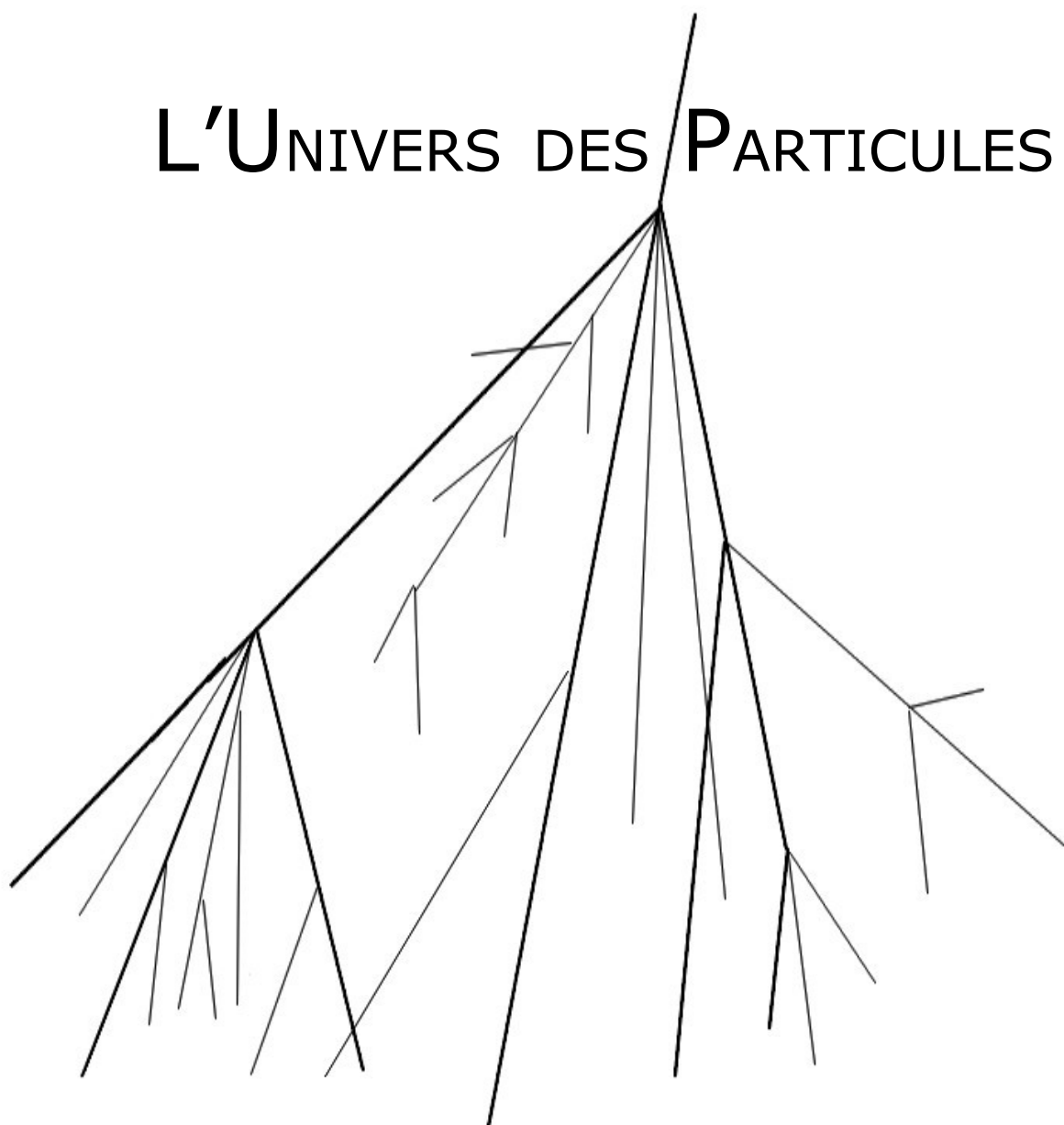


L'UNIVERS DES PARTICULES



Rédaction

- CHURLAUD Olivier
- DERES Julien
- GERMON Victor
- LE ROCH Marion
- VOUHE Cannelle

Résumé

Nous sommes un groupe de 15 élèves et poussés par l'actualité autour du LHC, nous nous sommes plongés dans l'Univers des Particules. Nous avons ainsi pu nous rendre compte du lien entre l'infiniment grand et l'infiniment petit, des particules élémentaires qui composent le monde, et comment elles interagissent pour former tout ce qui nous entoure.

