

MicroCosmos

Partie 1 : un détecteur de particules à base d'Arduino⁽¹⁾

par Cédric VANDEN DRIESSCHE

Lycée Charles de Gaulle - 14000 Caen

cedric.vanden-driessche@ac-normandie.fr

LES THÈMES liés à l'atome et à la radioactivité sont aujourd'hui étudiés en lycée presque exclusivement à l'aide d'activités documentaires. Il s'agit dans cet article de réinvestir le champ expérimental en s'appuyant sur la popularisation des microcontrôleurs Arduino. L'objectif est de proposer deux montages basés sur des tubes Geiger-Müller accompagnés des programmes nécessaires à leur utilisation. Le premier montage est destiné à une étude de la radioactivité naturelle. Le suivant nécessite un deuxième tube Geiger-Müller et permet l'étude des rayons cosmiques. Les programmes proposés sont intégralement disponibles au téléchargement sur le site de l'UdPPC.

INTRODUCTION

Les thèmes qui traitent de l'atome ou du nucléaire sont des parties du programme de lycée dans lesquelles il n'est pas aisé de pouvoir réaliser des expériences. Ces thématiques sont pourtant très riches pédagogiquement et peuvent s'avérer extrêmement motivantes pour les élèves en introduisant des exemples de physique moderne. La démocratisation des microcontrôleurs de type Arduino et des détecteurs associés, en ce qui nous concerne un compteur Geiger, nous offre l'opportunité de pallier à ce manque.

Le coût de ce type de matériel est en effet relativement raisonnable. Par contre, les bibliothèques logicielles fournies ne sont pas toujours adaptées aux objectifs de travaux pratiques en lycée. Les tubes Geiger-Müller permettant à tout un chacun de réaliser ses propres mesures de radioactivité avec Arduino sont fournis avec des programmes ou bibliothèques rendant les choses très faciles d'accès au premier abord. Cependant, comme nous manquons de renseignements quant aux données fournies par ces appareils, cela rend les analyses et l'utilisation en classe difficiles.

Le premier objectif était de réécrire un programme qui permettrait de faire de ce tube Geiger-Müller un instrument de mesure de la radioactivité naturelle en travaux pratiques. Une fois ce travail réalisé, il était tentant d'associer deux tubes Geiger-

(1) **NDLR** : la partie 2 de cet article paraîtra dans *Le Bup* n° 1069 en décembre 2024.

Müller afin de construire un détecteur de rayons cosmiques. En effet, ayant la chance de pouvoir travailler avec un détecteur de rayons cosmiques (le cosmodétecteur) grâce au soutien de Sciences à l'École, je me suis intéressé à l'histoire de la découverte de ce phénomène. Or si aujourd'hui la physique des particules utilise plutôt des scintillateurs, des chambres multifils et autres détecteurs, le compteur Geiger-Müller a été pendant longtemps, avec la chambre à brouillard, l'un des outils principaux de la recherche sur les particules élémentaires. Suivre la trace de ces découvertes a été d'une grande motivation.

Ce travail se décompose en deux parties :

- ◆ un seul compteur Geiger-Müller accompagné d'un programme pour Arduino (complété d'un programme en *Python*) afin d'étudier la radioactivité naturelle ;
- ◆ un assemblage constitué de deux compteurs Geiger-Müller accompagné d'un programme Arduino : le MicroCosmos ou [μ -Cosmos] (en référence au cosmodétecteur proposé par Sciences à l'École ainsi qu'au muon (μ)).

1. HISTORIQUE

En 1912, alors qu'il travaillait dans le laboratoire de Ernest Rutherford, Hans Geiger avait collaboré à l'élaboration d'un appareil de comptage des particules alpha nommé «compteur à pointe». Il s'agissait d'un fil conducteur terminé en pointe et porté à un haut potentiel dans une boîte en métal. Le passage d'une particule ionisante déclenchait une brutale décharge mesurée à l'aide d'un électroscope. En 1929, Hans Geiger, aidé de l'un de ses étudiants Walther Müller, proposa une version améliorée de cet appareil que l'on nomme depuis un compteur Geiger-Müller (cf. figure 1).

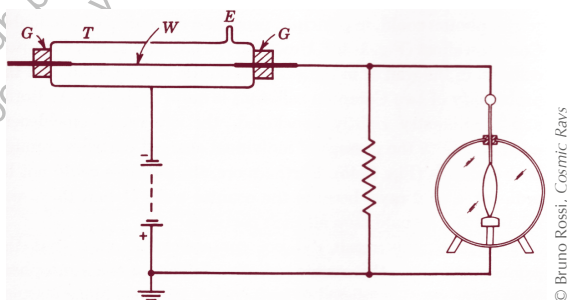


Figure 1 - Compteur Geiger-Müller et électroscope.

Le compteur Geiger-Müller est un détecteur qui a beaucoup été utilisé dans l'étude de la radioactivité naturelle.

Les compteurs Geiger-Müller se déclenchent parfois spontanément. Or en 1912,

Victor Hess avait mis en évidence l'existence de rayons cosmiques lors d'expériences menées en montgolfières. Il avait ainsi apporté une réponse à la décharge spontanée des électroscopes qui restait un mystère depuis de nombreuses années. Néanmoins, les appareils disponibles à l'époque ne permettaient pas une analyse plus poussée de ces rayons et leur nature faisait encore débat.

