

Le muon :

Chronique

d'une mort annoncée

Nicolas Auvray

Anatole Denis

Léo Lhuissier

Rémi Malet

Hugo Renault

Patrick Saux

Elèves de terminale au lycée Saint Joseph – Le Havre.

Résumé

Au Havre, au lycée Saint Joseph, nous avons la possibilité d'utiliser un détecteur de particules cosmiques, prêté par Sciences à l'Ecole. Depuis un an nous avons beaucoup appris grâce à ce matériel et nous avons souhaité présenter une expérience sur le muon aux Olympiades de la Physique : Mesurer le « temps de vie » du muon.

En effet, le muon, particule issue du rayonnement cosmique, a une durée de vie limitée et sa détection relève de l'aléatoire. Mais en comprenant (au moins en partie) ses propriétés et en utilisant les caractéristiques du détecteur, nous avons pu approcher la valeur « couramment admise » du temps de vie du muon. Une valeur si petite que seule la théorie de la relativité peut expliquer que cette durée permette au muon de traverser l'atmosphère.

Sommaire

Résumé	2
I. Le rayonnement cosmique et les muons	4
1. Les premières détections	4
2. La gerbe cosmique.....	4
3. Quelles origines ?	5
II Comment détecter un muon ?	6
1. Le matériel prêté par Sciences à l'Ecole	6
2. A la base de la détection, l'effet Tcherenkov	7
3. Amplification du signal	7
III La durée de vie du muon : la mesure est-elle possible ?.....	8
1. L'expérience et son principe	8
2. Comment traiter les résultats ?	9
3. Les différentes acquisitions et leurs exploitations.....	11
4. Interprétations de cette expérience.....	14
5. Conclusions et interrogation	15
IV La relativité restreinte	16
1. Les postulats de la théorie classique	16
2. La théorie de la relativité.....	16
3. Application au muon	17
Conclusion	19

I. Le rayonnement cosmique et les muons

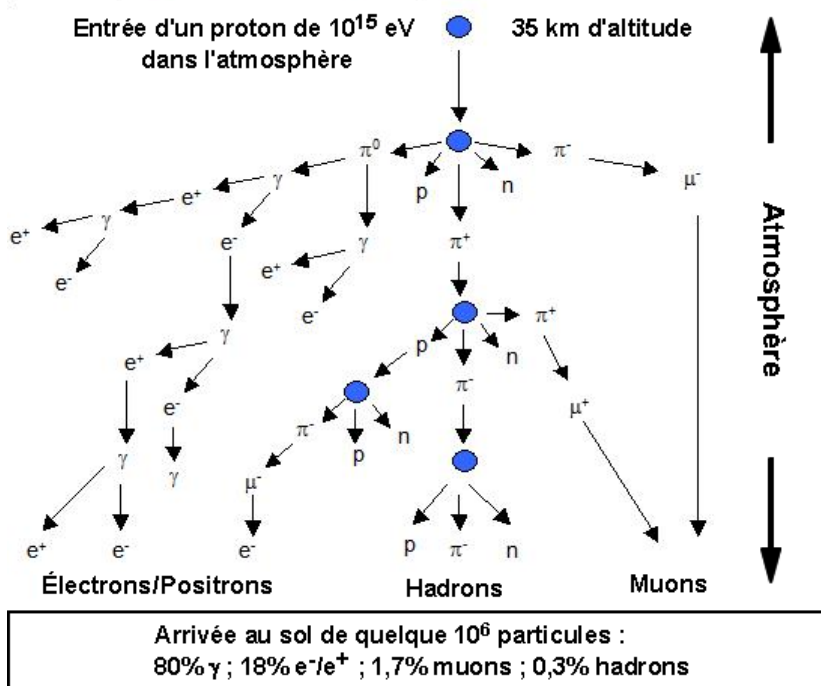
Une rapide présentation des particules que nous détectons nous a paru nécessaire à la cohérence de notre exposé.

1. Les premières détections

Au début du XXème siècle, peu après la découverte de la radioactivité, on s'est aperçu qu'un rayonnement ionisant était systématiquement détecté et provenait en grande partie de l'espace. Différentes études, notamment celles de Pierre Auger dans les années 20 à 30, ont alors permis d'établir que ce que l'on détectait au sol était le résultat de multiples interactions entre la haute atmosphère et des particules chargées électriquement, arrivant avec une très grande énergie.

2. La gerbe cosmique

En arrivant sur Terre, les rayons cosmiques (principalement des protons) entrent en collision avec les atomes de l'atmosphère. Pour un proton suffisamment énergétique, une multitude d'événements sont possibles et conduisent à la formation d'une véritable gerbe de particules. En étudiant ces gerbes, les physiciens ont découvert de nombreuses particules comme le positon, le pion et le muon. Mais c'est ce dernier que l'on retient comme témoin du rayonnement cosmique, d'autant qu'il est le plus pénétrant car le moins interactif avec la matière. Cependant, il a une durée de vie limitée. Il se désintègre en produisant un électron, ce qui nous sera bien utile.



Exemple de gerbe cosmique – crédit : Wikipédia -

3. Quelles origines ?

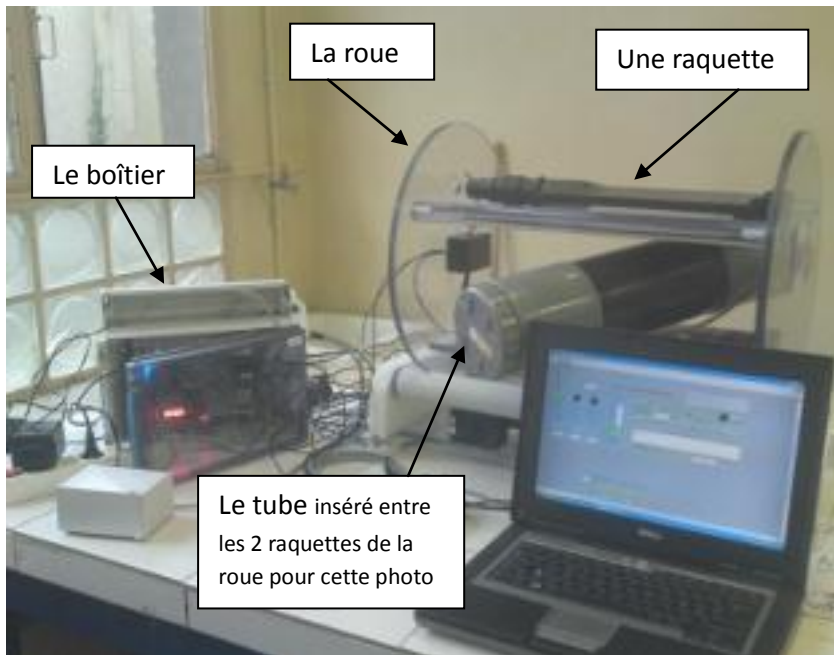
Les rayons cosmiques peuvent provenir de différentes sources : éruptions solaires, explosions de supernovae ou noyaux actifs de galaxies. Ces phénomènes plus ou moins violents projettent effectivement des particules dans l'espace.