Nous avons ensuite voulu partager ces nouvelles connaissances portant sur cette physique « moderne » avec nos camarades, mais aussi avec toute personne, curieuse d'en savoir plus sur ce sujet. Pour cela, nous avons présenté une exposition, puis, soutenus par le CERN, nous avons confectionné un jeu de société, réalisé une chambre à brouillard, nous menons et nous exploitons des expériences avec un détecteur de muons confectionné par l'In2p3, avant de réaliser notre propre détecteur.

Ce travail a été présenté cette année aux Olympiades de Physique, et nous a valu un premier prix.

I	Les objectifs du projet	3
II	La chambre à brouillard	4
III	Le Cosmodétecteur	6
IV	Notre détecteur de muons	18
V	Le jeu de société	19
VI	Site internet	21
VII	Annexes	22

I – Les objectifs du projet

De tout temps, l'homme a cherché (et cherche encore) d'où il provient, de quoi il est fait, ou encore de quoi est fait tout ce qui l'entoure, que ce soit dans l'infiniment grand ou dans l'infiniment petit.

Au travers de l'histoire, plusieurs explications et plusieurs modèles ont été proposés. Aujourd'hui, le modèle qui décrit tout cela est le Modèle Standard. Ce dernier, qui est à ce jour la théorie la plus complexe que l'humanité ait concocté pour décrire le monde, précise à la fois quels sont les constituants ultimes de l'Univers, que l'on appellera « les particules élémentaires », mais aussi comment ces constituants interagissent entre eux pour former des objets ou des systèmes complexes.

Le but de ce projet est de comprendre, à notre niveau, ce que comporte ce modèle, son évolution et s'il s'agit du seul modèle qui expliquerait la matière.

Nous voulions aussi comprendre ce qui a poussé les scientifiques à construire le LHC, qui est aujourd'hui le plus gros accélérateur de particules au monde. Nous en avons profité pour explorer la structure d'un tel accélérateur.

Mais pour que tout ceci ne se limite pas sur un plan théorique, nous avons choisi d'illustrer les notions que nous avons découvertes à travers différentes réalisations, que nous allons vous présenter.

Il reste à noter que, durant la réalisation de ce projet, nous avons suivi une démarche historique, qui nous a permis de mesurer l'importance des rayons cosmiques lors de la recherche des particules élémentaires. Nous nous sommes rendus compte que ces mêmes rayons cosmiques sont à nouveau d'actualité, à travers un nouveau type d'astronomie : l'astronomie des particules chargées. Nous leur avons donc naturellement attribué une importance particulière.

Nous devons préciser aussi dans quel cadre le projet est né et avance encore aujourd'hui.

Ce projet rentre dans le cadre du projet d'établissement, dans lequel on encourage les élèves à s'investir dans un sujet de leur choix. On impose seulement que les groupes soient composés au maximum de 15 élèves provenant des trois niveaux différents : seconde, première et terminale. Ces activités ont pour but de responsabiliser les élèves pour qu'ils puissent conduire un projet en groupe, apprennent à s'organiser, à prendre contact avec des personnes ressources... Elles doivent également être un lieu d'échanges de compétences : un élève connaissant un logiciel doit par exemple former les autres du groupe afin que chacun puissent participer à toutes les tâches se déroulant durant le projet. Pour tout cela, notre emploi du temps est adapté afin d'éviter toute surcharge de travail : un après-midi toutes les deux semaines est ainsi banalisé. Le professeur responsable du projet a un rôle principalement de conseiller, de personne ressource. Pour un sujet comme le nôtre, il sert aussi de « spécialiste » et nous apporte une partie de la théorie. Mais le domaine étudié étant très actuel, nous avons aussi dû entrer en contact avec des personnes extérieures, du domaine de la recherche.

II – La chambre à brouillard

Depuis 1912, on sait que des particules chargées traversent l'atmosphère et que leur nombre est plus important en altitude. On a peu à peu découvert que ces particules sont en réalité issues de particules très énergétiques d'origine extraterrestre.