En 1929, Walther Bothe et Werner Kohlhörster notèrent que deux compteurs pouvaient réagir simultanément, et ce d'autant plus qu'ils étaient plus proches. Werner Kohlhörster avait confirmé et amélioré les résultats de Victor Hess, et les rayons cosmiques étaient *a priori* de bons candidats pour expliquer ce phénomène. Ils utilisèrent alors la méthode de coïncidence, mettant deux tubes l'un à côté de l'autre et cherchant les signaux simultanés. Leur hypothèse était que cela se produisait lorsqu'une même particule chargée traversait les deux tubes l'un après l'autre à une vitesse proche de celle de la lumière. Pour trouver les coïncidences, ils prenaient des séries de photos qu'ils analysaient ensuite. Le nombre maximal de coïncidences se produisant lorsque les deux tubes étaient alignés verticalement l'un au-dessus de l'autre, cela confirmait l'origine cosmique de ces particules.

À la lecture des publications de Walther Bothe et Werner Kohlhörster, un jeune étudiant italien de 24 ans, Bruno Rossi, décida de poursuivre leur travail. Il améliora la manipulation en introduisant un circuit électronique de coïncidence (cf. figure 2). Il proposa un circuit comportant des tubes à vide (ou « circuit à lampe », ancêtre du transistor) connectés aux compteurs Geiger-Müller, qui ne délivrait un signal que si les deux tubes étaient polarisés en même temps par les deux compteurs Geiger-Müller. Il s'agit de l'ancêtre de la fonction logique et couramment utilisée aujourd'hui. Ce premier circuit avait une résolution temporelle de 1 ms.

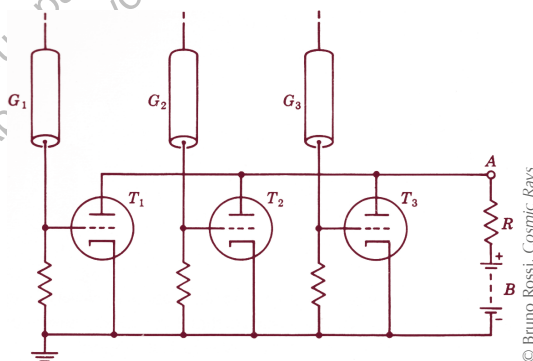


Figure 2 - Circuit triple coïncidence de Bruno Rossi.

De nombreuses améliorations ont été apportées par la suite (géométrie, matériaux utilisés, électronique, informatique...), mais le principe de base est resté le même.

2. ÉTUDE DE LA RADIOACTIVITÉ NATURELLE À L'AIDE D'UN SEUL COMPTEUR GEIGER-MÜLLER

2.1. Le compteur Geiger

Un compteur Geiger est constitué d'un tube rempli d'un gaz rare dans lequel deux électrodes imposent un champ haute tension. Le passage d'une particule chargée va ioniser les atomes du gaz. Grâce au champ haute-tension, les électrons ainsi arrachés vont eux-mêmes ioniser d'autres atomes.

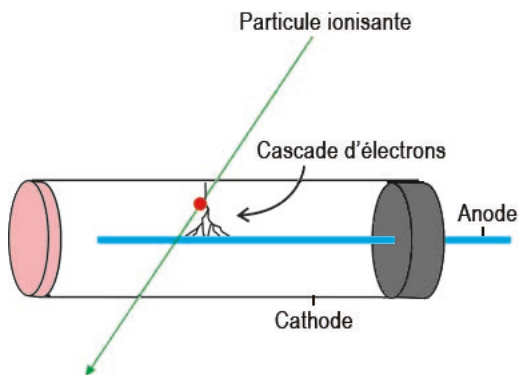


Figure 3 - Passage d'une particule ionisante dans le compteur Geiger.

Certains compteurs Geiger possèdent une fenêtre fine en mica pour laisser passer les particules alpha. Mais la plupart des compteurs simples ne peuvent mesurer que les rayonnements bêta, gamma et les rayons cosmiques, car ces particules sont capables de traverser le tube en verre du compteur Geiger.

2.2. Le compteur Geiger Gravity DF-Robot

Ce compteur a été choisi, car il est fourni « prêt à l'emploi » et est peu onéreux (70 € environ). La haute tension et la mise en forme du signal sont déjà prises en charge et il est proposé avec un câblage qui moyennant un Shield⁽²⁾ à ajouter à l'Arduino (cf. figure 4, page ci-contre) permet un branchement direct.

À la sortie du tube Geiger, lors du passage d'une particule, nous récupérerons directement sur l'oscilloscope un pulse rectangulaire de largeur temporelle égale à environ 200 μ s et d'amplitude 5 V. La tension est à 5 V et passe à 0 V durant le pulse. On peut le brancher directement sur l'Arduino et récupérer ce signal.

(2) Il s'agit d'une petite carte dont les connecteurs peuvent se brancher directement sur l'Arduino et qui permet de faciliter le branchement d'autres périphériques tel que le compteur Geiger par exemple.

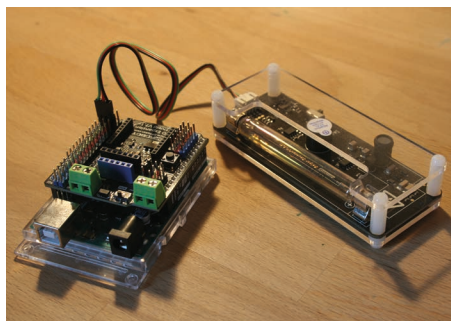


Figure 4 - Le montage Arduino + Shield + compteur Geiger.