Le Soleil est en partie responsable du rayonnement observé sur Terre mais les rayons cosmiques les plus énergétiques sont d'origine extrasolaire et on pense qu'ils sont accélérés par des champs magnétiques résultant d'explosions de supernovae dans notre galaxie. Cependant, cela n'explique pas la très haute énergie de certains d'entre eux et des expériences sont encore en cours à ce sujet.

II Comment détecter un muon ?

1. Le matériel prêté par Sciences à l'Ecole

La « roue cosmique » et le « tube » ont été développés par José Busto au Centre de Physique des Particules de Marseille. Le dispositif est composé de plusieurs éléments :



- Un ensemble de 3 raquettes dont 2 sur la roue, qui sont des détecteurs.
- Le tube, qui permet la mesure du temps de vie du muon.
- Le boîtier qui sert d'interface entre les détecteurs et l'ordinateur.
- Le logiciel qui traite les données en fonction des paramètres choisis.

Les 2 raquettes de la roue



Le tube

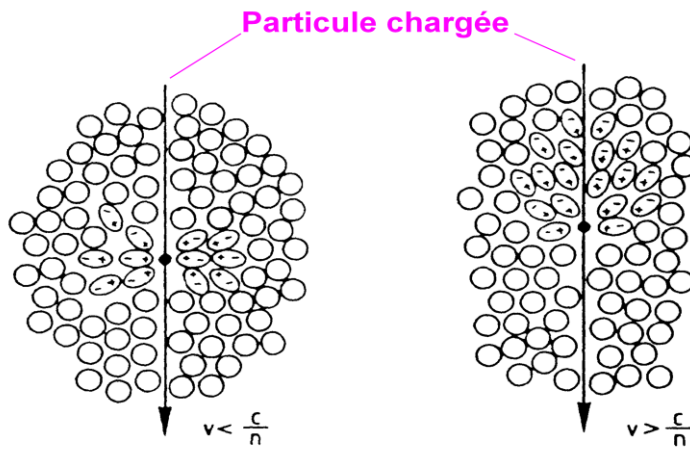


Le boîtier



2. À la base de la détection, l'effet Tcherenkov.

Le passage des particules chargées à travers la matière donne lieu à des interactions de nature diverses, et l'une d'elles, à l'origine d'une émission de radiations électromagnétiques, est appelée « Effet Tcherenkov ». Dans les milieux transparents, cet effet apparaît sous la forme d'un éclair de lumière à condition que la vitesse de la particule soit plus grande que celle de la lumière dans ce milieu.



à condition que la vitesse de la particule soit plus grande que celle de la lumière dans ce milieu.

L'émission de lumière permet au milieu de retrouver sa stabilité après la perturbation engendrée par le passage de la particule.

Crédit : José Busto (CPPM)

Comme le muon est une particule chargée et que sa vitesse avoisine celle de la lumière dans le vide, on peut le détecter dans la matière en utilisant l'effet Tcherenkov. Mais le matériau utilisé doit avoir certaines caractéristiques : on l'appelle scintillateur.

3. Amplification du signal

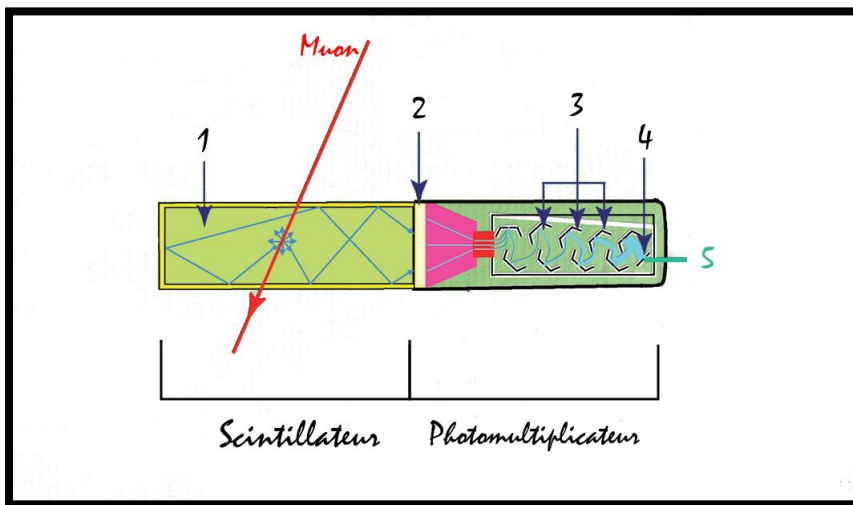


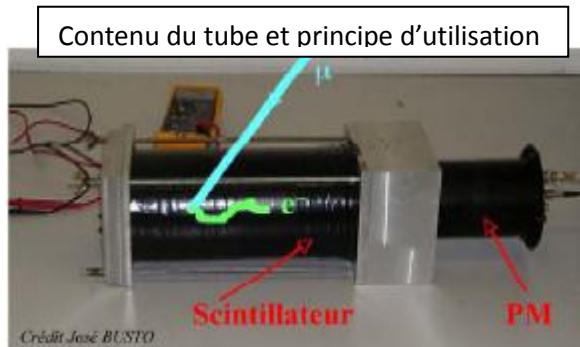
Schéma de principe d'un détecteur. Crédit : José Busto (CPPM)

Tout d'abord, dans le scintillateur, un muon va entrer et émettre une lumière Tcherenkov (en bleu). Les parois du scintillateur vont réfléchir cette lumière (1) jusqu'à ce qu'elle rencontre la photocathode (2). La photocathode transforme le signal lumineux en électron, par effet photoélectrique, qui va être envoyé dans le réseau de dynodes (3). Là, le signal va être amplifié par une haute tension (environ 2000 V) : l'électron émis par la photocathode est accéléré, ce qui lui permet d'arracher d'autres électrons aux dynodes ; cette étape donne son nom au dispositif, c'est la photomultiplication. Une fois les électrons acheminés jusqu'à l'anode (4), on obtient le signal électrique (5) que l'on envoie vers le boîtier – interface.

III La durée de vie du muon : la mesure est-elle possible ?

1. L'expérience et son principe

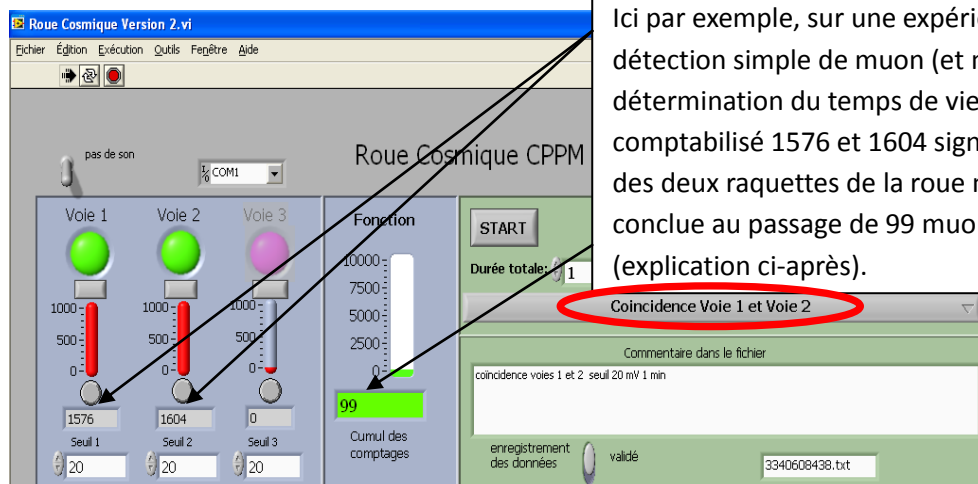
Nous tenterons de détecter l'électron émis lors de la désintégration d'un muon. Pour cela nous utiliserons « le tube » qui est un détecteur du même type que les raquettes mais dont le scintillateur est capable de ralentir un muon jusqu'à l'arrêter.



