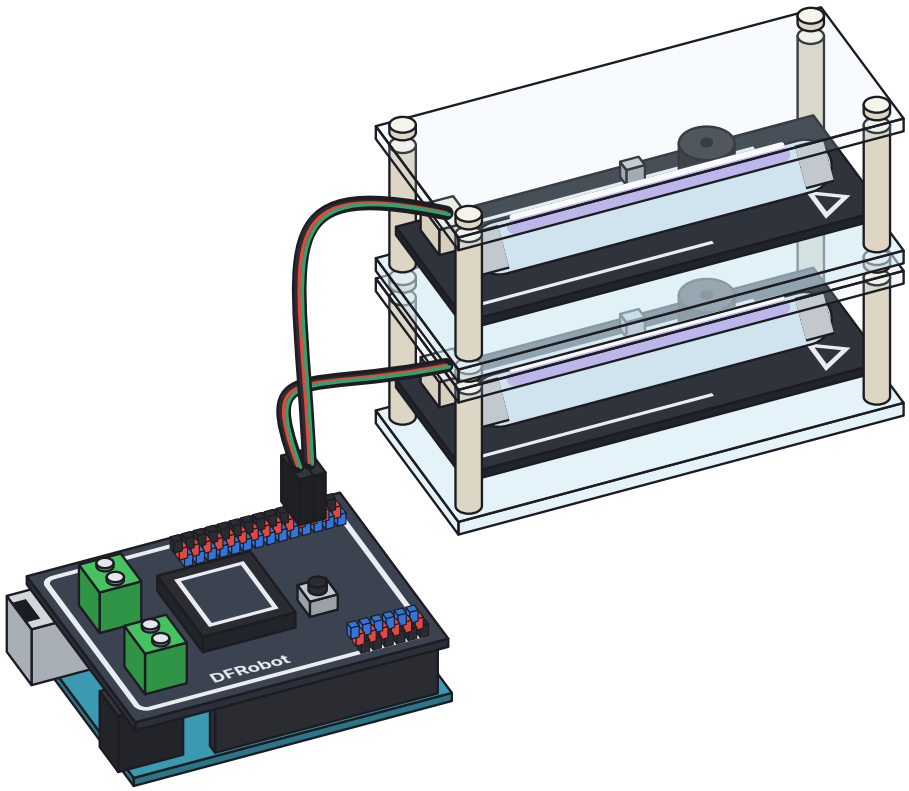
STAGE AU CERN · FRENCH TEACHER PROGRAMME

μMicroCosmos

Livret d'expériences pour la classe

Rayons cosmiques et radioactivité avec un Arduino et des tubes Geiger



AUTEUR

Cédric Vanden Driessche

Professeur de physique-chimie
Lycée Charles de Gaulle, Caen — Académie de Normandie

cedric.vanden-driessche@ac-normandie.fr
mucosmos.github.io

CONTENU

6 activités rayons cosmiques
6 activités radioactivité
protocoles, schémas, résultats attendus
et pistes pour les élèves

Octobre 2026

Document sous licence GNU GPL v3 — © Cédric Vanden Driessche, 2024-2026

Sommaire

Le dispositif MicroCosmos **2**

Principe de la détection **3**

Les activités du livret **4**

Partie A — L'étude des rayons cosmiques **5**
A1 Un tube ne suffit pas : bruit de fond et muons . . . 6
A2 Mesurer le flux de muons au niveau du sol . . . 7
A3 Distribution angulaire et relativité . . . 8
A4 Dilatation du temps : de la mer à la montagne . . . 9
A5 Jouer avec la fenêtre de coïncidence . . . 10
A6 Le hasard des comptages : la loi de Poisson . . . 11

Partie B — L'étude de la radioactivité **12**
B1 Le bruit de fond et les incertitudes . . . 13
B2 L'effet de la distance . . . 14
B3 Les écrans : papier, aluminium, plomb . . . 15
B4 Séparer β et γ : retrouver 89 % / 11 % . . . 16
B5 La demi-vie du radon : un aspirateur et un filtre à café . . . 17
B6 Filiation radioactive : la demi-vie apparente . . . 18

Annexe 1 — Les programmes **19**
Le cœur du programme Arduino de coïncidence . . . 19
Modéliser la filiation en Python (activité B6) . . . 19

Annexe 2 — Données et ressources **20**
Données utiles . . . 20
Ressources en ligne et articles . . . 20

Le dispositif MicroCosmos

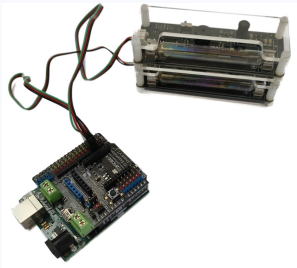
Pourquoi ce livret ?

Au CERN, les détecteurs de l'expérience CMS (*Compact Muon Solenoid*) ou d'ATLAS identifient des muons et trient les événements grâce à des **coïncidences** entre sous-détecteurs. Le MicroCosmos permet de refaire en classe, avec du matériel du commerce, les gestes fondateurs de cette physique : compter des particules, sélectionner un signal par coïncidence, estimer des incertitudes, confronter un modèle (classique ou relativiste) à des données.

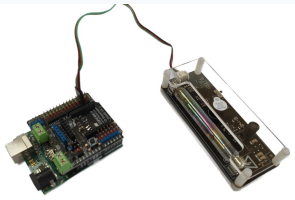
Le même montage, avec un seul tube, sert à étudier la **radioactivité naturelle** (potassium 40, descendants du radon) sans aucune source scellée.

≈ 150 €	0 soudure	1,2 / min
matériel du commerce	coïncidence en 10 lignes de code	muons au niveau de la mer

Les deux montages



Deux tubes empilés : rayons cosmiques



Un tube : radioactivité

Le matériel

Qté	Élément	Rôle	Prix indicatif
1 ou 2	Module Geiger DFRobot Gravity (SEN0463), tube M4011 (10 mm × 88 mm, ≈ 7 cm^2)	haute tension et mise en forme des impulsions intégrées	≈ 70 € l'unité
1	Arduino Uno (ou Nano)	comptage des impulsions (interruptions D2 et D3) et des coïncidences	≈ 25 €
1	Shield DFRobot Gravity E/S (V7)	connecteurs 3 fils enfichables, sans soudure	≈ 10 €
1	Câble USB et ordinateur, ou batterie USB + écran + carte micro-SD	alimentation, lecture et enregistrement	—
Total pour le montage à deux tubes			**≈ 150 à 175 €**

Pour la radioactivité : du chlorure de potassium KCl (sel du laboratoire ou sel de régime «sans sodium»), des briques LEGO® ou un support élévateur, des écrans (papier, aluminium alimentaire, plomb de toiture 1,3 mm), un aspirateur et des filtres à café.

Câblage

1. Enficher le shield Gravity sur l'Arduino Uno.
2. Brancher le module Geiger du **dessus** sur **D2** et celui du **dessous** sur **D3** (noir : GND, rouge : 5 V, vert : signal). Pour la radioactivité, un seul module sur D2.
3. Empiler les modules sur leurs entretoises : tubes **parallèles**, écartés d'environ **3 cm**.
4. Téléverser le programme `DetectionCosmiques3_0` (onglet «Arduino et fichiers» du logiciel) : il sert à toutes les études.

Le logiciel Microcosmos (libre, GPL v3)

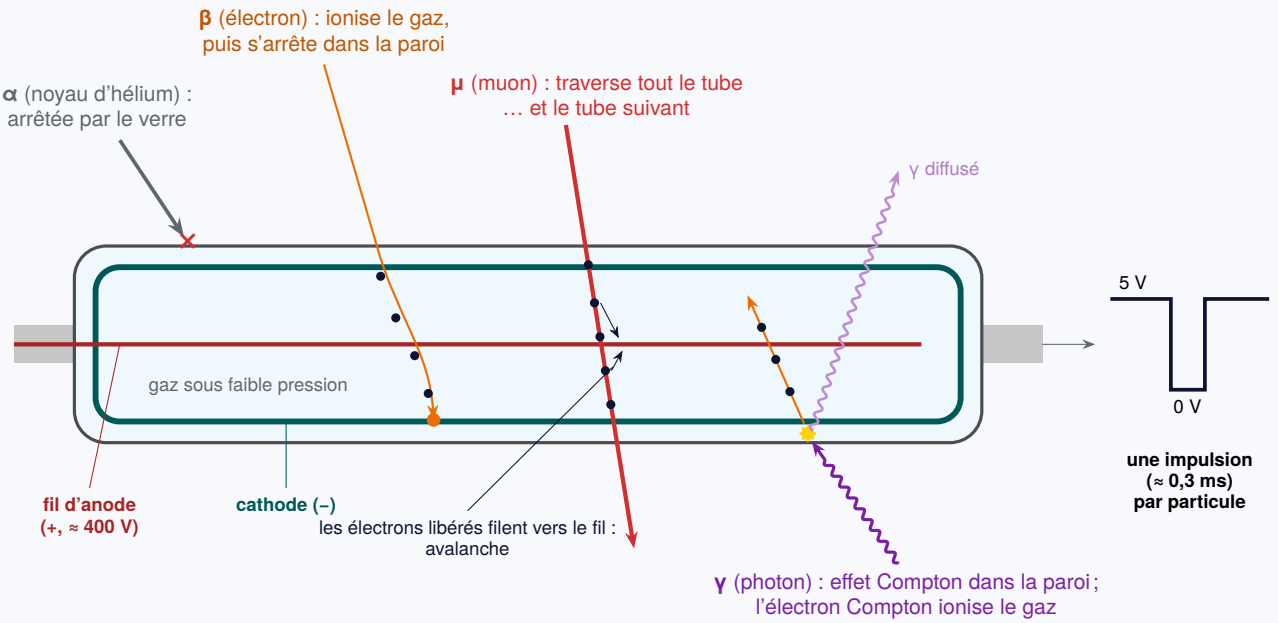
Interface dans le navigateur, en trois versions : **web** (rien à installer, Chrome/Edge/Firefox récent), **paquet .deb** (Linux) ou **dossier Windows / macOS**. Quatre onglets :

- **Rayons cosmiques** : N_1, N_2, N_{12}, taux $\pm\sqrt{N}/t$, fortuites attendues, histogramme et loi de Poisson ;
- **Radioactivité** : séries de 30, 60 ou n mesures de 10 s, tableau à recopier ;
- **Demi-vie (radon)** : courbe $N = f(t)$, ajustement, demi-vies apparentes ;
- **Arduino et fichiers** : programme envoyé en un clic, fichiers de mesure.

