nous avons fait une simulation théorique de ce facteur avec l'aide de l'application *muon flux calculator*. Celle-ci prend en compte quatre variables : l'angle au zénith, l'opacité, la taille du détecteur et l'angle solide. Le facteur simulé d'atténuation vaut 15.03 ± 1.32 . En divisant le flux de muons du détecteur en surface par celui reçu par le détecteur sous-terrain nous avons mesuré un facteur de 12.31 pour les

angles d'incidences sur x et 12.97 pour les angles d'incidences sur y. Nous ne prenons en compte que les valeurs d'angle entre -22.5° et 22.5° car c'est pour cette portion d'angle que les détecteurs

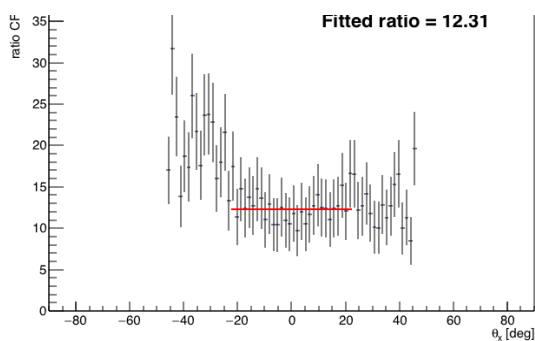


Figure 7 : Graphique du rapport entre la distribution du nombre de traces reconstruites selon θ_x pour le détecteur en surface et un détecteur sous-terrain

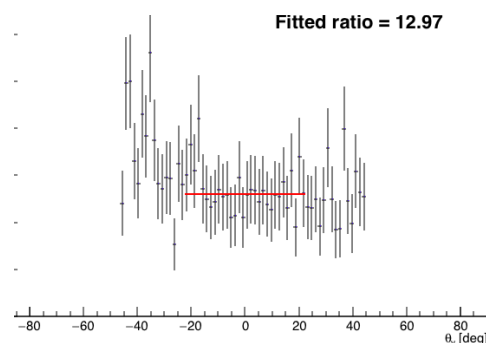


Figure 8 : Graphique du rapport entre la distribution du nombre de traces reconstruites selon θ_y pour le détecteur en surface et un détecteur sous-terrain

reconstruisent efficacement les traces des particules (voir trait rouge sur les figures 7 et 8). Cette différence entre l'axe de x et y est due au fait que le conduit n'a pas une base carrée mais rectangulaire.

Dans la figure 6, nous remarquons que le détecteur 2 reçoit un surplus de particules en son centre comparé au détecteur 4. Cette anomalie est due à la présence du conduit : un grand nombre de muons verticaux vont traverser le conduit sans déperdition.

Afin de connaître les dimensions de l'ascenseur, nous avons analysé les graphiques de la distribution du nombre de muons selon la tangente de l'angle d'incidence pour chaque axe, et approximé la hauteur du conduit à (30 ± 5) m.

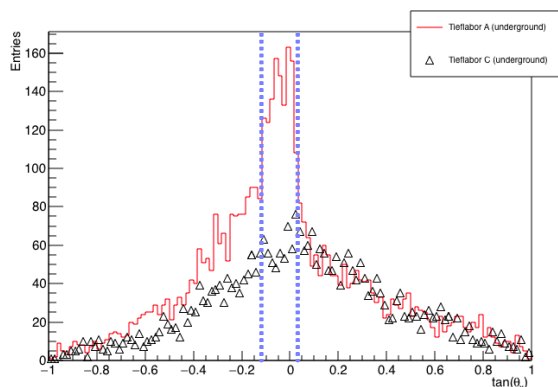


Figure 9 : Graphique de la répartition des muons selon la tangente de l'angle d'incidence pour les détecteurs 2 et 4 et l'axe des X

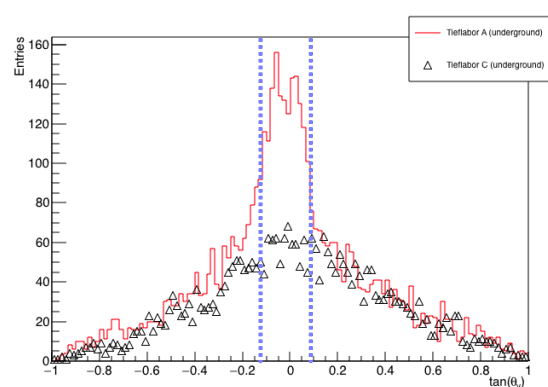


Figure 10 : Graphique de la répartition des muons selon la tangente de l'angle d'incidence pour les détecteurs 2 et 4 et l'axe des Y