Lorsqu'un muon entre dans ce tube il est détecté : à partir de cet instant une horloge est lancée jusqu'à ce qu'on détecte un électron dans le tube qui est le produit de la désintégration du muon détecté précédemment. La détection de l'électron arrête l'horloge du système.

On peut donc savoir à quel instant t_1 le muon est entré dans le tube et à quel instant t_2 il s'est désintégré, on peut donc calculer la durée de vie $t_2 - t_1$ du muon à partir du moment où il a été détecté, ce que le programme fait directement pour nous.

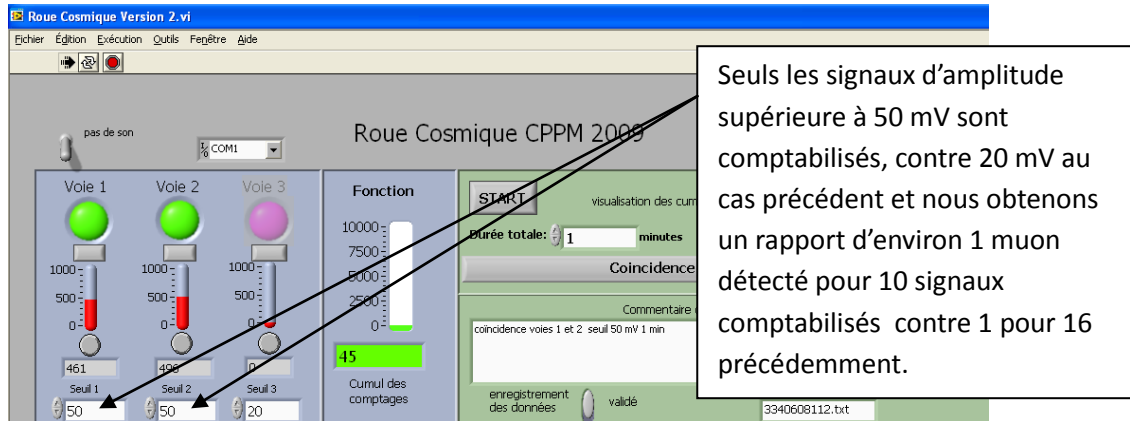
Cependant, des mesures effectuées avec la roue cosmique nous ont montré qu'un détecteur seul ne pouvait pas assurer la détection d'un muon, en raison du « bruit de fond » généré par le photomultiplicateur associé au scintillateur. Malheureusement, le logiciel nous autorise à n'utiliser qu'une seule voie, le « tube », pour effectuer l'expérience pour déterminer la durée de vie du muon.



Ici par exemple, sur une expérience de détection simple de muon (et non de détermination du temps de vie), on a comptabilisé 1576 et 1604 signaux en sortie des deux raquettes de la roue mais le logiciel conclue au passage de 99 muons seulement (explication ci-après).

En effet, la roue cosmique comptabilise de nombreux signaux mais seulement quelques uns sont retenus grâce au principe de coïncidence que le logiciel utilise, c'est-à-dire que les deux raquettes doivent détecter un même muon dans un intervalle de 100ns et grâce au seuil de détection qui ne prend en compte que les signaux d'une certaine intensité, sur cet exemple, les signaux supérieurs à 20mV.

Lors de notre expérience, le principe de coïncidence ne peut donc pas être pris en compte puisque nous utilisons une seule voie. Mais en imposant un seuil de détection suffisant, on peut réduire en partie ce bruit de fond, car on élimine tous les signaux inférieurs à ce seuil.



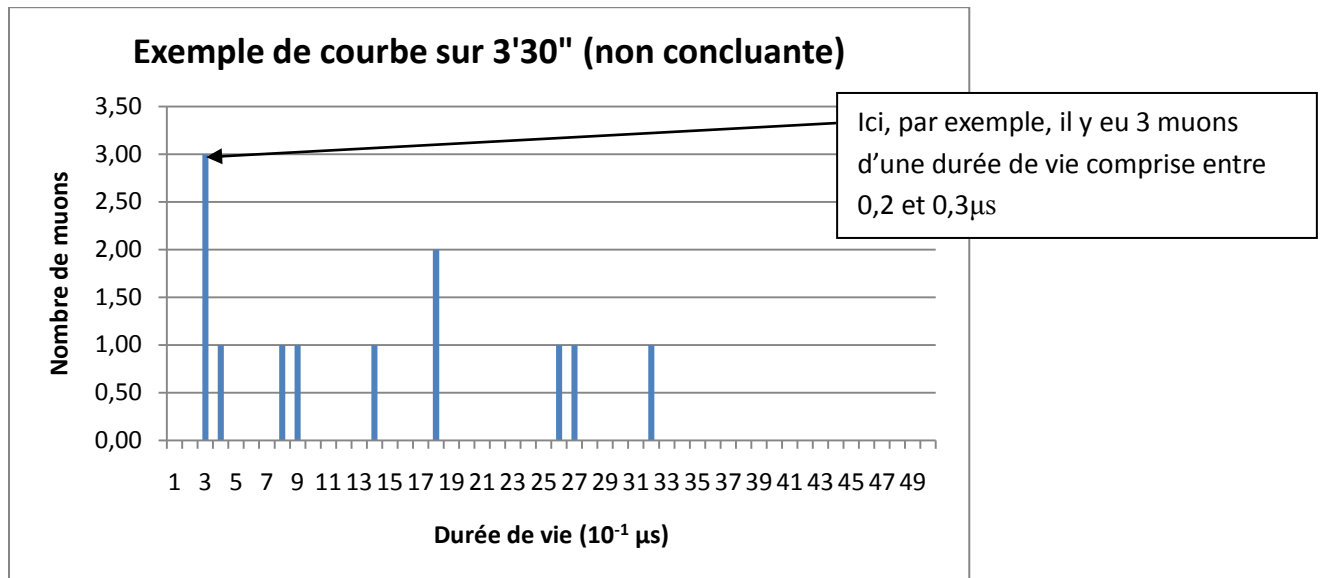
On ne peut malheureusement pas supprimer le bruit de fond sans diminuer considérablement le nombre de muons détectés. Il faudra donc traiter les résultats en conséquence, même si, d'après José Busto, le seuil de 50 mV représente seulement 10% de la valeur moyenne du signal laissé par un muon, c'est-à-dire 500mV, mais ceci n'est qu'une moyenne. En effet, selon le scientifique Gérard Tristram 40% des muons laissent des signaux de moins de 50mV.

Cela signifie que l'on peut mesurer d'autres particules que le muon, mais grâce au seuil et au fait que la détection d'un muon se fait également par la détection de l'électron associé à sa désintégration, on limite au maximum le nombre de particules parasites détectées.