Un **mode simulation** (accéléré × 60) permet de préparer la séance sans détecteur.

Principe de la détection

Ce que détecte un tube Geiger-Müller

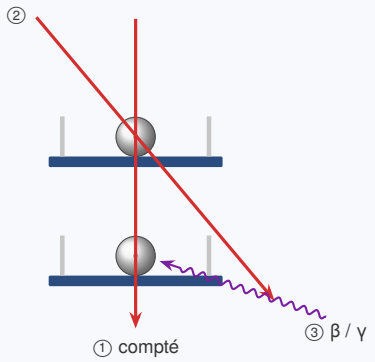


Particules chargées (β, μ). Elles ionisent directement le gaz : les électrons libérés, accélérés vers le fil, déclenchent une **avalanche** et donc une impulsion. Les α ne franchissent pas le verre.

Photons γ. Ils n'ionisent pas directement le gaz : ils sont détectés quand ils arrachent un électron à la paroi (**effet Compton**). C'est rare : la plupart des γ traversent le tube sans être vus.

Un tube seul réagit à tout cela : radioactivité du sol, des murs, du corps humain… et rayons cosmiques, soit environ **0,4 à 0,5 coup par seconde**. Il ne sait pas d'où vient la particule.

La coïncidence



① Un muon quasi vertical traverse les deux tubes **au même instant** : coïncidence. ② Un muon trop incliné ne traverse que le tube du haut, ③ un rayonnement de la radioactivité ambiante ne touche qu'un tube : pas de coïncidence.

Une coïncidence logicielle

Chaque tube a sa routine d'interruption qui incrémente son compteur et **lève un drapeau**. La boucle principale examine les deux drapeaux **toutes les millisecondes** : s'ils sont levés ensemble, une coïncidence N_{12} est comptée, puis les drapeaux sont baissés. C'est une **fenêtre de coïncidence de** 1 ms, la résolution du premier circuit de Rossi (1930). Le code complet est donné en annexe.

Coïncidences fortuites. Deux impulsions sans lien peuvent tomber dans la même milliseconde ; on en attend $R_1 R_2 \tau \approx 0{,}5 \times 0{,}5 \times 0{,}001 \approx 2{,}5 \times 10^{-4}\,\mathrm{s}^{-1}$, soit environ **une par heure**, pour environ **70 vraies coïncidences par heure** : 1 à 2 % du signal.

Les activités du livret

Vue d'ensemble

	Activité	Niveau suggéré	Durée de mesure	Montage
A. Les rayons cosmiques				
A1	Un tube ne suffit pas : bruit de fond et muons	$2^{de} \rightarrow T^{le}$	30 min à 1 h	2 tubes
A2	Mesurer le flux de muons	T^{le}	≥ 4 h	2 tubes
A3	Distribution angulaire et relativité	T^{le}, post-bac	1 h par angle	2 tubes inclinables
A4	Dilatation du temps : de la mer à la montagne	T^{le}, Olympiades	quelques heures par site	autonome
A5	Jouer avec la fenêtre de coïncidence	T^{le}, NSI, club	1 h par réglage	2 tubes
A6	Le hasard des comptages : loi de Poisson	$2^{de} \rightarrow T^{le}$	une nuit	2 tubes
B. La radioactivité				
B1	Le bruit de fond et les incertitudes	$2^{de} \rightarrow T^{le}$	5 min	1 tube
B2	L'effet de la distance	1^{re} ES, T^{le}	8×5 min	1 tube + KCl
B3	Les écrans : papier, aluminium, plomb	1^{re} ES, T^{le}	6×5 min	1 tube + KCl
B4	Séparer β et γ du potassium 40	T^{le}, Olympiades	3×3 h	1 tube + KCl + Pb
B5	La demi-vie du radon : aspirateur et filtre à café	T^{le} spé	40 min + 2 h	1 tube + aspirateur
B6	Filiation radioactive : la demi-vie apparente	T^{le} spé + maths	— (modélisation)	données de B5

Organiser les mesures en classe

Radioactivité. Séries de 30 mesures de 10 s (5 min) : une séance de TP suffit, avec 6 à 8 postes.

Rayons cosmiques. Environ 70 muons par heure : lancer les mesures longues le matin ou le soir, ou répartir un angle par groupe.

Préparation. Le mode simulation du logiciel permet de construire et tester la séance sans détecteur.

Comment lire une fiche ?

Chaque activité tient sur une page : un bandeau (niveau, durée, montage), l'objectif, un **schéma du montage**, le **protocole**, le **résultat attendu** (graphique ou schéma, d'après des mesures réelles réalisées au lycée Charles de Gaulle lorsque c'est possible), un encadré « **Avec les élèves** » et des pistes « **Pour aller plus loin** ». Les niveaux indiqués sont des suggestions (programmes du lycée français) ; toutes les activités se prêtent aussi aux clubs scientifiques et aux Olympiades de physique.

Radioprotection et sécurité

Aucune source scellée n'est utilisée : le potassium 40 d'un sel de laboratoire (KCl) et les descendants du radon recueillis sur un filtre ont une activité très faible. Les expériences sont l'occasion d'aborder les trois principes de la radioprotection : **distance** (B2), **écran** (B3) et **durée d'exposition**. Le plomb se manipule avec des gants ou en se lavant les mains ensuite.

PARTIE A

Les rayons cosmiques

Compter les muons venus de la haute atmosphère, mesurer leur distribution angulaire, observer la dilatation du temps.

Une pluie venue de l'espace

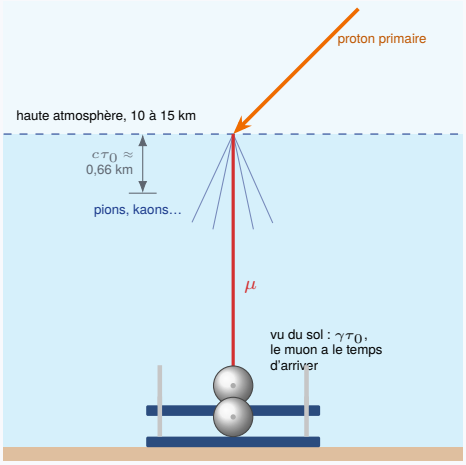
Les **rayons cosmiques primaires**, surtout des protons, frappent la haute atmosphère et y produisent des **gerbes** de particules (pions, kaons…) qui se désintègrent rapidement. Au sol, on reçoit surtout des **muons**.

Le muon est un « cousin lourd » de l'électron (environ 200 fois sa masse). Au repos, il se désintègre en moyenne en $\tau_0 = 2{,}2\,\mu\text{s}$. Même à la vitesse de la lumière, il ne parcourrait que $c\tau_0 \approx 0{,}66\,\text{km}$, bien moins que les 10 à 15 km d'air qui nous séparent de son lieu de naissance.

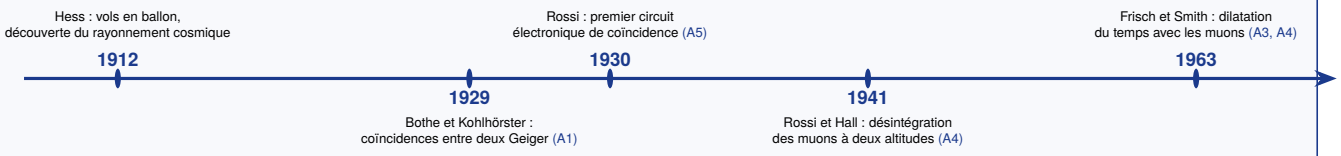
Et pourtant, il en passe environ **un par centimètre carré et par minute** au niveau de la mer. C'est la **relativité restreinte** qui résout l'énigme : vue du sol, la durée de vie du muon est dilatée, $\tau = \gamma\tau_0$.

Les muons sont un objet d'étude de la physique des particules **gratuit, sans danger et présent dans toutes les salles de classe**.

Naissance et vol d'un muon (pas à l'échelle)



Les expériences historiques que les élèves rejouent



Ce qu'il faut savoir avant de commencer

- Le MicroCosmos compte environ **1,2 coïncidence par minute** (≈ 70 par heure) : les mesures sont **longues**. On peut multiplier les détecteurs (un par groupe) ou lancer une mesure par jour avec des élèves volontaires.
- Pendant une mesure : onglet du navigateur ouvert, ordinateur **hors veille**, IDE Arduino fermé.
- Version autonome (batterie, écran, carte SD) pour les mesures hors du laboratoire.

Limites du dispositif

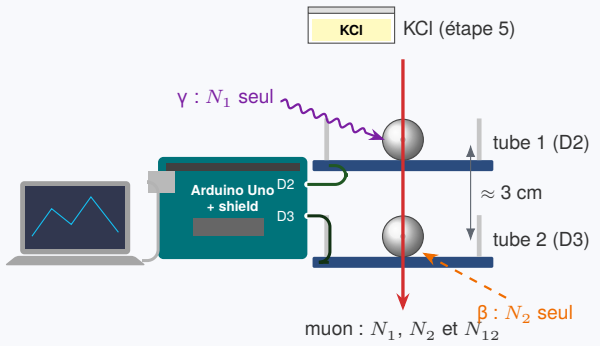
Des tubes Geiger ne permettent **pas** de mesurer directement la durée de vie du muon : il faudrait arrêter les muons dans un scintillateur (c'est ce que fait le *cosmodétecteur* de Sciences à l'École, avec des comptages environ 60 fois plus rapides). Les deux appareils sont complémentaires : le MicroCosmos fait manipuler toute une classe et voyage facilement.

A1 Un tube ne suffit pas : bruit de fond et muons

Niveau : 2de → Tle, enseignement scientifique **Durée :** 1 h (mesure 30 min à 1 h) **Montage :** 2 tubes empilés

Objectif. Constater qu'un tube Geiger seul compte toutes les particules ionisantes, sans distinction d'origine, et que les coïncidences entre deux tubes empilés sont une vingtaine de fois plus rares : elles sélectionnent les particules qui traversent les deux tubes.