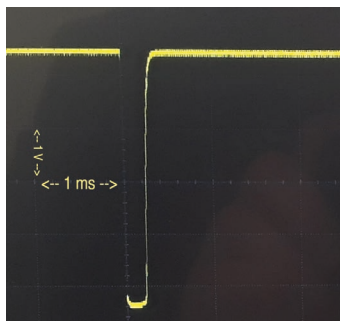


Figure 5 - Pulse à la sortie du compteur Geiger-Müller.

2.3. Le programme *MicroCosmosRadioactivite.ino*

Le programme fourni à l'achat permet d'obtenir des comptages mais sans qu'il soit facilement possible de comprendre ce qu'il compte vraiment. Cela le rend difficile à utiliser par les élèves.

Nous obtenons deux résultats : des coups par minutes⁽³⁾ et des millisieverts. Mais nous ne savons pas sur quelle durée est prise la mesure. Après une analyse un peu fastidieuse du code de la bibliothèque fournie, il s'avère qu'elle fournit une sorte de moyenne glissante sur les dix dernières mesures extrapolée à une minute. Le résultat en millisievert est obtenu en divisant les coups par minute par 151. Il y a probablement une justification pour ces calculs, mais de mon point de vue cela complique les choses quant à l'usage du compteur avec des élèves et je souhaitais quelque chose de plus direct et de plus transparent.

Le programme *MicroCosmosRadioactivite.ino* est très simple. Il donne en continu les impulsions comptées pendant une durée définie (par défaut dix secondes) ainsi que le temps écoulé depuis le début de l'expérience. Ce programme comme tous les programmes proposés dans cet article sont disponibles en téléchargement sur le site de l'UdPPC.

Le programme comporte deux parties :

- ◆ une interruption qui est une routine qui ne s'exécute que lorsqu'un certain événement est détecté. Ici, c'est la détection

```
void GeigerISR(){
    Impulsion++;
}
```

- (3) Il s'agit du nombre de particules ayant traversé le détecteur en une minute. En première approche, il n'est pas possible de discriminer directement le rayonnement entrant. On détecte des particules ionisantes : bêta, rayons cosmiques ou l'électron de recul provoqué par la diffusion par effet Compton d'un photon gamma avec la paroi du tube. Les alpha ne traversent pas la paroi du tube et ne sont donc pas détectés.

d'un front descendant qui va incrémenter la variable *impulsion* ;

- ♦ une boucle principale qui regarde toutes les dix secondes (ou autre durée souhaitée) combien d'impulsions ont été comptées.

```
// Programme principal On attend la durée souhaitée puis on regarde de combien a augmenté la valeur de la variable Impulsion
void loop() {
  delay(duree_souhaitee);           // réglage de la durée souhaitée de l'expérience
  duree=(millis()-Tinit)/1000;      // durée totale de l'expérience
  CPS=Impulsion-Impulsion_moins;    // impulsions comptées sur la durée de chaque expérience
  Impulsion_moins=Impulsion;        // stocke le nombre total d'impulsions à l'étape N-1
  Serial.print("nombre impulsion : "); // Affichage des résultats sur le port série
  Serial.print(CPS);                // Affichage des résultats sur le port série
  Serial.print(" durée experience : "); // Affichage des résultats sur le port série
  Serial.print(duree);              // Affichage des résultats sur le port série
  Serial.println(" s");             // Affichage des résultats sur le port série
}
```

Une fois lancée au début du programme, la routine d'interruption va fonctionner indépendamment du reste du programme. Elle est prioritaire sur le reste des instructions et doit donc être la plus courte possible, car son exécution stoppe les autres processus. Elle se contente d'incrémenter les impulsions lorsqu'un pulse est détecté.

La durée d'attente de la boucle principale est obtenue grâce à un `delay()`. À la fin de la boucle, on affiche le nombre d'impulsions comptées depuis l'affichage précédent, la durée totale de l'expérience et l'on remet le compteur d'impulsion à zéro.

Ce programme est utilisable seul en utilisant le moniteur de série de l'Arduino pour la lecture des résultats. Pour une première approche avec les élèves, il peut être intéressant de faire relever des comptages à la main et d'utiliser du papier millimétré. Cela permet d'utiliser les temps d'attente entre chaque mesure pour compléter progressivement le graphique afin de leur donner le temps de bien comprendre le phénomène.

Mais pour réaliser des statistiques plus poussées, j'ai adapté un programme *Python* librement disponible sur Internet et proposé par Jonas Forlot. Ce programme `Donnes_Geiger_graph.py`, permet de récupérer les données du port série de l'Arduino et de les enregistrer dans un tableau que l'on peut ensuite manipuler facilement. Le programme produit un histogramme des mesures et un fichier des données `data_arduino.txt`. Une modification proposée par Christophe Bellessort permet d'obtenir le tracé du graphique en temps réel ainsi que les paramètres statistiques : `Geiger_Plot_Tps_reel.py`

2.4. Résultats expérimentaux

Le bruit de fond ambiant a servi de premier test (cf. figure 6, page ci-contre). La mesure suivante a été réalisée avec un ancien manchon de lampe campingaz (contenant un peu de thorium 232) (cf. figure 7, page ci-contre). L'augmentation des comptages est assez spectaculaire.