2. Comment traiter les résultats ?

On obtient, après l'expérience un tableau. Ce tableau nous présente la durée de vie de chaque muon détecté par la roue cosmique.

Heure	Durée de vie		
13:19:07	4,44	13:20:46	362,96
13:19:12	1,79	13:20:57	0,22
13:19:14	0,35	13:20:59	0,23
13:19:18	291,69	13:21:15	0,84
13:19:24	74,92	13:21:37	586,24
13:19:26	2,57	13:21:38	247,74
13:19:28	0,24	13:21:44	530,84
13:19:32	608,79	13:21:49	142,64
13:19:50	2,64	13:21:52	172,97
13:19:57	106,88	13:21:54	488,9
13:20:13	1,75	13:22:10	0,25
13:20:17	0,75	13:22:23	1,33
13:20:21	34,07	13:22:33	0,23
13:20:30	0,23	13:22:37	3,12



Ce tableau est mis sous forme de graphique où on range les muons par classe de durée de vie, par exemple la classe de 0μs à 0,10μs. Nous obtenons alors le tableau ci-dessous.

Nos expériences ont commencé par des mesures rapides sur 5, 10 ou 15 min pour mieux comprendre le fonctionnement de l'appareil mais très vite nous nous sommes aperçus que l'expérience devait se faire sur une durée beaucoup plus longue comme 24 ou 48 heures car autrement les résultats étaient inutilisables.

Mais avant toute chose, il faut ajouter qu'on ne peut pas véritablement parler de temps de vie pour un muon. En effet, le muon est un élément radioactif donc sa désintégration est un phénomène aléatoire que l'on ne peut prévoir. Il peut aussi bien « vivre » 0,01μs que 25μs. Seulement étant une particule radioactive, sur une population importante, des lois s'appliquent comme la loi de décroissance radioactive :

$$N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda t}$$

où N_0 représente une population de noyaux radioactifs présents à $t = 0$;
 $N(t)$ représente le nombre de noyaux radioactifs restants à la date t ;
 λ représente la constante radioactive du noyau concerné.

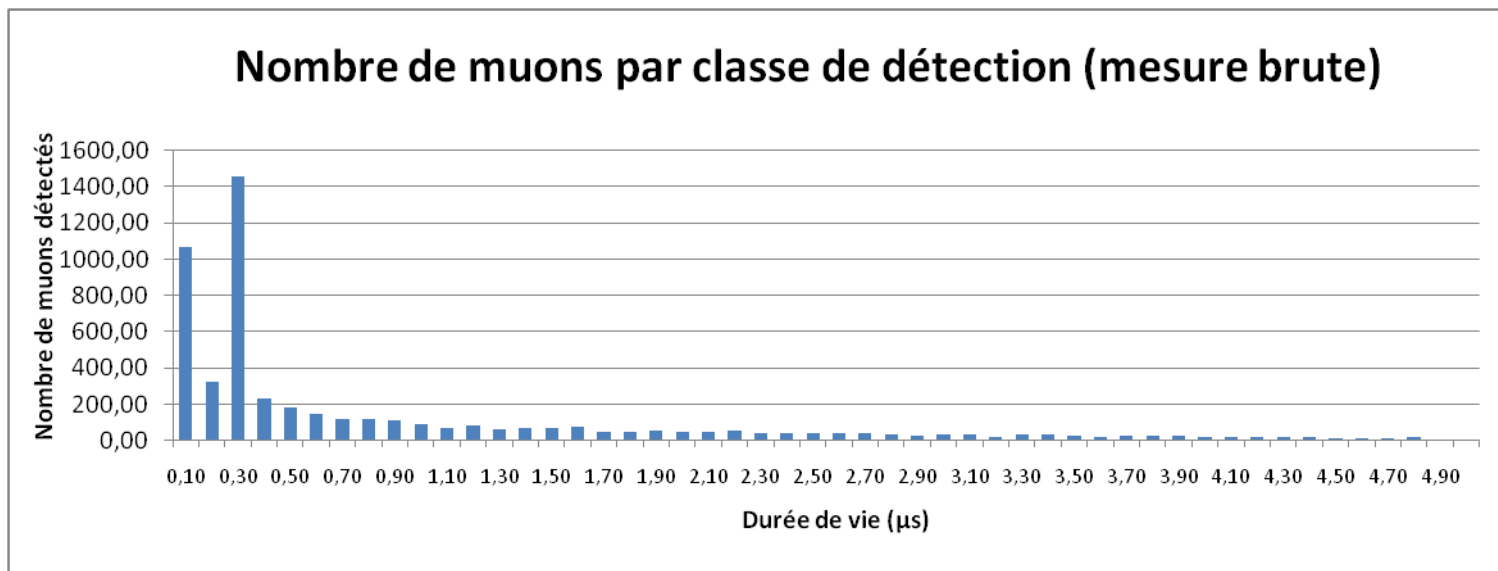
D'après cette loi, une population de noyaux radioactifs N_0 présents à la date $t = 0$, doit décroître de façon exponentielle. Seulement ici, nous ne possédons pas une population de muons qui peu à peu va se désintégrer. Il faut adapter la loi en considérant que les « durées de vie » des muons d'une population totale N_0 sont mesurées une par une. On peut alors déterminer un temps de demi-vie, qui lui peut être déterminé, contrairement au temps de vie. Le temps de demi-vie du muon correspond au temps au bout duquel la moitié d'une population N_0 s'est désintégrée :

$$t_{1/2} = \ln 2 / \lambda$$

Ce que nous pouvons déterminer grâce à cette expérience est donc, non pas le temps de vie du muon, mais sa demi-vie radioactive.

3. Les différentes acquisitions et leurs exploitations

En utilisant la méthode décrite précédemment, on obtient avec les données d'une mesure sur deux jours, la courbe suivante :



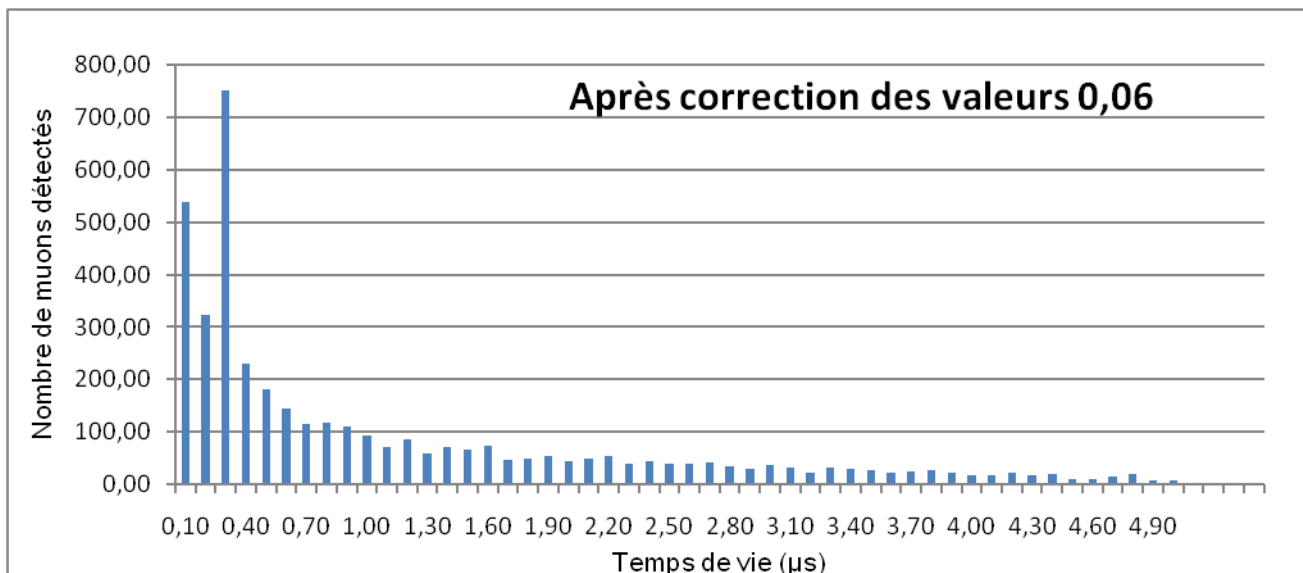
Plusieurs petits problèmes ont fait leur apparition lors de notre expérience, en voici la liste :