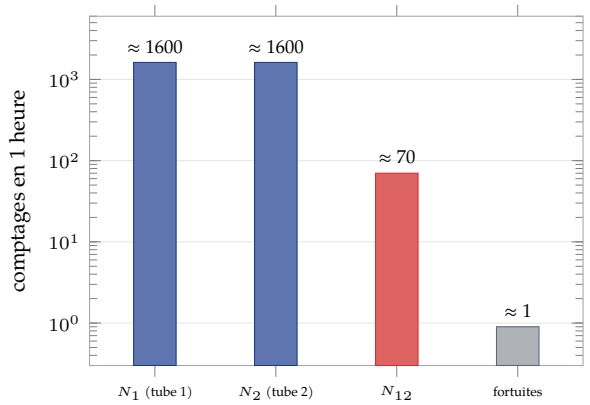
Schéma du montage



Protocole

1. Câbler le montage à deux tubes (tube du dessus sur D2, du dessous sur D3), relier l'Arduino à l'ordinateur.
2. Ouvrir le logiciel Microcosmos, onglet **Arduino et fichiers** : téléverser `DetectionCosmiques3_0` (une seule fois par carte).
3. **Connecter l'Arduino**, onglet **Rayons cosmiques** : durée 30 min (ou 1 h), intervalle 60 s, ajouter un commentaire.
4. Relever N_1, N_2 et N_{12}, ainsi que les taux en coups par minute et leur incertitude $\pm\sqrt{N}/t$.
5. **Variante :** poser la boîte de KCl contre le tube du dessus pendant 10 min. N_1 augmente nettement, N_{12} ne change pas de façon significative.

Résultat attendu



Ordres de grandeur pour une heure au niveau de la mer : 0,4 à 0,5 coup/s par tube, 1,2 coïncidence/min. Sur 30 min, $N_{12} \approx 35$: incertitude relative $1/\sqrt{35} \approx 17\,\%$, d'où l'intérêt de regrouper les résultats de la classe.

Avec les élèves

- **Question d'amorce :** « Le tube compte en permanence, même sans source. D'où viennent ces particules ? » Faire émerger : sol, murs, air (radon), corps humain (potassium 40)… et ciel.
- **Débat : que nous apprend le second tube ?** On masque d'abord N_2 et N_{12} : avec N_1 seul, impossible de savoir d'où vient la particule. Une coïncidence indique qu'une particule **pénétrante** a traversé les deux tubes, donc en suivant à peu près l'axe de la pile ; la radioactivité ambiante (β arrêtés, γ qui n'interagissent qu'une fois) ne touche qu'un tube. Mais deux tubes **ne distinguent pas** une particule venue d'en haut d'une particule venue d'en bas : il faudrait mesurer un temps de vol de l'ordre de 0,1 ns. L'origine céleste se déduit de la distribution angulaire (A3) et de l'effet de l'altitude (A4).
- Faire calculer le rapport N_1/N_{12} (≈ 20) et les fortuites $R_1 R_2 \tau$: les élèves vérifient que le hasard n'explique pas N_{12}.
- Variante KCl : une source proche « affole » un tube, pas la coïncidence.

Pour aller plus loin

1. Quelle part du comptage d'un tube seul vient des muons ? Avec ≈ 1 muon par cm² et par minute et $A \approx 7\,\text{cm}^2$, environ 420 muons par heure traversent un tube, pour $\approx 1\,600$ coups : un quart environ.

2. Glisser un livre épais ou une brique entre les deux tubes : N_{12} ne diminue presque pas, les muons sont très pénétrants.

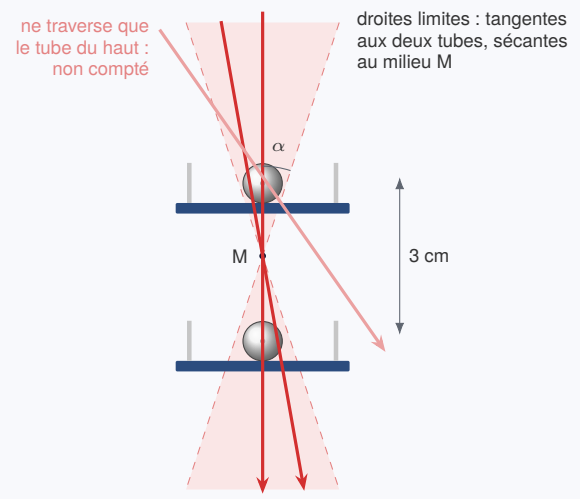
3. Comparer N_1 au sous-sol et à l'étage, fenêtre ouverte ou fermée : qu'est-ce qui change ?

A2 Mesurer le flux de muons au niveau du sol

Niveau : T^le (prolongement : post-bac) **Durée :** mesure ≥ 4 h, exploitation 1 h **Montage :** 2 tubes empilés, écart 3 cm

Objectif. Passer d'un taux de coïncidences à une grandeur physique, le flux de muons Φ (en $\mathrm{m^{-2}\,s^{-1}}$), en tenant compte de la surface sensible des tubes et de l'acceptance géométrique de la pile, puis comparer à la valeur de référence.

Schéma : surface et acceptance



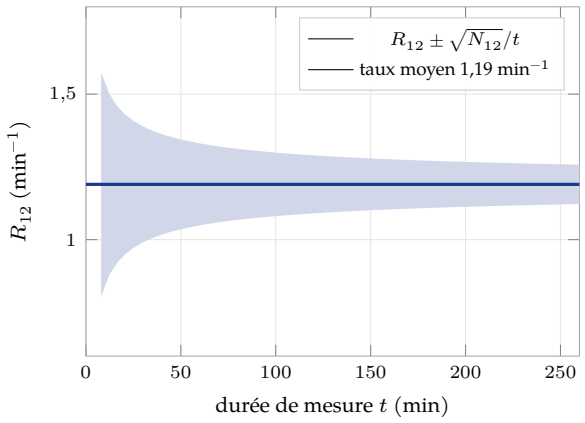
tube M4011 : surface sensible $A \approx 7\,\mathrm{cm^2}$

$$\Phi = \frac{R_{12}}{\varepsilon\, A} \qquad \text{avec } R_{12} = \frac{N_{12}}{t},\ \varepsilon \approx 19{,}5\,\%$$

Protocole

1. Montage à deux tubes, écart **3 cm** vérifié au réglet. Détecteur à plat, loin d'une fenêtre.
2. Onglet **Rayons cosmiques** : durée 0 (sans limite), intervalle 10 min. Lancer la mesure le matin, l'arrêter le soir (au moins **4 h**).
3. Calculer $R_{12} = N_{12}/t$ et son incertitude $u(R_{12}) = \sqrt{N_{12}}/t$.
4. Calculer Φ avec $A = 7 \times 10^{-4}\,\mathrm{m^2}$ et $\varepsilon = 0{,}195$ (fraction des muons traversant le tube 1 qui traversent aussi le tube 2, obtenue par simulation Monte-Carlo pour un écart de 3 cm et une distribution en $\cos^2\theta$).
5. Comparer à la valeur de référence au niveau de la mer, $\Phi_{\text{réf}} \approx 170\,\mathrm{m^{-2}\,s^{-1}}$ (≈ 1 muon par cm² et par minute).

Résultat attendu



Mesure de 4 h 18 min (15 482 s) : $R_{12} = 0{,}019\,9\,\mathrm{s^{-1}}$, d'où $\Phi = \dfrac{0{,}0199}{0{,}195 \times 7 \times 10^{-4}} \approx$ **146 m^{-2} s^{-1}**, cohérent avec la référence (≈ 170) et avec les 135 mesurés au même lycée avec le cosmodétecteur.

Avec les élèves

- **Conversions d'unités** : passer de coups/min à $\mathrm{m^{-2}\,s^{-1}}$ puis à « muons par cm² et par minute ».
- **Ordre de grandeur :** combien de muons traversent la paume de la main (≈ 100 cm²) pendant ce cours ? (environ un à deux par seconde)
- **Monte-Carlo en Python** (T^le, NSI) : tirer des muons au hasard sur le tube 1 selon une loi en $\cos^2\theta$ et compter ceux qui touchent le tube 2. On retrouve $\varepsilon \approx 20\,\%$, et sa diminution quand l'écart augmente.
- Le graphique montre que l'incertitude relative décroît en $1/\sqrt{N}$: pourquoi faut-il mesurer longtemps ?

Pour aller plus loin

1. Ordre de grandeur : combien de muons traversent un élève debout (section horizontale ≈ 0,1 m²) chaque seconde ? (une quinzaine)

2. Mesurer le flux à plusieurs étages du lycée : les dalles de béton atténuent-elles le flux de manière mesurable ?

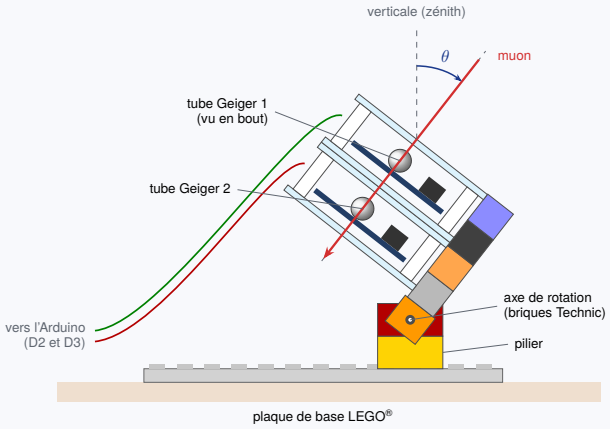
3. Recalculer ε pour un écart de 6 cm et vérifier la cohérence du flux obtenu avec les deux géométries.

A3 Distribution angulaire et relativité

Niveau : T^le (modélisation Python), post-bac **Durée :** 1 h par angle, 9 angles **Montage :** 2 tubes sur support inclinable

Objectif. Mesurer le nombre de coïncidences en fonction de l'angle θ au zénith, construire un modèle du flux de muons et montrer que seul le modèle relativiste (durée de vie dilatée $\gamma\tau_0$) décrit les données.