Quelques calculs de trigonométrie nous ont permis de trouver une longueur (figure 9) de (4.47 ± 1.24) m. L'erreur relative est de 19.20% par rapport à la longueur mesurée : (3.75 ± 0.10) m. Pour la largeur (figure 10), nous avons calculé (5.94 ± 1.47) m. L'erreur relative par rapport à la valeur mesurée, (4.35 ± 0.10) m, est de 36.55%.

Nous voyons ici que les courbes des flux de particules des détecteur 4 et 2 se superposent, le pic passé. Nous pouvons en déduire que données du détecteur 4 ne sont autre que le bruit de fond par rapport au signal : c'est le nombre de muons que devrait recevoir un détecteur enterré à cette profondeur et sous ces matériaux, s'il n'y avait aucune anomalie de densité au-dessus de lui.

Malgré le fait que cette expérience a été soumise à un grand nombre d'approximations et de contraintes diverses, les résultats de l'expérience se trouvent dans un ordre de grandeur significatif, ce qui confirme la précision de la méthode. Nous aurions pu apporter de nombreuses améliorations à l'expérience : augmenter le temps de pose, scanner une plus grande surface des émulsions, mieux centrer les détecteurs. Ces mesures nous auraient permis de faire des coupures plus précises et avoir un signal plus clair. Au niveau de la simulation théorique, nous pourrions améliorer l'approximation de la densité, la mesure de l'angle solide, la mesure de la hauteur du conduit et calculer le nombre de muons pour la durée exacte de l'expérience. De plus, nous avons considéré que la densité de la roche/terre est constante, ce qui n'est pas le cas.

L'utilisation d'émulsions comme moyen de détection a l'avantage que l'expérience peut être menée partout : les détecteurs n'ont pas besoin d'alimentation électrique, sont facilement transportables et les traces ne s'effacent pas.

L'un des inconvénients de cette technique est cependant, que les émulsions, une fois préparées, doivent être stockées dans des enveloppes bloquant la lumière et utilisées rapidement afin d'éviter les traces inutiles. De plus, elles ne nous permettent pas de connaître le moment d'arrivée de la particule et l'analyse des traces est fastidieuse : de gros microscopes et des logiciels sont nécessaires pour être efficaces.

La tomographie muonique est une méthode particulièrement pertinente car elle permet d'analyser de très gros volumes contrairement aux technologies traditionnelles utilisées en géologie (gravimétrie). L'application de la tomographie muonique a déjà fait ses preuves en volcanologie (La Soufrière) et en archéologie (Scan Pyramid). Elle pourrait être utilisée dans les montagnes jurassiennes/neuchâteloises afin de mieux comprendre certains réseaux de grottes ou de situer des nappes phréatiques.

Je tiens à remercier l'équipe des chercheurs du laboratoire des hautes énergies de l'université de Berne qui ont mis à ma disposition leurs connaissances et les ressources matérielles nécessaires au bon déroulement de mon expérience.

Un grand merci aussi à mon mentor, M. Arousseau pour son aide et son soutien.

Bibliographie

- [1] K. M.-B. a. J. M. D. Gilbert, «Radiographier les volcans avec les rayons cosmiques,» *Reflète de la physique*, vol. 32, janvier 2013.
- [2] C. Lagoute, «Qu'est-ce que le rayonnement cosmique?,» 3 juillet 2010. [En ligne]. Available: <http://ch.lagoute.free.fr/CosmoDCL/RCCosmoDCL.pdf>. [Accès le mars 2019].
- [3] A. Ariga, T. Ariga, A. Ereditato, S. Käser, A. Lechmann, D. Mair, R. Nishiyama, C. Pistillo, P. Scampoli, F. Schlunegger et M. Vladymyrov, «A Nuclear Emulsion Detector for the Muon Radiography of a Glacier Structure,» *Instrument*, 2018.
- [4] N. U. K. Morishima, «Measurement of Cosmic-rays with Nuclear Emulsion inside Egyptian Pyramids,» 2017. [En ligne]. Available: https://indico.cern.ch/event/559983/contributions/2344426/attachments/1382377/2102176/pyramids_morishima.pdf. [Accès le mars 2019].