a) Détection de particules autres que des muons.

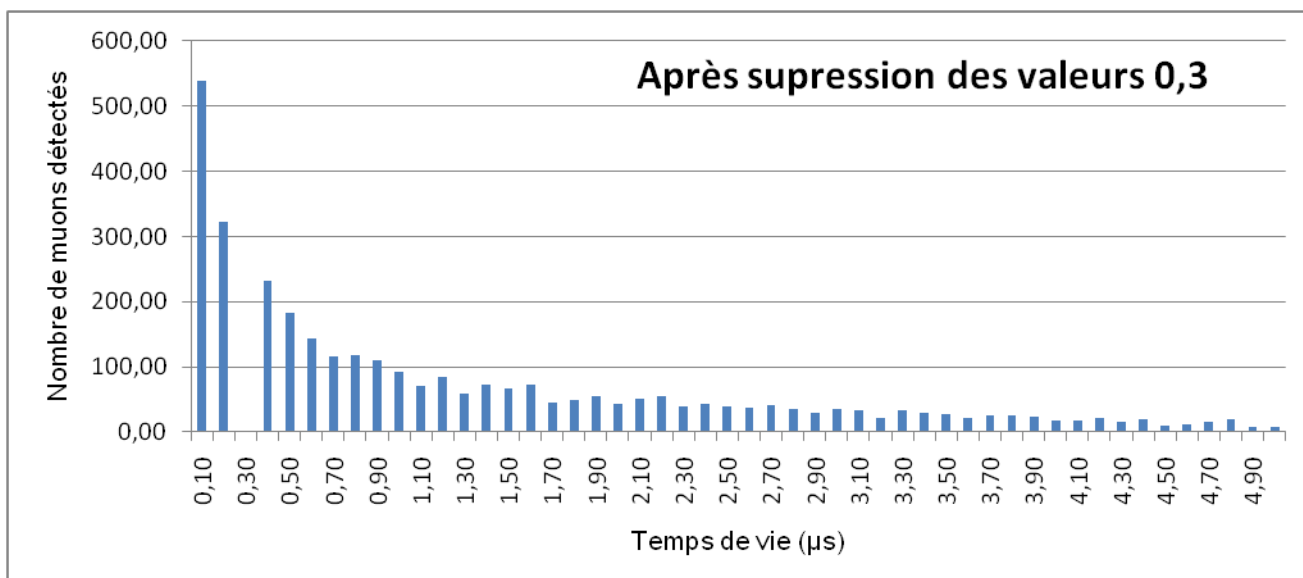
Tout d'abord, la détection elle-même des muons pose problème. Il est possible qu'en effet le cosmodétecteur détecte un muon, enclenche son horloge et l'arrête lorsqu'un autre muon pénètre dans le tube, prenant ce nouveau muon pour l'électron produit par la désintégration du premier muon détecté. Une première source d'erreur dans nos données. À cela s'ajoute ce qu'on appelle « le bruit de fond », la détection d'autres particules suffisamment énergétiques pour être considérées par le cosmodétecteur comme un muon. On a déjà vu qu'on pouvait limiter cette source d'erreur en augmentant les seuils de détection mais nous avons dû considérer le bruit de fond comme responsable de deux anomalies :

- Des muons « vivant » $0,06\mu\text{s}$ et $0,09\mu\text{s}$ ont très souvent été détectés, à chaque mesure, à chaque fois en bien plus grand nombre que les muons « vivant » $0,05\mu\text{s}$ par exemple. Pourquoi cette récurrence dans nos résultats ? Ici encore nous soupçonnons le « bruit de fond » avec des détections virtuelles, correspondant à ces deux durées. Le bruit de fond n'est pas notre seul suspect, en effet l'exactitude des valeurs qui reviennent (les temps trouvés valent exactement $0,06$ et $0,09\mu\text{s}$, mais ceci ne s'applique qu'à ces valeurs. L'écart entre le nombre de muons de durée de vie $0,02$ et $0,03\mu\text{s}$ est beaucoup plus faible que l'écart entre le nombre de muons de durée de vie $0,06$ et $0,05\mu\text{s}$.) nous fait penser que cela pourrait être également dû à un défaut du matériel, comme un faux contact dans l'interface ou un dysfonctionnement du logiciel.

Quelle qu'en soit la cause, ces détections formaient 1600 détections au total dans une classe qui sans elles n'en montrait que 550. Avec plus de deux tiers du nombre de détections alors qu'elles ne devraient pas dépasser un cinquième, nous avons conclu que ces valeurs devaient être supprimées.



▪ La classe de valeurs de 0,20 à 0,30μs nous a également posé des problèmes. Celle-ci en effet montrait un nombre de détections beaucoup plus important que celui attendu. N'ayant pas réussi à trouver d'explication autre que le bruit de fond, nous avons décidé de nous passer simplement de ces valeurs, ne sachant pas si elles étaient pertinentes ou non. Ainsi nous n'avons pas de classe de 0,20 à 0,30μs, ce qui n'affecte toutefois pas nos résultats puisqu'au lieu de considérer que nous avons 0 détection pour ces valeurs comme nous l'avons fait pour 0,06 et 0,09μs, nous avons considéré que nous n'avions pas de mesure pour ces valeurs, ce qui a donc un impact nul sur notre étude statistique.