Cependant, pour une utilisation en classe, nous faisons face à une difficulté : les sources radioactives ne sont aujourd'hui plus autorisées, et les « sources inoffensives » comme le manchon de lampe campingaz peuvent être difficiles à se procurer.

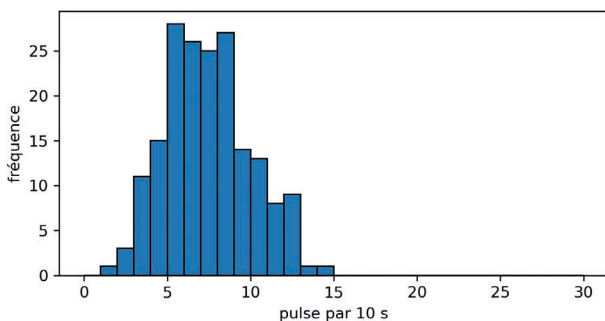


Figure 6 - Bruit de fond.

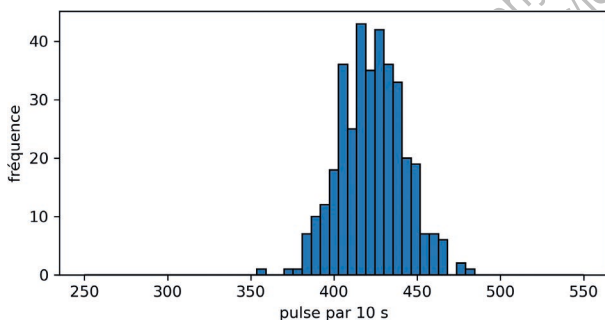


Figure 7 - Manchon de lampe campingaz.

Il faut donc essayer de trouver d'autres sources en commençant par le laboratoire du lycée. J'ai donc réalisé d'autres tests : thiocyanate de potassium (cf. figure 8), granit emprunté en SVT⁽⁴⁾ (cf. figure 9, page ci-après).

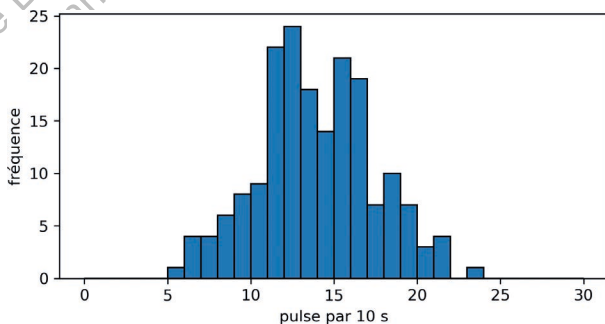


Figure 8 - Thiocyanate de potassium.

(4) SVT : Sciences de la vie et de la Terre.

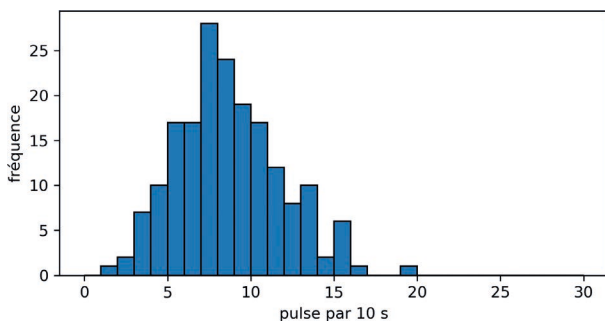


Figure 9 - Granit.

Si le granit ne se différencie *a priori* pas du bruit de fond, le thiocyanate montre un taux de comptage plus élevé. Celui-ci pourrait être augmenté en réduisant la distance prise (3 cm lors de la mesure). Des collègues me confirment que d'autres sources sont possibles, notamment celles contenant du potassium. Le détecteur ainsi constitué permet de réaliser facilement des comptages et peut être utilisé dans des activités expérimentales de physique nucléaire en classe.

L'objectif de ce travail étant de proposer un détecteur et les programmes associés, nous ne détaillons pas ces activités. De plus, de nombreuses ressources existent déjà sur ce thème et sont facilement disponibles sur Internet. Nous pouvons citer les expériences que nous pouvions déjà réaliser avec le Compteur de radioactivité bêta et gamma (CRAB), à savoir :

- ◆ l'influence de la distance ;
- ◆ la mise en place d'écran de protection ;
- ◆ l'étude d'un phénomène aléatoire.

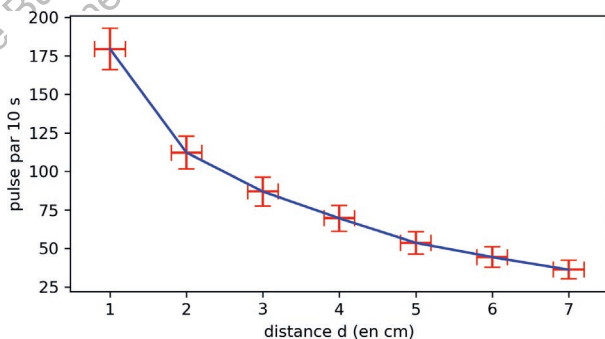


Figure 10 - Pulses en fonction de la distance pour le manchon de campingaz.