Schéma du dispositif (d'après le montage réel)

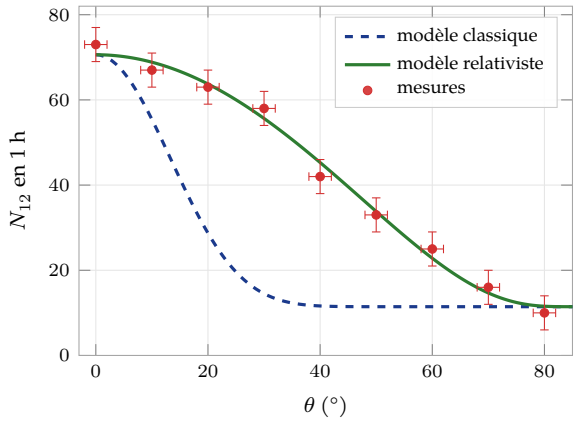


La pile est fixée sur une colonne de briques qui pivote autour d'une brique Technic : on règle l'angle θ entre l'axe de la pile et la verticale. Plus θ est grand, plus le trajet des muons dans l'atmosphère est long : $\ell = h/\cos\theta$.

Protocole

1. Fixer la pile de tubes sur un support inclinable (LEGO®, support imprimé en 3D gradué du détecteur autonome).
2. Pour $\theta = 0, 10, 20 \ldots 80°$, compter les coïncidences pendant **1 h** ; $u(\theta) = 2°$, $u(N) = \sqrt{N}$.
3. **Modèle classique :** $N(\theta) = N_0 \cos\theta \; \mathrm{e}^{-h/(v\tau_0 \cos\theta)}$ (absorption par l'air $\propto \cos\theta$, désintégration en vol), $h \approx 12\,\mathrm{km}$, $\tau_0 = 2{,}196\,\mu\mathrm{s}$.
4. **Modèle relativiste :** remplacer τ_0 par $\gamma\tau_0$, avec $\gamma = 1/\sqrt{1 - v^2/c^2}$.
5. Ajuster les deux modèles avec `curve_fit` (Python), en ajoutant une constante pour le bruit, et conclure.

Résultat attendu



Le modèle classique chute bien trop vite. L'ajustement relativiste donne $v = 0{,}998\,63\,c$, soit $\gamma = 19{,}1$ (du même ordre que Frisch et Smith, $\gamma \approx 9$; un détecteur amélioré a donné $\gamma = 8{,}4$).

Avec les élèves

- **Organisation :** 10 détecteurs, un angle par groupe pendant une heure ; ou une mesure par jour avec des élèves volontaires. Le Cosmodétecteur fait chaque point en 5 min.
- **Ressources prêtes :** TP élève « Modélisation du flux en fonction de l'angle » et tutoriel Python sur le site.
- Démarche de modélisation complète : hypothèse, modèle, ajustement, **réfutation** du modèle classique.
- **Esprit critique :** le modèle suppose des muons tous à la même vitesse et une altitude de production unique ; la valeur de γ est un ordre de grandeur, pas une mesure précise.

Pour aller plus loin

1. Sensibilité du modèle : refaire l'ajustement avec $h = 10\,\mathrm{km}$ puis $15\,\mathrm{km}$. Comment varie γ ? La conclusion change-t-elle ?

2. Ajuster les données par la loi empirique $a\cos^2\theta + b$ et comparer à l'ajustement physique.

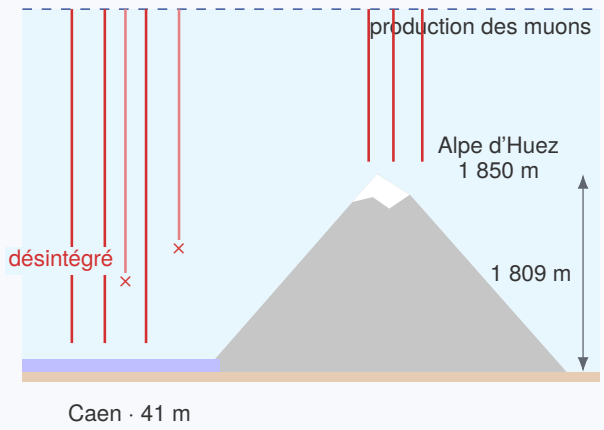
3. Calculer l'énergie correspondante $E = \gamma\, m_\mu c^2$ et la comparer à l'énergie moyenne des muons au sol (quelques GeV).

A4 Dilatation du temps : de la mer à la montagne

Niveau : T^le, Olympiades de physique **Durée :** quelques heures par site **Montage :** MicroCosmos autonome (batterie, écran, carte SD)

Objectif. Comparer le nombre de muons comptés à deux altitudes avec le même détecteur, et confronter le rapport mesuré aux prédictions de la physique classique et de la relativité restreinte, dans l'esprit de Rossi et Hall (1941) et de Frisch et Smith (1963).

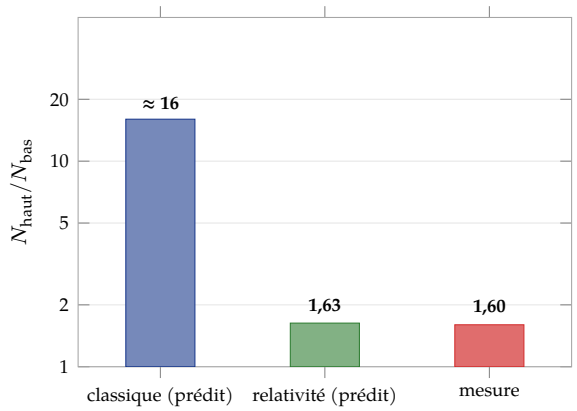
Schéma de l'expérience (altitudes non à l'échelle)



Protocole

1. Préparer le MicroCosmos autonome : batterie USB chargée, carte micro-SD, écran.
2. Mesurer plusieurs heures au lycée (ici Caen, 41 m) puis en altitude (Alpe d'Huez, 1 850 m) : **même détecteur, même géométrie**, à l'intérieur.
3. Exploiter les fichiers par intervalles de 2 min : moyenne et incertitude dans chaque site.
4. Corriger le comptage du bas de l'**absorption** par l'air supplémentaire ($\approx 15\,\%$) : $2{,}228/0{,}85 = 2{,}62$.
5. Calculer le rapport $N_{\text{haut}}/N_{\text{bas}}$ et le comparer aux deux prédictions : classique e^{t/τ_0} et relativiste $\mathrm{e}^{t/(\gamma\tau_0)}$, avec $t = \Delta h/v$.

Résultat attendu



Caen : $2{,}228 \pm 0{,}084$; Alpe d'Huez : $4{,}202 \pm 0{,}172$ coïncidences par 2 min. Rapport : $4{,}20/2{,}62 = \mathbf{1{,}60}$, très proche de la relativité (1,63), très loin de la physique classique (16).

Avec les élèves

- Projet idéal pour les **Olympiades de physique** (c'est un projet d'élèves de Caen qui a produit ces mesures).
- **Calcul guidé** : durée du trajet $t = 1809/c \approx 6\,\mu\text{s}$; combien de durées de vie τ_0 ? Pourquoi la physique classique prédit-elle un facteur 16 ?
- **Sortir du labo :** voyage scolaire en montagne, téléphérique, avion (taux bien plus élevés), ou bocal étanche au fond d'une piscine pour tester l'absorption par l'eau.
- Pour un voyage au CERN : emporter le détecteur et comparer Genève au Jura, ou à la ville du lycée.

Pour aller plus loin

1. Remonter à γ : à partir du rapport mesuré, $t/(\gamma\tau_0) = \ln 1{,}60 \approx 0{,}47$ avec $t \approx 6\,\mu\text{s}$, d'où $\gamma \approx 6$, soit une énergie de l'ordre de 0,6 GeV.

2. Quelle durée de mesure faut-il pour que l'incertitude sur le rapport soit inférieure à 5 % ?

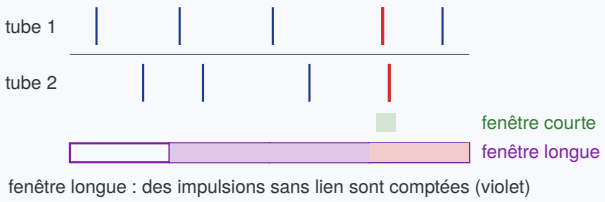
3. Pourquoi faut-il corriger l'absorption par l'air ? Que deviendrait la conclusion sans cette correction ?

A5 Jouer avec la fenêtre de coïncidence

Niveau : T^le, NSI, club scientifique **Durée :** 1 h par réglage **Montage :** 2 tubes ; programme Arduino modifié

Objectif. Modifier la durée de la fenêtre de coïncidence dans le code Arduino, prévoir puis mesurer le nombre de coïncidences fortuites $R_1 R_2 \tau$, et comprendre pourquoi les physiciens cherchent des fenêtres aussi courtes que possible.

Schéma : la fenêtre τ et les fortuites



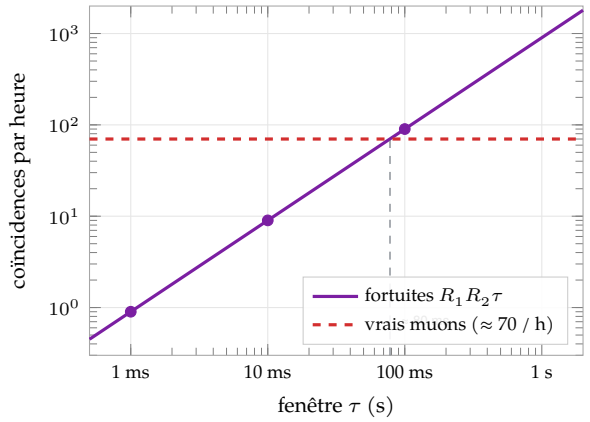
fenêtre longue : des impulsions sans lien sont comptées (violet)

$$R_{\text{fortuit}} = R_1 \, R_2 \, \tau$$

Protocole

1. Ouvrir `DetectionCosmiques3_0.ino` dans l'IDE Arduino. Repérer la boucle `for` de 1000 tranches et l'instruction `delay(1)`.
2. Remplacer par `delay(10)` avec 100 tranches (fenêtre de 10 ms), puis `delay(100)` avec 10 tranches (100 ms). Téléverser.
3. Pour chaque réglage, mesurer N_1, N_2, N_{12} pendant 1 h et calculer la valeur attendue $R_1 R_2 \tau$.
4. **Mesure directe des fortuites :** écarter les tubes côte à côte d'environ 1 m. Seules restent les fortuites : comparer à $R_1 R_2 \tau$.
5. Remettre le programme d'origine à la fin (onglet « Arduino et fichiers »).