Les collisions entre ces particules très énergétiques qui composent les rayons cosmiques et les noyaux des molécules composant l'atmosphère engendrent des particules secondaires, qui, après de nouvelles collisions avec de nouveaux noyaux, vont créer des particules tertiaires, et ainsi de suite. Un rayon cosmique très énergétique peut ainsi engendrer une gerbe contenant plusieurs milliards de particules. Ainsi, nous sommes traversés en permanence par des particules, sans nous en rendre compte.

? Comment peut-on observer les trajectoires de ces particules ?

Il est possible de matérialiser les trajectoires de ces particules grâce à un dispositif relativement simple, appelé *chambre à brouillard* ou *chambre de Wilson*, réalisée en 1912 par le physicien écossais Wilson.

Des développements de cet outil furent ensuite longtemps utilisés pour repérer les trajectoires et déterminer la nature des particules.

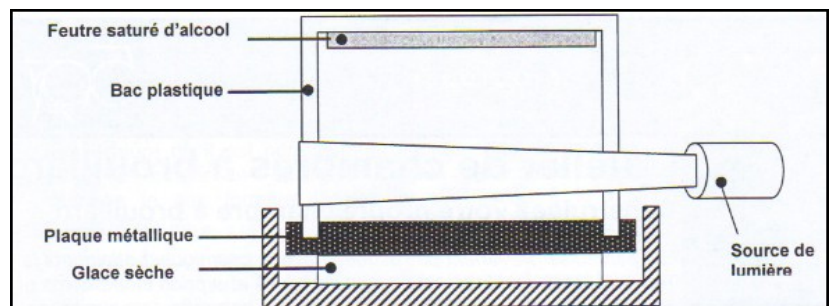
Nous avons commencé notre initiation par cette expérimentation.

L'expérience consiste à réaliser un brouillard d'alcool qui sera alors dans un état métastable.

Notre première chambre à brouillard était rudimentaire...

Pour cela, un bac en plastique est disposé sur une plaque métallique d'épaisseur 5 mm (voir schéma ci-dessous), elle-même disposée sur de la glace carbonique. On dispose de la feutrine imbibée d'alcool isopropylique pur sur le couvercle du bac en plastique. Au bout de quelques minutes, on obtient alors un brouillard d'alcool qui se trouvera dans un état métastable : à la température à laquelle il se trouve, l'alcool devrait en effet se trouver dans un état liquide, ce qui n'est pas le cas. Pour s'assurer de l'étanchéité de l'enceinte contenant l'alcool, nous avons creusé une saillie dans la plaque métallique, que nous avons ensuite remplie d'eau.

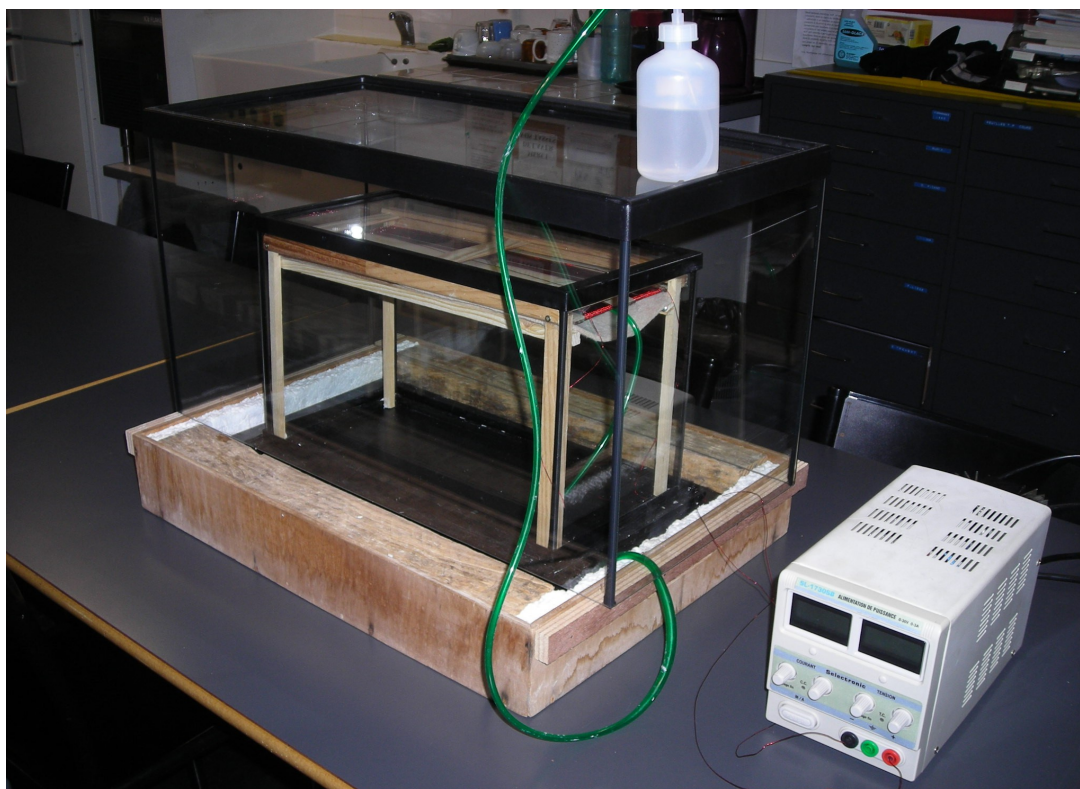
Nous avons remarqué que la chambre doit avoir une hauteur minimale pour que le brouillard soit suffisamment dense.