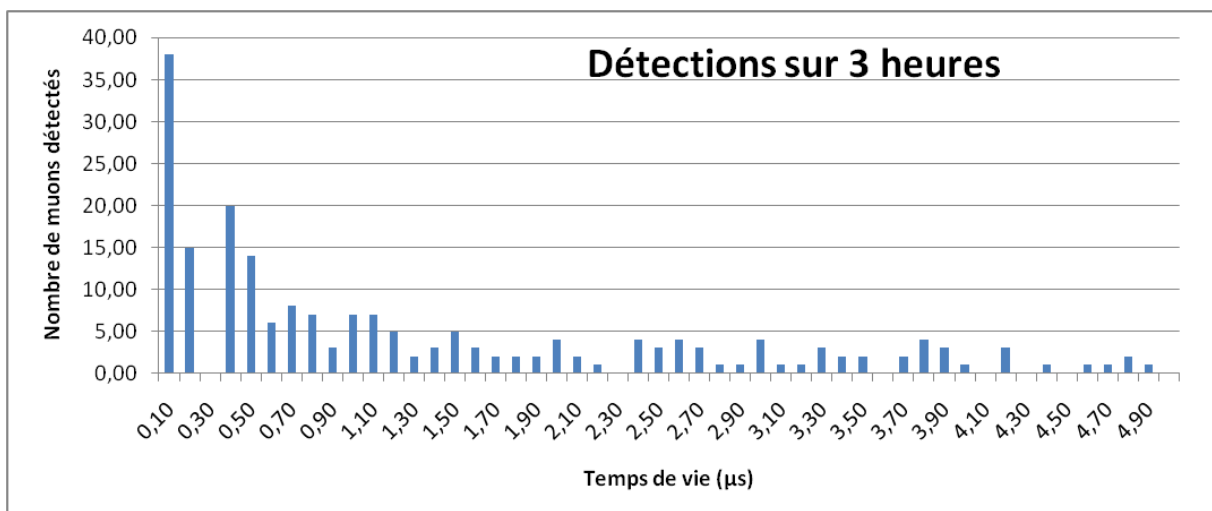
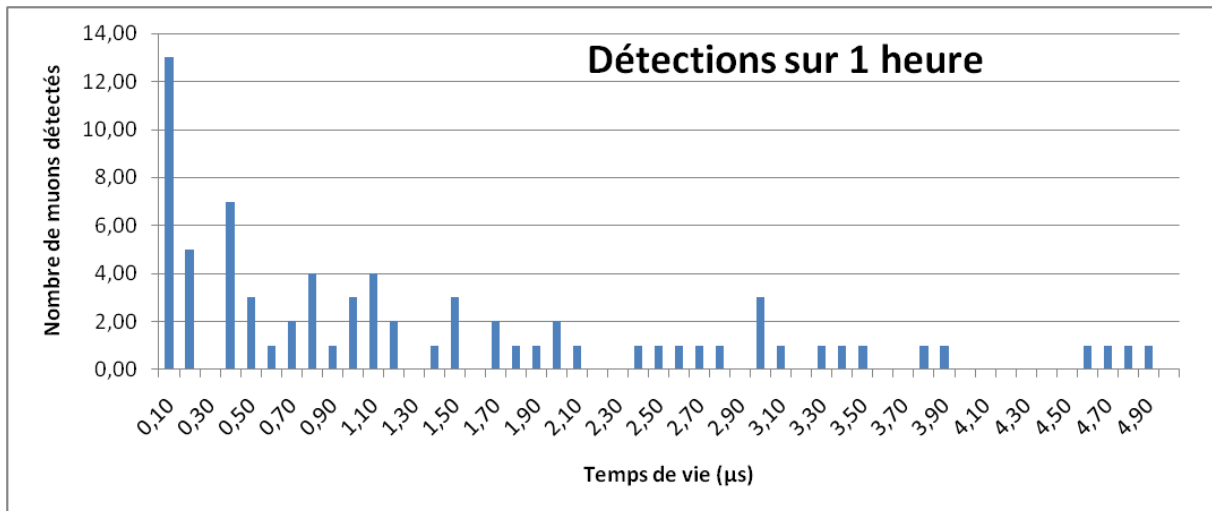
b) Détection de muons ne se désintégrant pas.

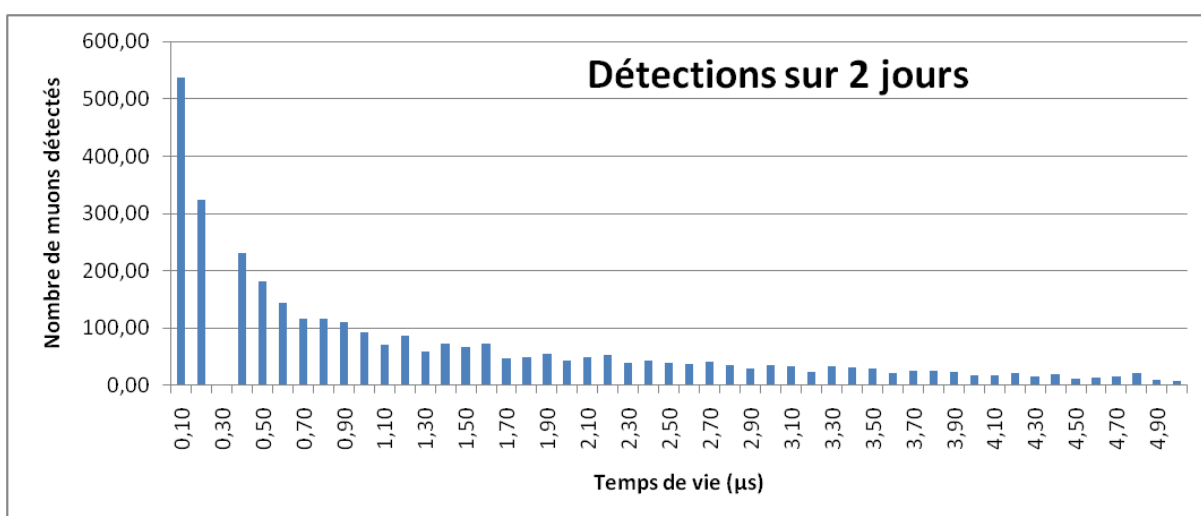
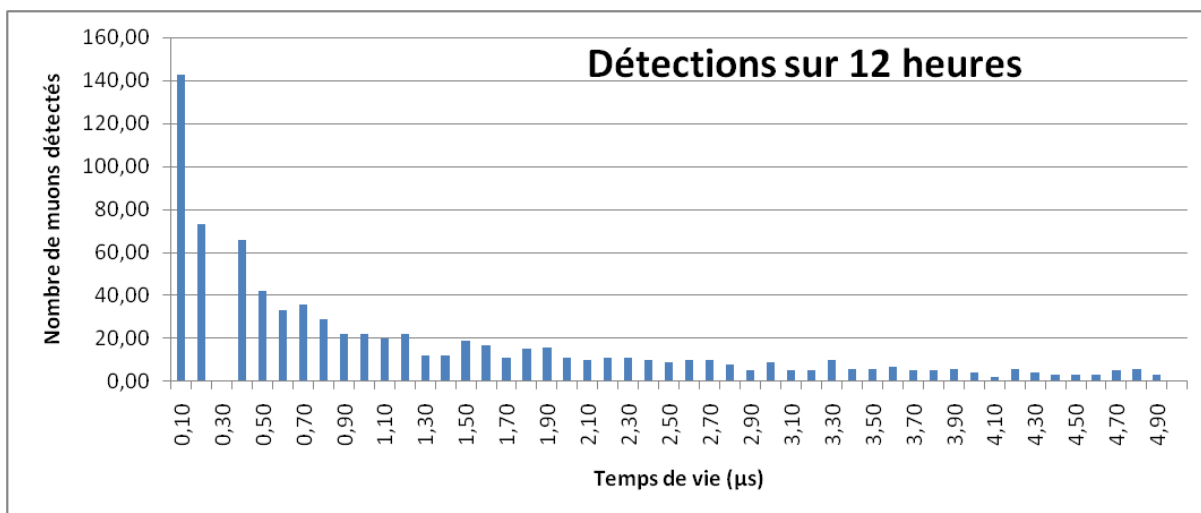
Autre problème rencontré, nous avons détecté en grand nombre des muons ayant une durée de vie beaucoup trop longue (plus de 50 fois leur demi-vie) causé peut-être par l'absence de détection de l'électron produit par la désintégration du muon, ou encore par le « bruit de fond » avec la détection d'autres particules « vivant » plus longtemps... C'est pourquoi nous avons décidé d'éliminer de nos résultats les muons présentant une durée de vie supérieure à 10μs. Nous avons considéré que ceux ayant une vie de plus de 10μs n'ont pas été détectés. Un autre argument concernant cette suppression est lui plus statistique : en effet, nous avons vu au fil des mesures qu'au dessus de 10 μs, et même