Résultat attendu



Avec $R_1 \approx R_2 \approx 0{,}5\,\text{s}^{-1}$: environ 1 fortuite par heure pour 1 ms, 9 pour 10 ms, 90 pour 100 ms. Au-delà de 80 ms environ, les fortuites dépassent les vrais muons.

Avec les élèves

- **Prévoir avant de mesurer** : les élèves calculent $R_1 R_2 \tau$ à partir de leurs propres N_1 et N_2.
- **Rapport signal / bruit** : à partir de quelle fenêtre la mesure n'a-t-elle plus de sens ?
- Le **simulateur** du site montre la même chose en accéléré (fenêtres 1 ms, 10 ms, 100 ms, 1 s).
- **Comparaison :** le cosmodétecteur travaille avec une fenêtre de 100 ns, et les expériences du LHC avec des fenêtres de quelques nanosecondes, car les taux de comptage y sont immenses.
- Prolongement : ajouter un troisième tube sur une carte disposant de plus d'entrées d'interruption (coïncidence triple).

Pour aller plus loin

1. **Au LHC**, les paquets de protons se croisent toutes les 25 ns (40 millions de fois par seconde) : quelle fenêtre de coïncidence faut-il viser ?

2. Pour quels taux R_1, R_2 la fenêtre de 1 ms deviendrait-elle inutilisable (fortuites égales aux vrais muons) ? Approcher une source pour le tester.

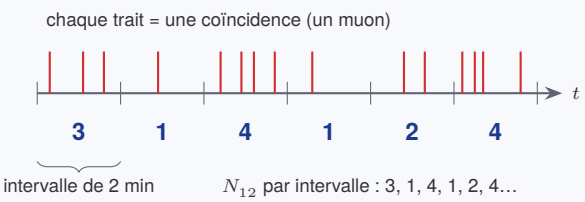
3. Modifier le programme pour qu'il compte aussi les fortuites en décalant les drapeaux d'une tranche (méthode du « retard »).

A6 Le hasard des comptages : la loi de Poisson

Niveau : 2de → Tle (mesure et incertitudes), maths **Durée :** mesure longue (une nuit), exploitation 1 h **Montage :** 2 tubes empilés

Objectif. Mettre en évidence le caractère aléatoire de l'arrivée des muons, construire l'histogramme des comptages, le comparer à la loi de Poisson et relier l'écart-type à la racine carrée de la moyenne.

Schéma : découper le temps en intervalles égaux



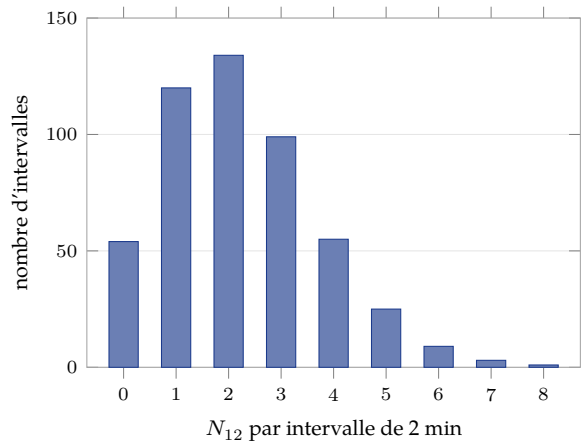
Pour une loi de Poisson de moyenne μ :

$$P(N=k) = \mathrm{e}^{-\mu}\,\frac{\mu^k}{k!} \text{ et } \sigma = \sqrt{\mu}.$$

Protocole

1. Onglet **Rayons cosmiques** : intervalle de comptage **120 s**, durée 0 (sans limite). Lancer la mesure en fin de journée.
2. Le lendemain, arrêter la mesure : on dispose de plusieurs centaines d'intervalles.
3. Afficher l'**histogramme** : le logiciel superpose la loi de Poisson de même moyenne.
4. Récupérer le fichier (onglet « Arduino et fichiers ») et, au tableur ou à la calculatrice, calculer la moyenne $\overline{N}$ et l'écart-type σ_{n-1}.
5. Comparer σ_{n-1} et $\sqrt{\overline{N}}$; écrire le résultat avec l'incertitude-type $\sigma_{n-1}/\sqrt{n}$.
6. **Variante :** recommencer avec des intervalles de 10 min et observer l'évolution de la forme de l'histogramme.

Résultat attendu



Histogramme attendu pour 500 intervalles de 2 min avec la moyenne mesurée à Caen, $\overline{N}_{12} = 2{,}23$: loi de Poisson dissymétrique, $\sigma \approx \sqrt{2{,}23} \approx 1{,}5$. Mesure de Caen : $N_{12} = 2{,}228 \pm 0{,}084$ par 2 min.

Avec les élèves

- Chaque groupe obtient une valeur **différente** : on regroupe les résultats de la classe au tableau pour discuter de la dispersion, avant même de parler de loi de probabilité.
- **Incertitude de type A** : $\overline{N} \pm \sigma_{n-1}/\sqrt{n}$; vérifier que l'incertitude diminue quand n augmente.
- En spécialité maths : la loi de Poisson comme limite de la loi binomiale (beaucoup d'« essais », faible probabilité).
- Avec des intervalles longs ($\overline{N}$ grand), l'histogramme devient symétrique et proche d'une gaussienne.
- Le même travail se fait sur la radioactivité (B1) : comparer les deux histogrammes.

Pour aller plus loin

1. **Probabilité de ne compter aucun muon** en 2 min : $\mathrm{e}^{-2{,}23} \approx 11\,\%$; la comparer à la fréquence observée sur l'histogramme.

2. Avec les lignes envoyées chaque seconde, mesurer la durée entre deux muons : elle suit une loi exponentielle de moyenne ≈ 50 s.

3. Comparer la dispersion de la classe (n groupes de 30 min) à celle d'une seule mesure longue.

PARTIE B · MICRO(K)OSMOS

La radioactivité

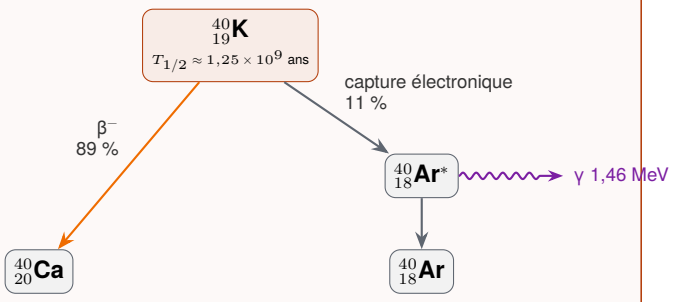
Le potassium 40 et les descendants du radon en classe, avec un seul tube Geiger et sans source scellée.

Le potassium 40, une source idéale

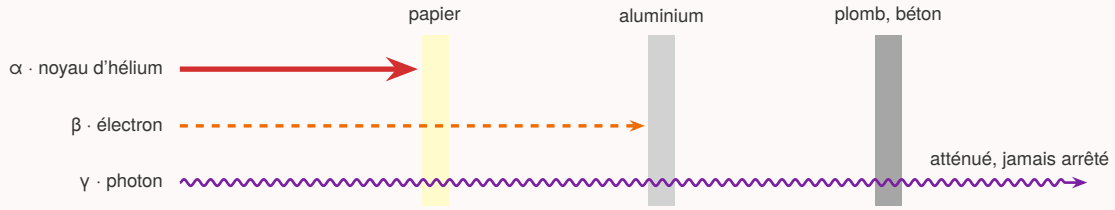
Les sources radioactives scellées étant trop actives ou interdites en classe, les expériences utilisent le **potassium 40**, présent à l'état de traces dans le potassium naturel (environ un dix-millième). Un simple sel suffit : le **chlorure de potassium KCl**, du laboratoire de chimie ou vendu comme sel de régime « sans sodium ».

Le potassium 40 est responsable de plus de la moitié de la radioactivité du corps humain (4 000 à 5 000 désintégrations par seconde pour 80 kg). Il se désintègre de **deux façons** : 89 % en calcium 40 par désintégration β^-, 11 % en argon 40 par capture électronique suivie d'un γ de 1,46 MeV.

Les deux voies de désintégration du potassium 40



Les rayonnements et ce qui les arrête



Le potassium 40 n'émet pas d'α : il émet des β (89 %) et des γ (11 %). Le pouvoir de pénétration permet de les distinguer avec un compteur Geiger et quelques écrans.

Le dispositif commun

- Un ordinateur, un Arduino Uno avec le shield Gravity, **un** module Geiger sur D2, le logiciel Microcosmos (onglet **Radioactivité**).
- Du KCl en poudre (une centaine de grammes) dans une boîte fermée, un système de levage (briques LEGO®, potence ou support élévateur), des écrans.
- **Durée conseillée :** séries de 30 mesures de 10 s (5 min). Pour étudier finement la distribution : une heure ou une nuit.
- Variante sans ordinateur : le **Micro(K)osmos autonome** affiche N, la moyenne, le nombre de mesures et la durée.

Sécurité

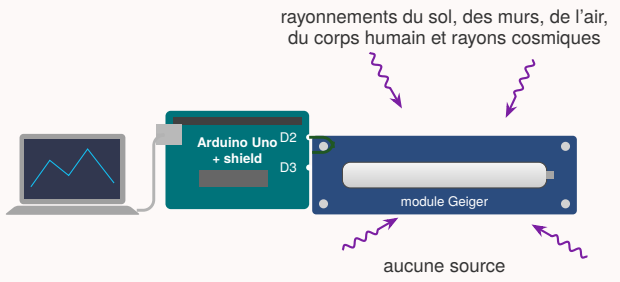
- Le KCl est peu dangereux ; le garder dans une boîte fermée et étiquetée pour éviter toute contamination du poste.
- Le **plomb** se manipule avec des gants (ou lavage des mains après usage).
- L'activité des sources utilisées reste très faible ; c'est l'occasion d'aborder la **radioprotection** : distance, écran, durée d'exposition.

B1 Le bruit de fond et les incertitudes

Niveau : 2de → Tle (mesure et incertitudes) **Durée :** 1 h (mesure 5 min) **Montage :** 1 tube, sans source

Objectif. Mesurer le bruit de fond radioactif de la salle, constater le caractère aléatoire des désintégrations, construire un histogramme et écrire un résultat avec son incertitude-type (type A). Cette valeur sert de référence pour toutes les expériences suivantes.