Lorsqu'une particule ayant une énergie conséquente entre dans la chambre à brouillard, elle entre en collision avec l'alcool, lui cède de l'énergie, ce qui engendre la formation de gouttelettes d'alcool le long de la trajectoire de cette particule.

On peut ainsi, avec ce dispositif, matérialiser les trajectoires des particules créées par les collisions entre les rayons cosmiques sur les noyaux de l'atmosphère.

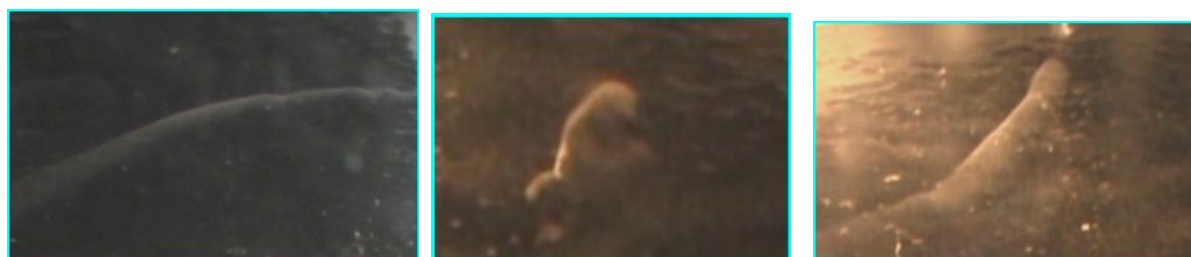
Comme nous avons conscience d'aborder une partie de la physique qui peut intéresser le grand public, nous devons rendre la chambre accessible au plus grand nombre. Le brouillard n'étant pas très dense, l'observation des trajectoires des particules était difficile. Nous avons donc cherché à améliorer notre chambre à brouillard.



La plaque métallique, choisie plus fine afin de mieux conduire le froid, est surplombée d'un premier aquarium de verre. Il a aussi été ajouté une résistance chauffante pour faire s'évaporer plus rapidement l'alcool de la feutrine. Nous avons aussi ajouté un aquarium de verre plus volumineux que le premier, permettant l'isolation thermique de la chambre et d'éviter la condensation due au souffle. La feutrine n'étant plus accessible, nous avons aussi mis en place un système permettant de l'humidifier d'alcool par un tuyau percé.

Les trajectoires des muons sont alors visibles sur la vidéo à l'adresse suivante :

http://www.dailymotion.com/video/xckbcz_l-univers-des-particules-lp2i_tech



III – Le Cosmodétecteur

Si grâce à la chambre à brouillard, on peut constater que des particules invisibles traversent constamment notre environnement, il est impossible de les comptabiliser de manière précise.

Nous sommes entrés en contact avec des membres de l'in2p3, tels José Busto (du CPPM, à Marseille), Gérard Tristam et Catherine Thibault, et du CEA, comme Eric Lesquoy.

Grâce à eux, nous avons eu la chance de recevoir, au lycée, un détecteur de particules performant, fabriqué par José Busto et son équipe, qui nous a été prêté pour une durée de trois ans, ceci dans le cadre d'un appel à projet mené par Sciences à l'école.