avant, le nombre de détections par classe de durées de vie tombait au dessous de 10, même pour des mesures de durée raisonnable, c'est à dire entre quelques heures et 2 jours. En prenant en compte la caractéristique aléatoire de ce phénomène, le faible nombre de valeurs empêche toute interprétation du résultat : lorsqu'on a 550 muons dans certaines classes, l'erreur de plus de 10% générée par la détection d'un unique muon supplémentaire devient rédhibitoire. Cette valeur de $10\mu\text{s}$ est choisie arbitrairement, et est un peu supérieure à la valeur après laquelle le nombre de muons devient trop bas pour être statistiquement représentatif, afin de garder une « marge de sécurité » dans le cas où des mesures pourraient tout de même se révéler utilisables.

c) Erreurs statistiques ordinaires.

De plus n'oublions pas que la désintégration est un phénomène aléatoire. Nous contournons la difficulté en effectuant nos mesures sur de grandes durées mais comment être sûr de la durée nécessaire pour obtenir les meilleurs résultats ? C'est pourquoi nous avons réalisé de nombreuses mesures avec des temps d'exécution croissants, jusqu'à obtenir une durée optimale d'expérience qui soit non seulement concluante, mais réalisable avec nos conditions de travail, dans un lycée. Cette durée est de 2 jours, et nous n'avons malheureusement pu réaliser qu'une seule mesure sur cette durée. Cependant l'amélioration est bien visible sur les courbes après correction :





4. Interprétations de cette expérience

En reprenant la courbe ci-dessus, on peut parvenir à calculer la demi-vie d'un muon, et ce en reprenant les formules précédentes de désintégration radioactive appliquées au cas du muon.

Déterminons ainsi λ pour le muon : $N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$. Le logiciel indique, grâce à la fonction « courbe de tendance », que $N(t) = 343.61 \times e^{-0.442t}$. Cette fonction est en fait un moyen simple de calculer l'équation d'une courbe dont on connaît la forme (ici de la forme d'une exponentielle, puisqu'on y applique la loi de désintégration) : le tableur, à partir des points donnés, est capable de donner une équation approchée de la fonction dont la courbe est celle représentée par nos valeurs.

Par identification avec l'équation donnée précédemment, on trouve un λ peu différent de $0.442\mu\text{s}^{-1}$, donc la demi-vie du muon, qui est $t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}$, est égale à $\frac{\ln 2}{0.442} = 1,57 \cdot 10^{-6} \text{ s}$.

5. Conclusions et interrogation

Si nous considérons que notre valeur est correcte surgit un problème de taille.

Un muon détecté dans le tube se déplaçant à une vitesse proche de la vitesse de la lumière, il parcourt en une demi-vie seulement $1,57 \cdot 10^{-6} c = 470\text{m}$. Donc un muon créé dans la haute atmosphère devant parcourir 35km pour rencontrer le tube, il doit avoir vécu pendant $\frac{35 \cdot 10^3}{470} \approx 74$ demi-vies !! Et encore, nous négligeons le restant de vie des muons après leur entrée dans le tube !

Cette valeur exceptionnelle ne peut en aucun cas nous permettre de détecter, comme nous l'avons fait, au moins un muon toutes les cinq secondes, puisque la durée de vie maximale d'une particule radioactive est de l'ordre de 10 demi-vies.

Plusieurs explications sont possibles :

- Une erreur de mesure ; cependant la marge d'erreur étant énorme, il faudrait considérer que notre matériel est totalement hors d'usage...
- Une mauvaise estimation de la durée de vie : à nouveau, la marge d'erreur est trop importante pour qu'il s'agisse d'une simple « mauvaise estimation ».
- Une mauvaise estimation de la distance à parcourir : les muons détectés seraient produits à moins de quelques kilomètres d'altitude. Cette explication est la plus plausible, mais le nombre de particules encore assez énergétiques pour produire des muons après avoir traversé 30 kilomètres d'atmosphère est théoriquement beaucoup plus bas que ce qui correspond à ce que nous avons observé.

En réalité c'est bien du côté de la distance à parcourir qu'il faut chercher l'explication. Comment le muon pourrait-il bien raccourcir la distance qu'il a à parcourir ? Nous avons en fait oublié une de ses caractéristiques : il possède une vitesse proche de celle de la lumière, et est en conséquence une particule dite « relativiste ». Qu'est-ce-que cela signifie ?

IV La relativité restreinte

1. Les postulats de la théorie classique

Pour tenter d'aborder la théorie de la relativité restreinte, revenons tout d'abord sur les hypothèses de base de la physique dite classique.

On définit l'espace physique comme un espace euclidien à 3 dimensions homogène, c'est-à-dire que ses propriétés fondamentales sont les mêmes en tout point, et isotrope, c'est-à-dire que celles-ci ne suivent pas non plus une direction privilégiée. On le munit en outre d'un repère orthonormé $(O, \vec{x}, \vec{y}, \vec{z})$, ce qui permet de définir l'ensemble des positions successivement occupées par un objet, sa trajectoire, par une courbe paramétrée par une variable temporelle notée t .

En plus de ces définitions, Galilée énonce en 1632 un principe de relativité qui s'imposera comme l'un des piliers de la mécanique. Einstein, quatre siècles plus tard, l'énonce sous cette forme :

« Si K' est relativement à K un système de coordonnées qui effectue un mouvement sans rotation, les phénomènes de la nature s'y déroulent, relativement à K' , conformément aux mêmes lois générales que relativement à K ».

Ce qu'il faut retenir de ce principe, c'est qu'il ne s'applique que dans le cas de référentiels en translation rectiligne uniforme les uns par rapport aux autres, que l'on appelle référentiels inertiels ou encore galiléens.