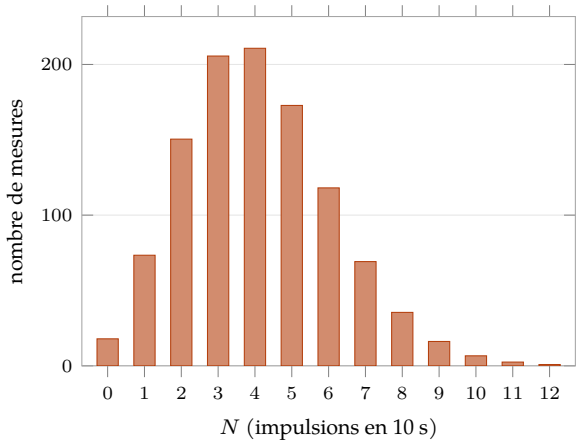
Schéma du montage



Protocole

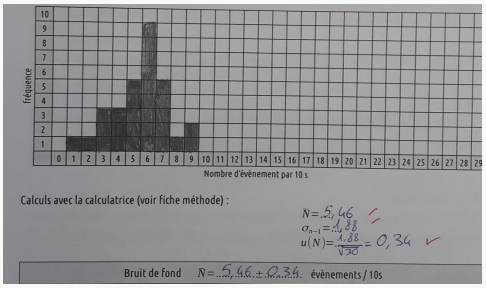
1. Brancher un module Geiger sur D2, éloigner toute source (le KCl reste dans l'armoire).
2. Onglet **Radioactivité** : série de **30 mesures** de 10 s (5 min).
3. Recopier le tableau sur la feuille de mesures (le logiciel l'affiche en colonnes de 10).
4. Tracer l'histogramme à la main (papier millimétré) : nombre de mesures en fonction de N.
5. Calculer à la calculatrice la moyenne $\overline{N}$ et l'écart-type σ_{n-1} (le logiciel ne les affiche volontairement pas).
6. Écrire le résultat : $N = \overline{N} \pm \dfrac{\sigma_{n-1}}{\sqrt{n}}$ impulsions par 10 s.

Résultat attendu



Histogramme attendu pour une mesure de 3 h (1 080 mesures) : $\overline{N} = 4{,}1 \pm 0{,}1$, $\sigma \approx 2{,}0 \approx \sqrt{\overline{N}}$. Sur une série de 30 mesures, l'histogramme est plus irrégulier : un élève a trouvé $N = 5{,}46 \pm 0{,}34$ par 10 s.

Avec les élèves



Histogramme tracé à la main par un élève.

- Deux groupes n'obtiennent jamais les mêmes valeurs : le **hasard** se voit directement.
- Mettre en commun les moyennes de la classe : sont-elles compatibles compte tenu des incertitudes ?
- Sur une mesure d'une nuit, ajuster l'histogramme par une gaussienne (maths, Python).
- Ressources : fiche « Activité en classe » et feuille de mesures sur le site.

Pour aller plus loin

1. Influence du nombre de mesures : comparer l'incertitude obtenue avec 30, puis 60 mesures. Combien en faudrait-il pour la diviser par deux ?

2. Comparer le bruit de fond de plusieurs salles du lycée, ou d'un sous-sol : les résultats sont-ils compatibles ?

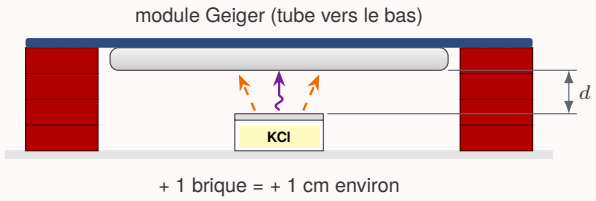
3. Le tube compte aussi les muons : quelle fraction du bruit de fond représentent-ils (voir A1) ?

B2 L'effet de la distance

Niveau : 1re enseignement scientifique, Tle **Durée :** 1 h (8 séries de 5 min) **Montage :** 1 tube, KCl, briques LEGO®

Objectif. Étudier l'évolution du comptage en fonction de la distance entre la source et le tube, et en tirer le premier principe de la radioprotection : s'éloigner des sources.

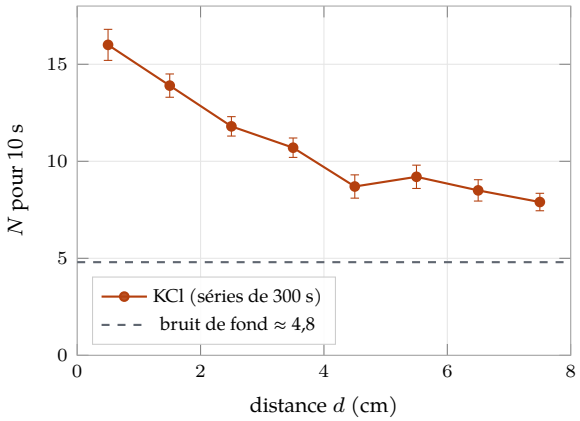
Schéma du montage (vue de face)



Protocole

1. Mesurer le bruit de fond (B1) si ce n'est pas déjà fait.
2. Poser la boîte de KCl sous le tube, la plus proche possible ($d \approx 0{,}5$ cm). Série de 30 mesures de 10 s.
3. Ajouter une brique LEGO® sous chaque appui du tube : la distance augmente d'environ 1 cm (montage stable et très reproductible). Nouvelle série.
4. Recommencer jusqu'à $d \approx 7{,}5$ cm.
5. Tracer $\overline{N}$ (avec barres d'incertitude) en fonction de d, puis $\overline{N} - N_{\text{fond}}$.

Résultat attendu



Le comptage passe d'environ 16 à 8 impulsions par 10 s entre 0,5 et 7,5 cm : il est divisé par deux en quelques centimètres. Au contact : $16{,}3 \pm 0{,}8$ par 10 s, soit $11{,}1 \pm 0{,}8$ une fois le bruit de fond retiré.

Avec les élèves

- **Radioprotection :** « s'éloigner des sources » devient une conclusion expérimentale.
- **Esprit critique :** tester la loi en $1/d^2$ (tracer $N - N_{\text{fond}}$ en fonction de $1/d^2$). Elle ne se vérifie pas simplement : la source est **étendue**, le tube aussi, et l'air absorbe une partie des β.
- Discuter de l'influence du bruit de fond à grande distance : la différence $N - N_{\text{fond}}$ devient comparable à son incertitude.
- Évaluation possible : refaire le protocole avec une autre source (sel de régime du commerce, manchon de lampe à gaz).

Pour aller plus loin

1. À quelle distance la source devient-elle **indiscernable** du bruit de fond, compte tenu des incertitudes ?

2. Remplacer la boîte par une petite quantité de sel dans un bouchon (source plus ponctuelle) et tester à nouveau la loi en $1/d^2$.

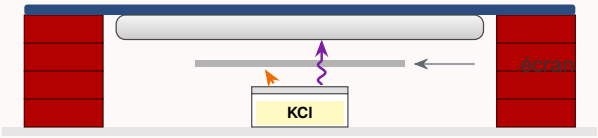
3. Faire le lien avec la signalisation des zones réglementées et le principe ALARA.

B3 Les écrans : papier, aluminium, plomb

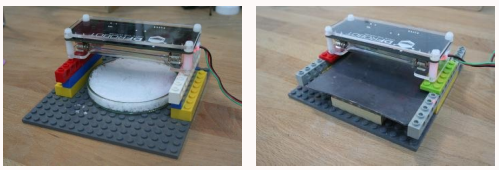
Niveau : 1re enseignement scientifique, Tle **Durée :** 1 h (6 séries de 5 min) **Montage :** 1 tube, KCl, écrans

Objectif. Identifier les rayonnements émis par le KCl grâce à leur pouvoir de pénétration, en glissant différents écrans entre la source et le tube sans changer la distance.

Schéma du montage



l'écran glisse dans une encoche, à distance fixe

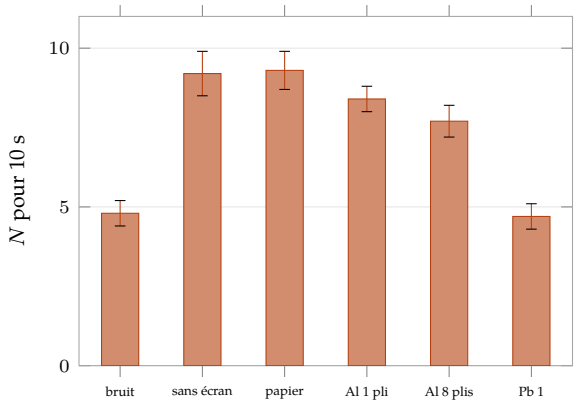


Sel dans une boîte de Petri sous le tube ; plaque de plomb posée sur la source.

Protocole

1. Régler une distance fixe source–tube (par exemple deux briques) et prévoir une encoche pour l'écran.
2. Mesurer le bruit de fond, puis le KCl **sans écran** (séries de 300 s).
3. Glisser successivement : une feuille de **papier** ; de l'**aluminium** alimentaire (1 pli, puis 8 plis) ; une plaque de **plomb** de 1,3 mm.
4. Pour chaque situation : moyenne et incertitude-type sur une série de 300 s.
5. Représenter les résultats par un diagramme en barres avec les incertitudes et conclure sur la nature des rayonnements.

Résultat attendu



Le papier ne change rien (pas d'α) ; l'aluminium fait baisser le comptage (absorption de β, il faut plusieurs plis) ; le plomb ramène presque au bruit de fond : le rayonnement détecté est surtout du β… mais pas uniquement (voir B4).

Avec les élèves

- Faire **prévoir** l'effet de chaque écran à l'aide du tableau des rayonnements, puis confronter.
- Les incertitudes sont indispensables : papier et « sans écran » sont **compatibles** ; Al 1 pli l'est presque. Que peut-on affirmer ?
- **Radioprotection :** deuxième principe, s'abriter derrière un écran (plomb, béton).
- Plomb : « presque » le bruit de fond. Ce petit écart prépare l'expérience B4 : les γ traversent le plomb.