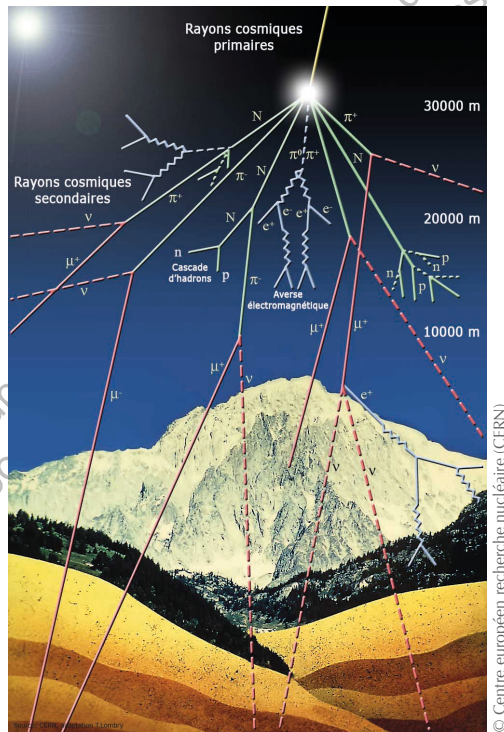
La dispersion des résultats peut fournir un support très riche pour l'étude des

statistiques et la notion d'incertitude de type A en sciences physiques. La distance et les écrans peuvent également faire partie d'une étude sur la protection des risques liés à la radioactivité.

3. CONSTRUIRE UN DÉTECTEUR DE RAYONS COSMIQUES

Suite à ce travail, l'idée était de suivre la démarche de Walther Bothe et Werner Kohlhörster en couplant deux compteurs Geiger-Müller en coïncidence afin de détecter des rayons cosmiques.

Cet article est trop court pour rentrer en détail dans une description complète des rayons cosmiques, pour cela on se référera au livret pédagogique de Cosmos à l'École⁽⁵⁾ ou à l'une des deux excellentes références en la matière : *Quand le ciel nous bombarde* de Michel Crozon [1] et *Cosmic Rays* de Bruno Rossi [2].



© Centre européen recherche nucléaire (CERN)

Figure 11 - Gerbe atmosphérique de rayons cosmiques (source : CERN).

(5) Livret pédagogique de Cosmos à l'École :
<https://www.sciencesalecole.org/plan-cosmos-a-lecole-ressources/>

Pour ce travail, il suffira de considérer qu'au niveau du sol les rayons cosmiques se présentent pour l'essentiel sous forme de muons voyageant quasiment à la vitesse de la lumière. Le flux moyen au niveau du sol est d'environ $170 \text{ muons} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. Le muon, selon le modèle standard, est un fermion de la famille des leptons avec l'électron et le tau, environ deux cents fois plus massif qu'un électron.

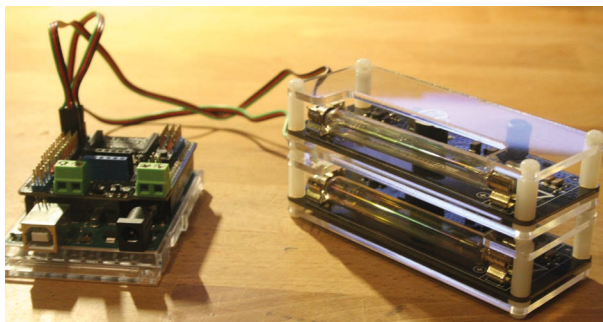


Figure 12 - Le MicroCosmos.

Pour réaliser notre détecteur, nous utilisons un deuxième tube Geiger-Müller. L'Arduino Uno que nous utilisons ne détecte des interruptions *a priori* que sur deux ports (les ports 2 et 3) mais cela est suffisant pour ce projet. D'autres modèles d'Arduino peuvent utiliser plus d'interruptions et donc plus de compteurs Geiger pour mesurer de triples coïncidences par exemple (mesure de gerbes de particules, transition de Rossi).

3.1. Détection des coïncidences : matérielle ou logicielle ?

La première question qui se pose est de décider si nous devons détecter les coïncidences à l'aide d'un circuit électronique, comme Bruno Rossi à l'époque, ou utiliser une méthode logicielle sollicitant les capacités de l'Arduino.

En effet, en faisant des recherches, je constate qu'il existe quelques projets de construction d'un détecteur à l'aide d'un Arduino et de deux Geiger-Müller. C'est encourageant, cela veut dire que c'est possible. Mais tous les projets que j'ai pu voir sont basés sur l'utilisation d'un circuit électronique pour la coïncidence. Ce montage possède deux entrées (les tubes Geiger) reliées à une porte «ET» et une sortie qui ne s'active que lorsque les deux entrées délivrent simultanément chacune un signal dans une fenêtre temporelle définie. Ces circuits n'ont pas l'air trop difficiles à construire, mais, de mon point de vue, rajoutent une difficulté supplémentaire et constituent un frein à une possible utilisation simple du détecteur en lycée.

Une discussion avec Grégory Lehaut et Yves Lemièrre du Laboratoire de physique corpusculaire (LPC) de Caen me confirme qu'une détection logicielle est tout à fait possible en théorie avec l'Arduino, et probablement plus simple à paramétrer.

Centrer le projet sur l'Arduino permet aux professeurs de réaliser leur propre configuration, adaptée à la séance de travaux pratiques. La réalisation d'une partie du programme peut être l'un des objectifs de cette séance par exemple. Les élèves pourront également intervenir sur le détecteur, modifier des réglages, voire modifier le fonctionnement du détecteur lui-même. Cela offre une certaine souplesse.