2. La théorie de la relativité

Lorsque Einstein fonde sa théorie, il reprend les postulats classiques d'homogénéité et d'isotropie de l'espace, et s'appuie également sur le postulat de relativité, supposant l'existence d'une infinité de référentiels en translation rectiligne uniforme les uns par rapport aux autres et dans lesquels les lois de la physique sont les mêmes. Le postulat d'invariance quant à lui stipule que la célérité de la lumière, notée c , est la même dans tous les référentiels inertiels et est indépendante de la vitesse de la source lumineuse. Toutefois, il se retrouve très vite confronté à une contradiction entre ces deux dernières hypothèses puisque cela revient à admettre d'une part que les vitesses s'additionnent et d'autre part que ce n'est pas le cas de la célérité de la lumière, qui possède bien les propriétés d'une vitesse. Ce problème disparaît si l'on s'aperçoit que la contradiction elle-même ne dépend que de deux hypothèses :

1° L'intervalle de temps qui sépare deux événements est indépendant de l'état de mouvement du corps de référence ;

2° La distance spatiale de deux points est indépendante de l'état de mouvement du corps de référence.

Einstein va véritablement révolutionner la physique en abandonnant ces deux points pour supposer que le temps n'est pas une donnée absolue de l'univers mais qu'au contraire celui-ci dépend du référentiel. A notre tour, nous allons suivre le même cheminement pour résoudre notre problème de durée de vie.

En effet, d'après les résultats de notre expérience, le muon ne devrait pas avoir le temps de traverser l'atmosphère pour nous parvenir. Mais dans quel référentiel s'est-on placé pour réaliser celle-ci ? Dans le référentiel du laboratoire, c'est-à-dire dans le référentiel terrestre. Si on suppose la vitesse du muon constante et sa trajectoire rectiligne dans ce référentiel, la mécanique classique suggère que l'étude réalisée est équivalente à une étude se plaçant dans le référentiel du muon. Ce que suggère Einstein est qu'il en va en fait différemment.

On dénote par R le référentiel du laboratoire et par R' le référentiel dans lequel le muon est placé à l'origine, immobile (on parle alors de référentiel propre du muon). On attribue au physicien néerlandais Lorentz le résultat suivant :

Le système de transformation permettant d'exprimer les coordonnées de R' en fonction de celles de R lorsque R' se déplace suivant un mouvement rectiligne uniforme à vitesse v le long de l'axe Ox dans R est :

$$\begin{cases} ct' = \gamma(ct - \beta x) \\ x' = \gamma(x - \beta ct) \\ y' = y \\ z' = z \end{cases}, \quad \beta = \frac{v}{c}, \quad \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

On voit ici que le temps t est ici considéré comme une coordonnée au même titre que les variables de position x , y et z , et que celui-ci subit également le changement de référentiel. En d'autres termes, le temps ne s'écoule pas de la même façon dans R que dans R'. S'il nous semble que le muon ne peut nous parvenir en raison de sa durée de vie trop faible, c'est parce que l'on se base sur la valeur trouvée grâce à l'expérience, qui correspond à une durée mesurée dans R. Il s'agit maintenant d'appliquer à ce problème les outils de la mécanique relativiste.

3. Application au muon

Si l'on fixe un point d'espace x dans le référentiel du laboratoire et qu'on le regarde aux dates t_1 et t_2 , la durée entre ces deux instants dans le référentiel du muon est :

$$\Delta t' = t_2' - t_1' = \gamma \left(t_2 - \beta \frac{x}{c} \right) - \gamma \left(t_1 - \beta \frac{x}{c} \right) = \gamma(t_2 - t_1) = \gamma \Delta t$$

Pour observer une durée dans le référentiel propre du muon, il faut donc multiplier la durée correspondante dans le référentiel du laboratoire par le facteur de Lorentz γ . On appelle ce phénomène la dilatation du temps.

On admet que la vitesse du muon vaut 99,8% de la vitesse de la lumière. Le calcul du facteur β nous donne donc :

$$\beta = 0.998$$

Le facteur γ vaut alors :

$$\gamma = 15.8$$

On a vu précédemment qu'en une demi-vie $t_{1/2}$ de l'ordre de 10^{-6} s, le muon parcourait une distance de l'ordre de 500 mètres. Cependant nous avons réalisé ce calcul dans le référentiel du laboratoire. Dans celui du muon, le temps s'écoule « plus lentement ». De son point de vue, en une demi-vie, il aura parcouru :

$$d = v \Delta t' = \gamma v \Delta t = 10405 \text{ m}$$

Cette distance correspond à un tiers de la distance totale à parcourir pour la particule. Au final, seulement 3 demi-vies se sont écoulées entre l'instant où le muon est créé et celui où il se désintègre, contre une cinquantaine dans le modèle classique. Bien que ce dernier soit adapté à notre échelle, il est rapidement mis en défaut pour des phénomènes à plus haute vitesse comme c'est le cas lorsque l'on étudie le muon. La mécanique relativiste, alors qu'elle se base sur un principe qui semble tout d'abord en contradiction avec notre intuition, celui de la relativité du temps, offre ainsi une description plus précise du monde. La mesure de la durée de vie du muon est donc une expérience très intéressante en ce qu'elle permet de découvrir deux mondes très différents, celui de l'infiniment grand, cadre de la relativité, et de l'infiniment petit, celui des particules élémentaires, à partir d'une simple mesure réalisable dans un laboratoire de lycée.

Au final, la valeur pertinente de la durée de vie du muon, celle mesurée dans son référentiel propre, est :

$$\Delta t = 1,57 \cdot 10^{-6} \times 15,8 = 2,48 \cdot 10^{-5} \text{ s}$$

Conclusion

Ce travail touche à sa fin... Mais grâce à celui-ci, nous avons pu voir un semblant de ce que pouvait être la vie d'un chercheur, avec ses réussites... et ses déceptions... Mais c'est cela qui a rendu nos expériences tellement intéressantes à vivre.

Nous avons appris à connaître un appareil de mesure assez déconcertant au premier abord, le cosmodétecteur, puis à l'utiliser. Le muon est un sujet très intéressant que nous avons eu la chance de pouvoir traiter. Nous nous sommes beaucoup interrogés sur sa nature, pour enfin se poser la question de sa durée de vie.

Avec le cosmodétecteur, après de multiples mesures, nous avons pu déterminer de manière expérimentale son temps de demi-vie. Quand nous avons enfin réussi à le déterminer, quelle fierté !.. Nous avons réussi à calculer la durée de vie d'une particule invisible se déplaçant quasiment à la vitesse de la lumière !

Et même ensuite, ce muon a continué de nous étonner par ses singulières propriétés. Nous avons donc dû nous intéresser à la physique relativiste, ce qui nous a permis de nous ouvrir à de nombreux concepts tels que la dilatation du temps ou la contraction des longueurs.

Nous sommes bien conscients d'avoir exposé ici un travail un peu plus théorique que celui qui était attendu mais nous avons été heureux de le mettre en œuvre et nous souhaitons vivement le présenter aux Olympiades de la Physique ...

... et nous prendre pour des chercheurs le temps d'un après-midi !

Bibliographie

- Les fiches pédagogiques Cosmos de Sciences à l'Ecole
- La revue Elémentaire n°3 (Les rayons cosmiques) de l'in2p3
- Science & Vie HS n°244 : *La matière et ses ultimes secrets*
- *Introduction à la relativité*, David Langlois,
<http://catalogue.polytechnique.fr/site.php?id=88&fileid=487>
- *Théorie de la relativité*, Bahram Houchmandzadeh,
<http://houchmandzadeh.net/cours/Relativite/relativite.pdf>