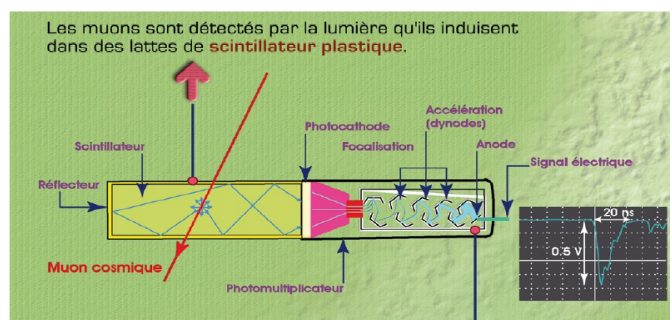
Il s'agit d'un instrument capable de compter les muons issus de rayons cosmiques entrant en collision avec les molécules de l'atmosphère. Comme nous le disions en introduction, observer et compter ces particules revient à observer la source des rayons cosmiques, située dans l'espace. Cette source peut être le soleil, ou une supernova, ou encore des quasars, etc. Bref, ce dispositif permettant d'observer l'espace, il est aussi nommé *télescope à muons*.

Nous avons, afin de l'utiliser de manière optimale, cherché à comprendre le fonctionnement du détecteur. Le comptage repose sur la détection en coïncidence des muons, réalisée par deux plaques de scintillateurs séparées d'une vingtaine de centimètres. Chaque plaque est reliée à un photomultiplicateur.

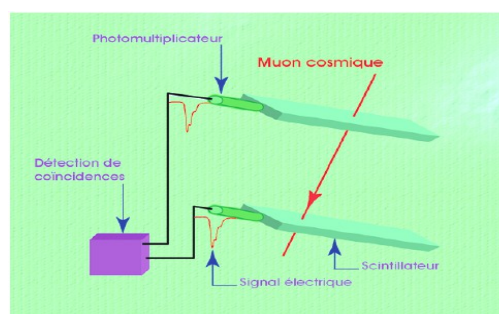


? Comment fonctionne le télescope à muons ?

Lorsqu'un muon traverse une plaque, il excite alors les molécules du scintillateur, qui se dés excitent en émettant des photons. Ces photons parviennent jusqu'au photomultiplicateur où leur énergie est convertie en une impulsion électrique.



Mais les photomultiplicateurs génèrent également des signaux électriques d'origine thermique, bien plus important en nombre que ceux provenant des muons. Ce bruit étant aléatoire, on peut extraire les signaux issus des muons en ne retenant que les impulsions électriques émises par les deux photomultiplicateurs et coïncidents d'un point de vue temporel. En effet, lorsqu'un signal électrique est généré dans un des deux photomultiplicateurs, cela ouvre une « fenêtre



de comptage » de 50ns. Si durant cette période, l'autre photomultiplicateur génère un signal, alors le système comptabilise cela comme une coïncidence issue d'un muon ayant traversé les deux scintillateurs.

Cependant, si, durant cette fenêtre, l'impulsion électrique est d'origine thermique, il y aura une coïncidence fortuite, c'est à dire qui ne sera pas due à un muon.