Après des recherches infructueuses sur la détection logicielle avec Arduino, je me suis donc lancé dans l'écriture d'un programme basé sur deux interruptions. Au cours de l'écriture de ce programme, tout en continuant mes recherches, j'ai pu échanger avec Pratap Singh et Holly Hedgeland de l'Université de Cambridge qui avaient réalisé ce genre de détection avec un *Raspberry Pi* il y a quelques années. Leur programme ne correspondait pas à ce que je souhaitais faire, mais ces échanges m'ont remotivé et je les en remercie. Après de nombreux essais, j'ai fini par aboutir à quelque chose de fonctionnel et très simple.

3.2. Le programme *DetectionCosmiques.ino*

J'ai d'abord essayé de récupérer la mesure temporelle sur les deux compteurs Geiger-Müller pour pouvoir les comparer et décider d'une coïncidence ou non. Mais la gestion du temps sur Arduino pour ce type de valeurs temporelles courtes s'avère assez compliquée. Sur le principe, les programmes semblaient cohérents, cependant j'obtenais des résultats qui n'avaient aucun sens. Et mon niveau de programmation ne m'autorisait pas à aller plus profond dans le code.

J'ai alors décidé de choisir une autre approche qui s'est avérée plus simple et plus évidente au final. Dans cette approche, les interruptions ne mesurent pas l'heure de passage du muon mais regardent l'état du compteur.

La première interruption surveille le GM 1. Si un signal est détecté, le nombre d'impulsions du GM 1 est incrémenté et la variable état 1 prend la valeur 1. La deuxième interruption fait la même chose pour le GM 2.

```
void GeigerISR1(){ // Routine exécutée lors de l'interruption tube 1
  Impulsion1++;
  Etat1=1;
}

void GeigerISR2(){ // Routine exécutée lors de l'interruption tube 2
  Impulsion2++;
  Etat2=1;
}
```

Ensuite, la boucle principale du programme (`void loop()`) gère la partie temporelle. La boucle compare toutes les 1 ms l'état du GM 1 et du GM 2. S'ils sont tous les deux dans l'état 1 alors on compte une coïncidence. Une fois la comparaison effectuée on remet les deux Geiger-Müller dans l'état 0.

```

void loop() {
  for (int t=0; t<1000; t++){
    delay(1);
    duree=(millis()-Tinit)/1000;

    if ((Etat1==1) && (Etat2==1)){
      N12++;
    }
    Etat1=0;
    Etat2=0;
  }
}

```

// Comptage pendant 1 s avant d'afficher le résultat sur le moniteur série
 // réglage de la durée de la fenêtre de coïncidence en ms
 // durée totale de l'expérience
 // Si les 2 GM sont dans l'état 1 on compte une coïncidence

Cela revient à ouvrir une fenêtre temporelle de coïncidence de 1 ms. Cette durée a été choisie pour deux raisons. D'une part, c'est la résolution temporelle du premier circuit électronique proposé en 1929 par Bruno Rossi qui a été une grande inspiration pour moi. D'autre part, la largeur d'un pulse issu des Geiger-Müller est d'environ 0,3 ms. Or le fonctionnement des interruptions est assez complexe. Pendant une interruption l'Arduino ne fait plus rien d'autre et je ne sais pas bien au bout de combien de temps il est capable de mesurer la deuxième interruption. De plus, le bruit de fond étant environ de 0,5 pulse/s, la probabilité que deux signaux du bruit de fond aient lieu simultanément au cours de cette fenêtre temporelle est très faible. Une fenêtre de 1 ms semblait donc offrir un bon compromis, à la fois assez large pour ne pas rater informatiquement les pulses, et assez fine pour éviter le bruit.

L'Arduino possède une fonction `DelayMicroseconds()` qui permettrait sans doute d'augmenter la précision de cette résolution temporelle. Mais étant donné que nous ne cherchons pas à obtenir de mesures temporelles (comme un temps de vol entre les détecteurs Geiger-Müller par exemple), cela ne semble guère avoir d'utilité pour l'instant.

3.3. Résultats expérimentaux

L'étape suivante a consisté à prendre des mesures afin de valider le fonctionnement du détecteur. Les mesures réalisées à l'aide d'un cosmodétecteur prêté par Sciences à l'École vont servir de comparaison.

3.3.1. Mesure du flux moyen

Une prise de mesure est effectuée durant 4 h 18 min et 2 s (15 482 s). Les résultats montrent que le flux de muons mesuré est bien constant sur cette durée. La modélisation nous donne un flux moyen de $0,0199 \text{ muon} \cdot \text{s}^{-1}$ (cf. figure 13, page ci-contre).