Pour aller plus loin

1. Ajouter les plis d'aluminium un par un : combien en faut-il pour diviser le comptage dû aux β par deux ?

2. Comparer 50 g puis 100 g de KCl : le comptage est-il proportionnel à la masse de sel ?

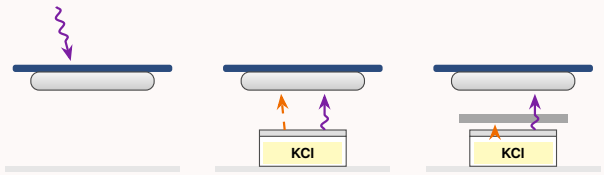
3. Pourquoi l'écran de plomb ne ramène-t-il pas *exactement* au bruit de fond ? (préparation de B4)

B4 Séparer β et γ : retrouver 89 % / 11 %

Niveau : T^le, Olympiades de physique **Durée :** 3 mesures de 3 h **Montage :** 1 tube, KCl, plomb 1,3 mm

Objectif. Utiliser un écran de plomb qui arrête les β et laisse passer la plupart des γ pour retrouver les proportions des deux voies de désintégration du potassium 40 (89,28 % de β^- et 10,72 % de capture électronique suivie d'un γ).

Schéma : trois situations



bruit de fond **bruit** | KCl sans écran **β + γ + bruit** | KCl + plomb **0,93 γ + bruit**

D'après les tables d'atténuation du NIST, 1,3 mm de plomb n'absorbe que 7 % des γ de 1,5 MeV : **93 % le traversent**.

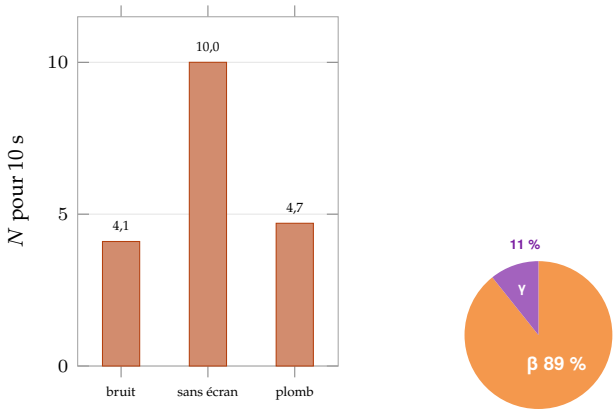
Protocole

1. Avec des séries de 5 min, les incertitudes sont trop grandes pour conclure : on mesure **3 h** par situation (intervalles de 10 s, une demi-journée ou une nuit chacune).
2. Situation 1 : bruit de fond seul. Situation 2 : KCl sous le tube. Situation 3 : KCl recouvert de la plaque de plomb, **même distance**.
3. Pour chaque fichier : histogramme, moyenne et incertitude (le logiciel ou Python).
4. Résoudre le système :

$$\gamma = \frac{N_3 - N_1}{0{,}93}, \qquad \beta = N_2 - N_1 - \gamma$$

5. Calculer les proportions $\beta/(\beta+\gamma)$ et $\gamma/(\beta+\gamma)$ et comparer aux valeurs tabulées.

Résultat attendu



$\gamma = (4{,}7 - 4{,}1)/0{,}93 \approx 0{,}65$; $\beta = 10{,}0 - 4{,}1 - 0{,}65 \approx 5{,}25$ (par 10 s). Proportions : **89 % de β et 11 % de γ**, pour 89,28 % et 10,72 % en théorie.

Avec les élèves

- Un résultat spectaculaire avec un sel de laboratoire et une chute de plomb de toiture : excellent sujet d'**Olympiades**.
- **Lecture de données scientifiques :** rechercher le coefficient d'atténuation du plomb dans les tables du NIST et calculer la fraction transmise $e^{-\mu x}$.
- **Incertitudes :** propager les incertitudes (ou les estimer par simulation Monte-Carlo) ; la précision de 11 % est-elle « chanceuse » ?
- Discuter des hypothèses : même efficacité du tube pour β et γ ? Rayonnement cosmique inchangé par le plomb ?

Pour aller plus loin

1. Retrouver les 93 % : pour le plomb à 1,5 MeV, $\mu/\rho \approx 0{,}052\,\text{cm}^2/\text{g}$ et $\rho = 11{,}35\,\text{g/cm}^3$; calculer $e^{-\mu x}$ pour $x = 1{,}3\,\text{mm}$.

2. Rendement de détection : le potassium naturel a une activité d'environ 31 Bq par gramme. Estimer l'activité de la boîte de KCl et la comparer au comptage.

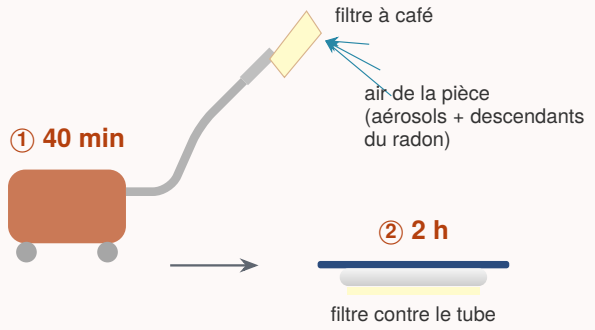
3. Refaire l'expérience avec deux épaisseurs de plomb : le calcul reste-t-il cohérent ?

B5 La demi-vie du radon : un aspirateur et un filtre à café

Niveau : T^le spécialité physique-chimie **Durée :** 40 min de collecte + 2 h de mesure **Montage :** 1 tube, aspirateur, filtre à café

Objectif. Recueillir les descendants solides du radon présents dans l'air d'une pièce et observer une décroissance radioactive en direct, ce qui est impossible avec le potassium 40 ($T_{1/2} \approx 1{,}25$ milliard d'années).

Schéma de l'expérience

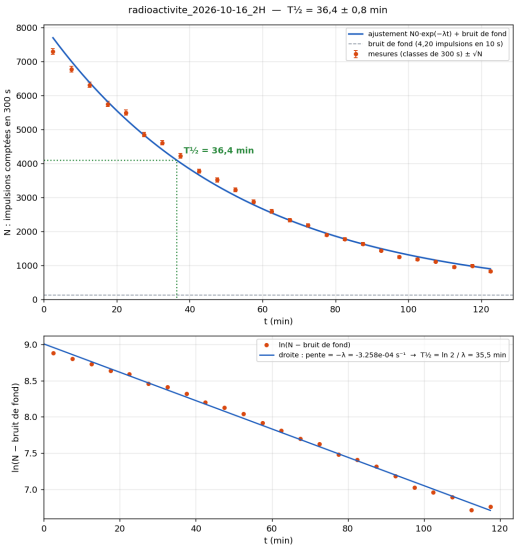


Le radon 222, gaz noble issu de l'uranium des murs et du sol, traverse le filtre ; ses descendants (polonium, plomb, bismuth), métalliques, sont fixés sur les poussières retenues par le filtre. Le Geiger compte surtout les β^- du **plomb 214** (26,8 min) et du **bismuth 214** (19,9 min).

Protocole

1. Onglet **Demi-vie (radon)** : mesurer le **bruit de fond**, tube seul, 5 à 20 min.
2. Fixer un filtre à café sur le tube de l'aspirateur (élastique). Aspirer l'air d'une pièce **peu aérée** (sous-sol, chambre, local fermé) pendant 30 à 60 min.
3. Arrêter l'aspirateur, poser aussitôt le filtre, face chargée contre le tube, et **lancer la mesure** (2 h conseillées).
4. Regrouper les mesures de 10 s en classes de 300 s ; observer la courbe $N = f(t)$ et l'ajustement exponentiel.
5. Tracer $\ln(N - N_{\text{fond}})$ en fonction de t et mesurer la pente par tranches de 30 min.

Résultat obtenu le 16 octobre 2026 (chambre mansardée)



Ajustement par une exponentielle : $T_{1/2} = 36{,}4 \pm 0{,}8$ min, plus que les 26,8 min du plomb 214. La courbe de $\ln(N - N_{\text{fond}})$ est légèrement **bombée** : ≈ 41 min entre 0 et 30 min, ≈ 35 min entre 60 et 120 min. On mesure une **demi-vie apparente** (voir B6).

Avec les élèves

- **Fiche élève prête** (4 pages) : équations de désintégration, filiation, exploitation, « pour aller plus loin ».
- **Questions possibles :** pourquoi le radon n'est-il pas sur le filtre ? Pourquoi le polonium 218 (3,1 min) a-t-il disparu après 15 min ($5\,T_{1/2}$) ? Rapport des activités du plomb 214 et du plomb 210 pour un même nombre de noyaux ($\approx 4 \times 10^5$).
- **Santé publique :** le radon est la 2^e cause de cancer du poumon en France (niveau de référence 300 Bq m^{-3}). Comparer une salle aérée, une cave, une chambre : pourquoi aérer chaque jour ?
- Le filtre ne présente aucun danger : son activité, très faible, disparaît en quelques heures.

Pour aller plus loin

1. Projet de classe : chaque groupe aspire dans une pièce différente (cave, salle de TP, chambre) avec la même durée : comparer les comptages au début de la mesure.

2. Aspirer 20 min puis 60 min : l'activité initiale du filtre est-elle proportionnelle à la durée de collecte ? Pourquoi pas tout à fait ?

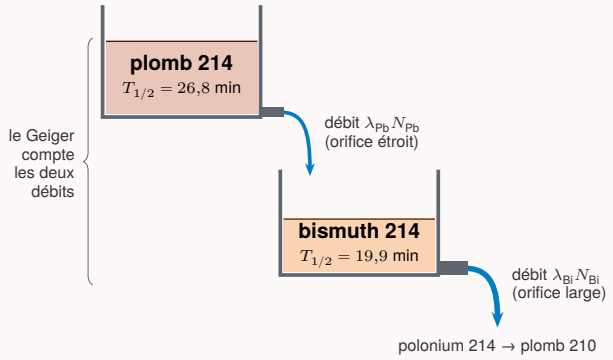
3. Mesurer après avoir aéré la pièce 10 min : effet immédiat de l'aération.

B6 Filiation radioactive : la demi-vie apparente

Niveau : T^le spécialité physique-chimie (+ spécialité maths) **Durée :** 1 h à 2 h **Montage :** aucun (données de B5, Python ou tableur)

Objectif. Expliquer par la filiation plomb 214 → bismuth 214 pourquoi la décroissance mesurée en B5 n'est pas une simple exponentielle, en modélisant numériquement les deux populations de noyaux (méthode d'Euler) et en comparant au résultat expérimental.