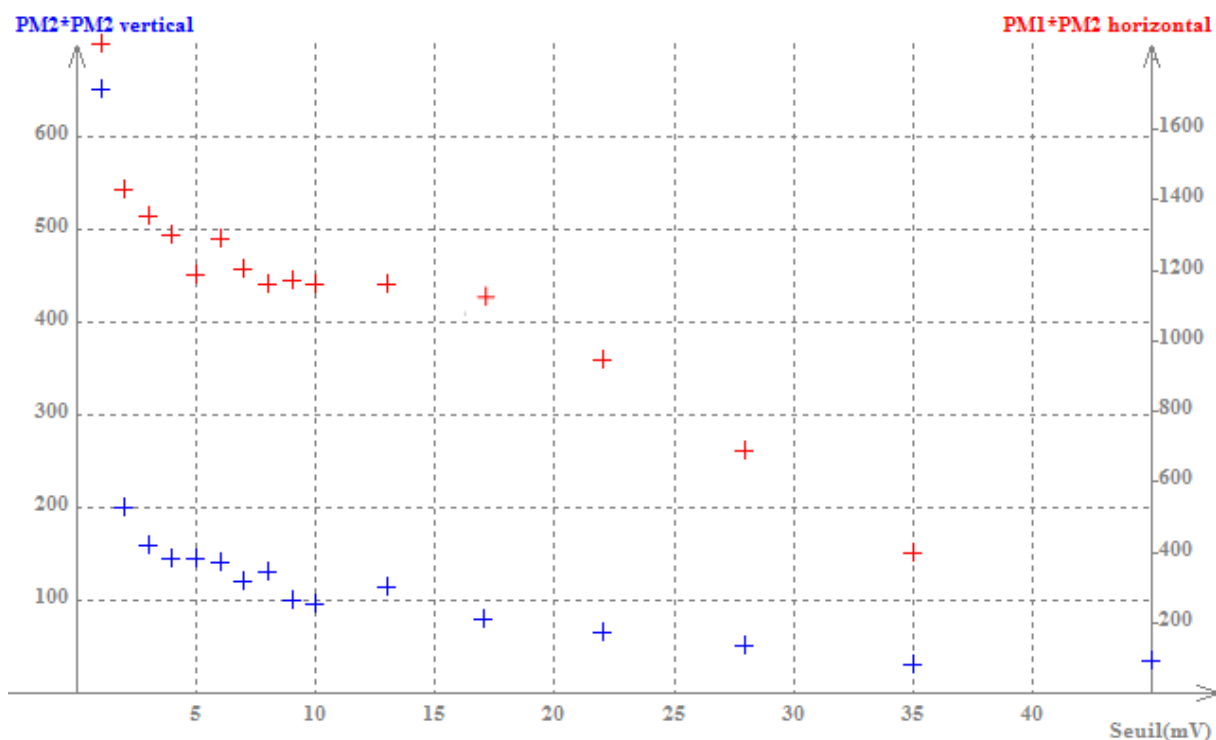
Pour s'affranchir des coïncidences fortuites, des réglages sont à ajuster, et nous avons dû comprendre sur-lesquels nous devons influencer.

Nous savons que les signaux électriques issus des muons ont une amplitude plus importante que ceux issus du bruit de fond thermique. Le seuil de comptage nous permet donc d'optimiser la mesure, en choisissant à partir de quelle amplitude une impulsion sera considérée comme muon et donc comptabilisée. En effet, plus on choisit un seuil bas, et plus on prend en compte d'impulsions électriques, qu'elles aient pour origine les muons ou non.

? Alors quelle valeur choisir pour le seuil ?

Plusieurs mesures ont été réalisées, dans différentes conditions afin de déterminer cette valeur.

Sur le **graphe 1** ci-dessous, les points rouges représentent le nombre de coïncidences (en ordonnée) comptées durant des durées de 10 minutes, en faisant varier le seuil (en mV) (en abscisse), en positionnant les scintillateurs à l'horizontale.



Grphe 1 : Nombre de coïncidences comptées avec PM1 et PM2, pendant des durées de 10 minutes.

On peut constater qu'en augmentant le seuil jusqu'à 6 mV, on élimine de plus en plus de coïncidences fortuites.

La courbe présente un palier d'environ 6 à 17 mV. Ce palier nous a interpellé. Nous l'avons interprété de la manière suivante : de 6 à 17 mV, le nombre de coups en coïncidences reste pratiquement constant, alors que les signaux issus des muons, généralement plus intenses, sont conservés.