Pour remonter au flux moyen, il faut tenir compte de la surface de notre détecteur ainsi que de son efficacité géométrique. L'efficacité géométrique traduit le fait que seuls les muons traversant les deux tubes vont être comptés, donc certains « vrais » muons vont être considérés comme du bruit parce que même s'ils traversent le premier détecteur ils ne traversent pas le deuxième. Pour calculer cette efficacité, j'utilise le

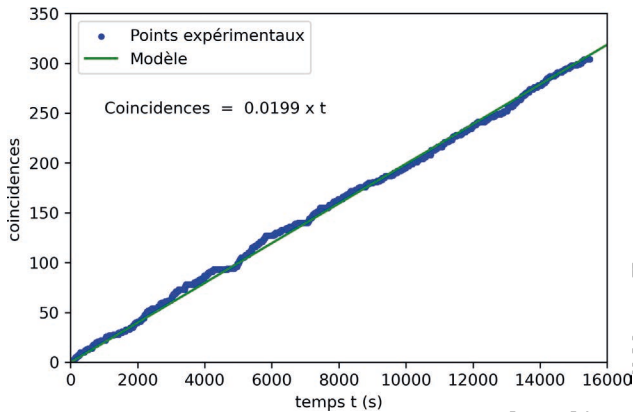


Figure 13 - Coïncidences en fonction du temps.

programme `efficacite_geometrique.py` (disponible sur le dépôt GitHub) que j'ai réalisé il y a quelques années à partir d'une base proposée par Jean-Christophe Pelhate de Sciences à l'École.

La surface d'interception de notre tube est d'environ 7 cm^2 . L'efficacité géométrique, dans la configuration choisie, *i.e.* les deux détecteurs séparés de 3 cm, est de 19,5 %.

On obtient donc un flux moyen de $\frac{0,0199 \times 100}{19,5 \times 7 \cdot 10^{-4}} = 146 \text{ muons} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ce qui est parfaitement cohérent avec le flux moyen de muons au niveau de la mer. À titre de comparaison, notre dernière mesure avec le cosmodétecteur de Sciences à l'École était d'environ $135 \text{ muons} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$.

3.3.2. La distribution angulaire du flux de muons

L'une des mesures classiques avec les rayons cosmiques consiste à réaliser une mesure de la distribution angulaire (cf. figure 14) du flux de muons. Avant d'arriver au sol, les muons vont devoir parcourir une distance plus ou moins longue. Deux facteurs interviennent alors :

- ◆ La probabilité d'interaction avec l'atmosphère qui est proportionnelle à la longueur du chemin.
- ◆ la probabilité de désintégration radioactive du muon qui a une durée de vie au repos d'environ $2 \mu\text{s}$. Ce qui fait qu'il ne devrait d'ailleurs parcourir que 600 m à la vitesse de

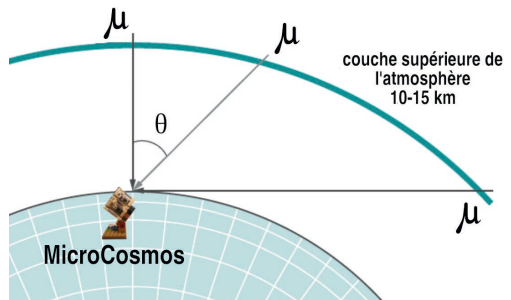


Figure 14 - Distribution angulaire.

la lumière, mais il faut compter avec la dilatation du temps. En effet, lorsque nous mesurons cette durée de vie grâce au cosmodétecteur de Sciences à l'École, le muon est arrêté dans un cylindre de plastique scintillateur. C'est donc un temps propre qui est mesuré, puisque nous partageons avec le muon un référentiel dans lequel nous sommes au repos. Mais lorsqu'il descend dans l'atmosphère à une vitesse proche de la lumière par rapport à nous, sa durée de vie de notre point de vue (temps dit « impropre ») est d'environ 40 μs . Ce qui lui permet aisément de parcourir une dizaine de kilomètres.

Au final, on aboutit à une distribution attendue du type : $N_{12} = a \cos^2(\theta) + b$ avec N le nombre de muons et a et b des constantes à déterminer. Pour cette expérience, on utilise un support en LEGO® permettant de régler l'angle de mesure par rapport au zénith. Les résultats obtenus sont présentés dans le graphique ci-dessous pour une durée de prise de mesure d'une heure par point (cf. figure 15).

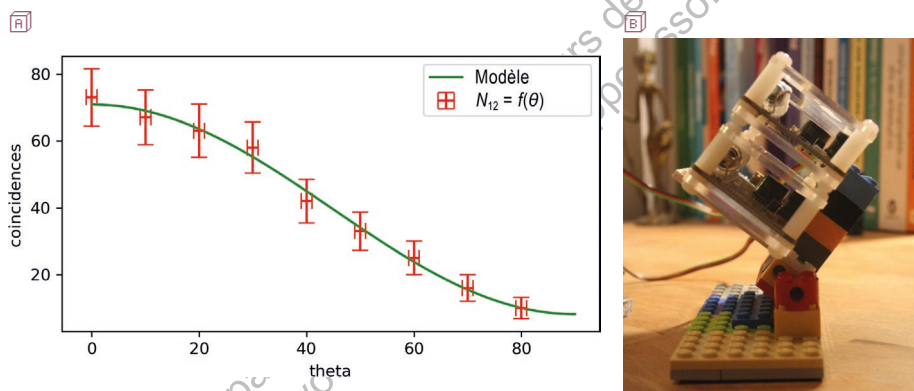


Figure 15 - (A) Coïncidences en fonction de l'angle au zénith θ durée mesure par point : une heure - (B) Support mesure angulaire.

La modélisation nous donne $N_{12} = 62,7 \cos^2(\theta) + 8,2$ avec N_{12} le nombre de coïncidences mesurées entre le GM 1 et le GM 2. On observe un assez bon accord entre les points expérimentaux et la courbe.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

L'association de l'Arduino et du tube Geiger-Müller offre donc un outil expérimental à la fois simple, aux possibilités multiples et peu coûteux.