Schéma : deux bassins en cascade



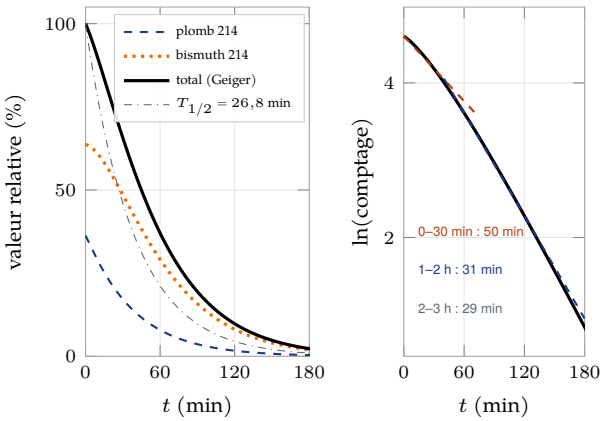
$$\frac{dN_{Pb}}{dt} = -\lambda_{Pb} N_{Pb} \qquad \frac{dN_{Bi}}{dt} = \underbrace{\lambda_{Pb} N_{Pb}}_{\text{formés}} - \underbrace{\lambda_{Bi} N_{Bi}}_{\text{désintégrés}}$$

Le bassin du bismuth 214 se vide par son propre orifice **et se remplit** en permanence avec l'eau du bassin du plomb 214.

Protocole (activité de modélisation)

1. Calculer $\lambda_{Pb} = \ln 2/26{,}8$ et $\lambda_{Bi} = \ln 2/19{,}9$ (en min^{-1}).
2. Écrire la **méthode d'Euler** (pas $\Delta t = 0{,}1$ min) pour N_{Pb} et N_{Bi}, en Python ou au tableur (programme en annexe), en partant des proportions présentes sur le filtre à la fin de la collecte.
3. Calculer le comptage total $A_{Pb} + A_{Bi}$ et tracer son logarithme.
4. Mesurer la pente par tranches de temps ; en déduire les demi-vies apparentes et remplir le tableau « Mes résultats » de la fiche.
5. Comparer au résultat expérimental de B5 (41 min puis 35 min).
6. **Spécialité maths :** vérifier que la solution de Bateman satisfait l'équation différentielle ; montrer qu'aux temps longs $A_{Bi}/A_{Pb} \to \lambda_{Bi}/(\lambda_{Bi} - \lambda_{Pb}) \approx 3{,}9$.

Résultat attendu (modèle)



Modèle calculé avec les demi-vies réelles, après 40 min de collecte. Le comptage décroît plus lentement que chacun des deux noyaux pris seul. La demi-vie apparente passe de ≈ 50 min à 31 puis 29 min et tend vers 26,8 min (**équilibre de filiation**), qui ne s'installe qu'au bout de quelques heures ($\tau = 1/(\lambda_{Bi} - \lambda_{Pb}) \approx 1$ h 50).

Avec les élèves

- **Image des bassins en cascade** : le bassin du bismuth est rempli presque aussi vite qu'il se vide, son niveau baisse lentement.
- **À retenir :** une demi-vie mesurée sur un mélange « parents » et « enfants » est une **demi-vie apparente** ; le « ±0,8 min » de l'ajustement ne mesure que le hasard des comptages, pas l'erreur due à un modèle trop simple.
- **Écarts modèle–mesure :** proportions de plomb et de bismuth sur le filtre, efficacité de détection différente des β (bismuth plus énergétique), descendants du thoron (plomb 212, 10,6 h).
- **Prolongement expérimental :** mesurer 4 à 5 h pour voir la demi-vie apparente se rapprocher de 26,8 min.

Annexe 1 — Les programmes

Coïncidence logicielle (extrait de `DetectionCosmiques3_0`)

```
volatile int Etat1, Etat2;        // un drapeau par tube
void GeigerISR1(){ Impulsion1++; Etat1 = 1; } // tube 1
void GeigerISR2(){ Impulsion2++; Etat2 = 1; } // tube 2

// dans setup() : broches 2 et 3, front descendant
attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(2), GeigerISR1, FALLING);
attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(3), GeigerISR2, FALLING);

void loop(){
  for (int t = 0; t < 1000; t++){  // bilan chaque seconde
    delay(1);                      // fenêtre de 1 ms
    if (Etat1 == 1 && Etat2 == 1) N12++;  // un muon
    Etat1 = 0; Etat2 = 0;          // on baisse les drapeaux
  }
  // ... envoi de Impulsion1, Impulsion2, N12, temps écoulé
}
```

Ce qu'il faut faire remarquer

- Les **interruptions** réagissent immédiatement à chaque impulsion, même pendant `delay(1)` : aucun coup n'est perdu.
- Les drapeaux sont relus puis remis à zéro **toutes les millisecondes** : c'est la fenêtre de coïncidence.
- Pour l'activité A5, on remplace `delay(1)` par `delay(10)` et la borne 1000 par 100 (fenêtre de 10 ms, bilan toujours chaque seconde).
- Le programme envoie chaque seconde une ligne : N_1, N_2, N_{12}, temps écoulé. Il sert à toutes les études (un tube sur D2 suffit pour la radioactivité).
- Téléversement en un clic, sans IDE, depuis l'onglet « Arduino et fichiers » du logiciel Microcosmos.

Méthode d'Euler pour la filiation plomb 214 → bismuth 214 (activité B6)

```
import numpy as np, matplotlib.pyplot as plt

lPb, lBi = np.log(2)/26.8, np.log(2)/19.9      # constantes radioactives (min^-1)
NPb, NBi = 1.0, 0.8                            # proportions sur le filtre à t = 0 (à ajuster)
dt, T = 0.1, 180                               # pas et durée (min)
t, A = [], []
for k in range(int(T/dt)):
    t.append(k*dt)
    A.append(lPb*NPb + lBi*NBi)                # comptage total (même efficacité pour les deux β)
    dNPb = -lPb*NPb*dt
    dNBi = (lPb*NPb - lBi*NBi)*dt              # formés - désintégrés
    NPb, NBi = NPb + dNPb, NBi + dNBi
t, A = np.array(t), np.array(A)

for a, b in [(0, 30), (60, 120), (120, 180)]:  # demi-vies apparentes par tranche
    i, j = int(a/dt), int(b/dt) - 1
    pente = (np.log(A[j]) - np.log(A[i])) / (t[j] - t[i])
    print(f"{a}-{b} min : T1/2 apparente = {-np.log(2)/pente:.1f} min")

plt.plot(t, np.log(A)); plt.xlabel("t (min)"); plt.ylabel("ln(comptage)"); plt.show()
```

Les élèves font varier les proportions initiales $N_{\mathrm{Pb}}(0)$ et $N_{\mathrm{Bi}}(0)$ (et éventuellement des efficacités de détection différentes) pour s'approcher des demi-vies apparentes mesurées (41 min puis 35 min).

Annexe 2 — Données et ressources

Physique des muons et du détecteur

Durée de vie du muon τ_0	2,196 µs
Masse du muon	$\approx 207\ m_e$ (105,7 MeV/c^2)
Flux (niveau de la mer)	≈ 170 m^{-2} s^{-1}
Altitude de production	10 à 15 km
Surface du tube M4011	≈ 7 cm^2
Écart entre les tubes	≈ 3 cm
Acceptance (écart 3 cm)	$\approx 19{,}5$ %
Fenêtre de coïncidence	1 ms
Impulsion du module	5 V → 0 V, $\approx 0{,}3$ ms
Taux d'un tube seul	0,4 à 0,5 s^{-1}
Coïncidences (mer)	$\approx 1{,}2$ min^{-1}

Demi-vies et désintégrations

Noyau	Désintégration	$T_{1/2}$
^{40}K	β^- 89,28 % ; CE + γ 10,72 %	$1{,}25 \times 10^9$ ans
^{238}U	α	$4{,}5 \times 10^9$ ans
^{226}Ra	α	1 600 ans
^{222}Rn	α	3,82 j
^{218}Po	α	3,05 min
^{214}Pb	β^- (jusqu'à 1 MeV)	26,8 min
^{214}Bi	β^- (jusqu'à 3,3 MeV)	19,9 min
^{214}Po	α	164 µs
^{210}Pb	β^-	22,2 ans
^{212}Pb	β^-	10,6 h

Sur le site mucosmos.github.io

- **Logiciel Microcosmos** : version web, paquet Linux, Windows / macOS, notice de 9 pages.
- **Le détecteur** : matériel, schémas de câblage, simulateur de coïncidence, versions autonomes.
- **Rayons cosmiques** : TP « Modélisation du flux en fonction de l'angle », tutoriel Python, activité de découverte, fiche QuarkNet (en anglais).
- **Radioactivité** : activité en classe, feuille de mesures, évaluation (parties pratique et théorique), fiche « Le radon piégé par un aspirateur ».
- **Cosmodétecteur** : nouveau logiciel libre de pilotage et d'étalonnage.
- **Ressources** : diaporamas, articles, livres, liens.

Articles

- C. Vanden Driessche, « MicroCosmos – Partie 1 : un détecteur de particules à base d'Arduino », *Bull. Un. Prof. Phys. Chim.*, vol. 118, n° 1068, p. 907-922, novembre 2024.
- C. Vanden Driessche, « Micro(K)osmos – Partie 2 : étude expérimentale de la radioactivité du potassium (^{40}K) en classe à l'aide d'un Arduino et d'un compteur Geiger », *Bull. Un. Prof. Phys. Chim.*, vol. 118, n° 1069, p. 1033-1048, décembre 2024.
- C. Vanden Driessche, « Astronomie multimessagers en classe, les rayons cosmiques : tester la dilatation du temps », *Cahiers Clairaut*, n° 194, été 2026.
- C. Vanden Driessche, « Astronomie multimessagers en classe, ondes gravitationnelles et radioastronomie », *Cahiers Clairaut*, n° 194, été 2026.

Contact

Cédric Vanden Driessche — professeur de physique-chimie, lycée Charles de Gaulle, Caen

cedric.vanden-driessche@ac-normandie.fr · mucosmos.github.io

Logiciels, programmes et documents sous licence GNU GPL v3. Les mesures présentées ont été réalisées au lycée Charles de Gaulle (Caen) et à l'Alpe d'Huez.