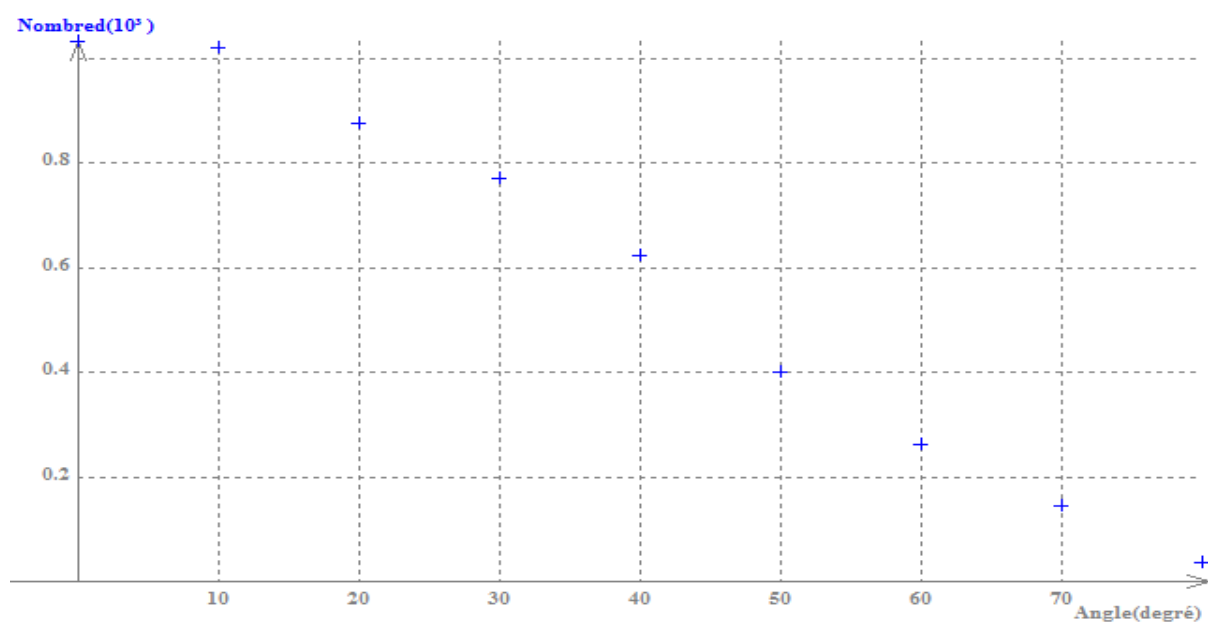
Si par contre on continue d'augmenter le seuil au-delà de 17mV, on commence à ne plus prendre en compte des signaux provenant des muons.

Cette interprétation semble cohérente avec une deuxième expérience que nous avons menée, représentée par les points bleus figurant sur ce même graphique. Ceux-ci ont été obtenus en mesurant les coïncidences durant des durées de 10 minutes, mais en positionnant cette fois-ci les scintillateurs de manière verticale. Or, les muons, d'origine extraterrestre, proviennent essentiellement du ciel, donc de la verticale par rapport au sol, et non horizontalement (hypothèse vérifiée sur le **graphe 2** ci-dessous).

Ces points bleus montrent que le nombre important de bruit de fond permet d'obtenir, pour des faibles valeurs de seuil, un bon nombre de coïncidences, mais essentiellement fortuites. Ce nombre de coïncidences ne cesse ensuite de décroître lorsque le seuil augmente, car on ne comptabilise plus les impulsions de faibles amplitudes : le bruit de fond. Il devient donc de plus en plus improbable d'avoir des coïncidences fortuites.

L'idéal pour régler le seuil qui permettrait de s'affranchir du bruit de fond, serait de se placer dans des conditions expérimentales telles qu'on ne comptabilise pas les muons. Ce qui est peu commode à Poitiers. En effet, les muons peuvent traverser jusqu'à 10 km de matière, et nous ne disposons pas de tunnel sous une montagne pour se protéger de ces particules. Cependant, en plaçant les scintillateurs à la verticale dans un trou de profondeur moyenne, la terre environnant jouerait le rôle de montagne.

Le **graphe 2** ci-dessous met en évidence le fait que les muons arrivent majoritairement verticalement par rapport au sol : nous avons mesuré les coïncidences avec les photomultiplicateurs 1 et 2 en fonction de l'angle entre la normale des scintillateurs et la direction verticale.



Grappe 2 : Etude de la variation de l'angle entre la normale des scintillateurs et le zénith.

Nous avons pu nous rendre compte, au cours de certaines manipulations, que ce détecteur est un véritable télescope à muons : il permet en effet de s'affranchir d'autres particules telles que les électrons ou les positrons issus de la radioactivité naturelle, ou présents dans les gerbes de particules. En effet, alors que ces particules peuvent donner un signal dans un scintillateur, elles ne peuvent traverser les deux scintillateurs car elles ne peuvent pénétrer ce matériau que sur des distances inférieures au centimètre. Les électrons ne pourront donc tout au plus participer qu'aux coïncidences fortuites. Les positrons ne posent quant à eux aucun problème car lorsqu'ils pénètrent la matière, cela produit une réaction d'annihilation avec les électrons rencontrés.