Cela peut permettre de relancer les manipulations sur le thème de la radioactivité et d'introduire celui des rayons cosmiques. Ce montage peut également servir de support pour le thème des incertitudes expérimentales. À comparer aux détecteurs aujourd'hui disponibles pour les lycées (cosmodétecteur, COSMIX ou appareil com-

mercial), les résultats sont plus longs à obtenir du fait de la faible section efficace des tubes (7 cm^2). Mais cet inconvénient peut en partie être compensé par la souplesse d'utilisation.

Pour la distribution angulaire par exemple, on a vu qu'il fallait neuf points de d'une heure (à comparer aux neuf points de cinq minutes avec le cosmodétecteur par exemple). C'est difficilement réalisable en classe. Mais le faible coût du MicroCosmos complet (environ 150 €) permet d'imaginer utiliser une dizaine de ces dispositifs en TP. Chaque groupe réalisant des mesures de dix minutes peut alors reconstruire statistiquement une distribution collective. Une autre possibilité est que chaque groupe réalise une mesure d'une heure en se répartissant les différents angles.

Les compteurs Geiger-Müller ne permettent pas une mesure de temps de vie du muon directe comme avec le cosmodétecteur, mais *Pratap Singh* et *Holly Hedgeland* proposent dans leur article [3] un lien entre la distribution angulaire du flux de muons et la dilatation des durées de la relativité restreinte qui peut être testée avec le MicroCosmos.

L'Arduino peut fonctionner sur pile, écrire des données, voire pour certains modèles émettre en Bluetooth. Vu la faible taille du dispositif, de nombreuses expériences peuvent être imaginées : en altitude (avion, montagne), sous l'eau (bocal étanche en piscine) pour tester l'absorption par l'eau...

REMERCIEMENTS

Un énorme merci au projet Sciences à l'École grâce à qui j'ai pu faire le stage au LHC (*Large Hadron Collider, en français* Grand collisionneur de hadrons) en 2010 au cours duquel cette aventure avec les muons a commencé... Merci en particulier à Nicolas Arnaud pour son soutien constant et sa disponibilité et à José Busto le « papa » du cosmodétecteur pour m'avoir permis de découvrir le monde des rayons cosmiques. Également un grand merci à :

- ◆ Yoann Lallouet pour m'avoir parlé des muons il y a quinze ans et incité à postuler au French Teacher Program du CERN (Centre européen recherche nucléaire) ; merci pour sa relecture avisée ;
- ◆ Christophe Bellessort pour le prêt d'un deuxième tube Geiger au début du projet et pour l'aide sur le programme *Python* d'enregistrement des données ; merci pour sa relecture avisée ;
- ◆ Philippe Girres et Christophe Girard pour leur soutien et les relectures constructives ;
- ◆ Jean-Charles Thomas pour son accueil toujours amical au GANIL (Grand accélérateur national d'ions lourds) et m'avoir aidé à prendre soin du cosmodétecteur ;
- ◆ Grégory Lehaut pour les discussions extrêmement motivantes ;
- ◆ Augustin Tellier Vanden Driessche pour la construction du support en LEGO® du MicroCosmos ;
- ◆ Claude Tellier pour son soutien, ses encouragements et son aide pour l'écriture.

BIBLIOGRAPHIE ET NETOGRAPHIE

- [1] M. Crozon, *Quand le ciel nous bombarde*, Paris : Vuibert, 2005.
- [2] B. Rossi, *Cosmic Rays*, New York : McGraw-Hill, 1964.
- [3] P. Singh and H. Hedgeland, “Special relativity in the school laboratory: a simple apparatus for cosmic-ray muon detection”, *Phys. Educ.*, vol. 50, n° 3, p. 317–323, May 2015. Disponible à l’adresse :
<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0031-9120/50/3/317/pdf>
 page consultée le 2 septembre 2024.

Autres références utiles

- ◆ A. Moussa, « Les techniques de détection en physique nucléaire », *Bull. Un. Phys.*, vol. 45, n° 398, p. 354–383, avril-mai-juin 1951.
- ◆ C. Lagoute, « Réalisation d’un détecteur de muons : une approche de physique du xx^e siècle au lycée », *Bull. Un. Prof. Phys. Chim.*, vol. 103, n° 911 (1), p. 143–183, février 2009.
- ◆ J.-C. Pelhate, M. Piezel, N. Arnaud et C. Bonnoit-Chevalier, « “COSMOS à l’École” : un réseau de détecteurs pédagogiques de muons cosmiques », *Bull. Un. Prof. Phys. Chim.*, vol. 112, n° 1001, p. 353–362, février 2018.
- ◆ Un projet intéressant sur la détection des muons : le projet COSMIX
<https://www.lp2ib.in2p3.fr/grand-public-scolaires/les-rayons-cosmiques-au-lycee/cosmix/>

Compléments de l’article

Cet article comporte des compléments nommés :

- ◆ *DetectionCosmiques.ino*
- ◆ *Donnees_Cosmiques_graph.py*
- ◆ *Donnes_Geiger_graph.py*
- ◆ *Geiger_Plot_Tps_reel.py*
- ◆ *MicroCosmosRadioactivite.ino*

L’ensemble est disponible sur le site de l’UdPPC sous la forme d’un fichier zippé 10680907.



Cédric VANDEN DRIESSCHE

Professeur de sciences physiques
 Lycée Charles de Gaulle
 Caen (Calvados)