L'utilisation du détecteur nous a permis de nous rendre compte du flux de muons, de leur absorption à travers la matière en réalisant des mesures à différents étages de notre lycée, ou encore de montrer que la distribution angulaire de l'arrivée des muons sur terre n'est pas isotrope, puisqu'elle semble suivre une loi en \cos^2 .

A ce stade du projet, nous comptons commencer la réalisation de la carte électronique pour piloter notre propre détecteur de muons. Mais lors de la sélection interacadémique des Olympiades de Physique, une question nous a été posée, bouleversant notre programme. Cette question nous a alors embarqué dans une aventure passionnante car pour y répondre, il a fallu mettre au point une véritable démarche expérimentale. Et les résultats obtenus ont alors suscité d'autres questions, nous poussant à imaginer de nouvelles expériences...

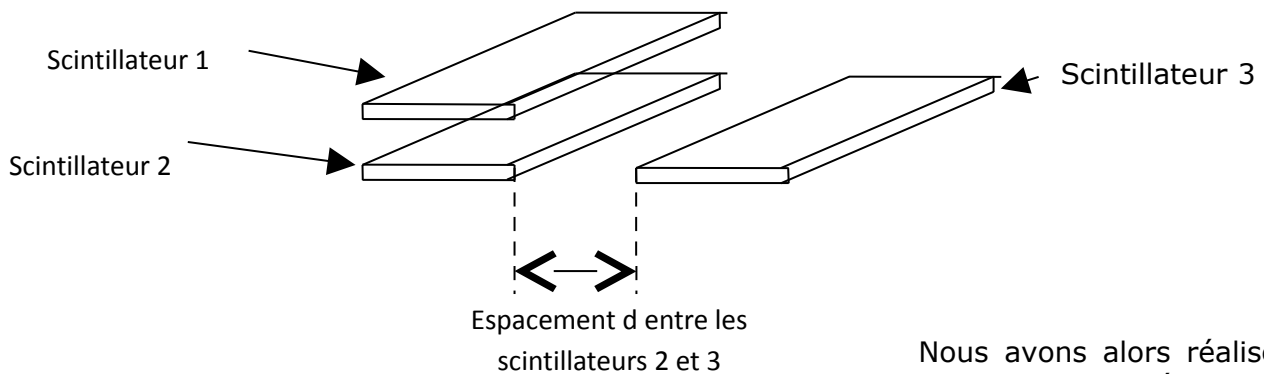
? Qu'en est-il des gerbes de particules ?

Nous ne pouvions pas oublier de nous interroger sur l'origine de ces muons...

Il est vrai qu'à cette date, nous ne nous étions pas penchés sur ce phénomène d'un point de vue quantitatif, étant donné que le détecteur dont nous disposions ne nous le permettait pas. Mais nous nous sommes documentés sur le travail du chercheur Pierre Auger. Grâce à un article paru dans le *Journal de Physique* en 1938 et après discussions avec deux chercheurs, Eric Lesquoy et Gerard Tristram, que nous avons eu la joie de rencontrer, ***nous avons pu apporter une modification au dispositif, ce qui nous a permis d'étudier les gerbes de particules.***

Dans le document cité, Pierre Auger explique qu'il a pu mettre en évidence l'existence des gerbes en disposant des compteurs Geiger côte à côte, dans le même plan, et en augmentant petit à petit la distance séparant ces compteurs. Les mesures ont montré que même pour des distances relativement grandes (75m), le nombre de coups comptés en coïncidence était supérieur aux coïncidences fortuites. Il était donc clair que des muons arrivaient en même temps sur les scintillateurs, même espacés de plusieurs dizaines de mètres. Face à la probabilité de ces événements, la seule explication possible fut que ces muons avaient la même origine : un rayon cosmique. Il mit ainsi en évidence la notion de gerbe de particules, initiée par un rayon cosmique percutant un noyau de l'atmosphère.

Pour suivre la démarche de Pierre Auger, ***nous avons alors réalisé cette modification du détecteur, qui a consisté à décrocher le troisième scintillateur de l'emplacement sur lequel il était fixé, pour le porter à hauteur du deuxième scintillateur.***

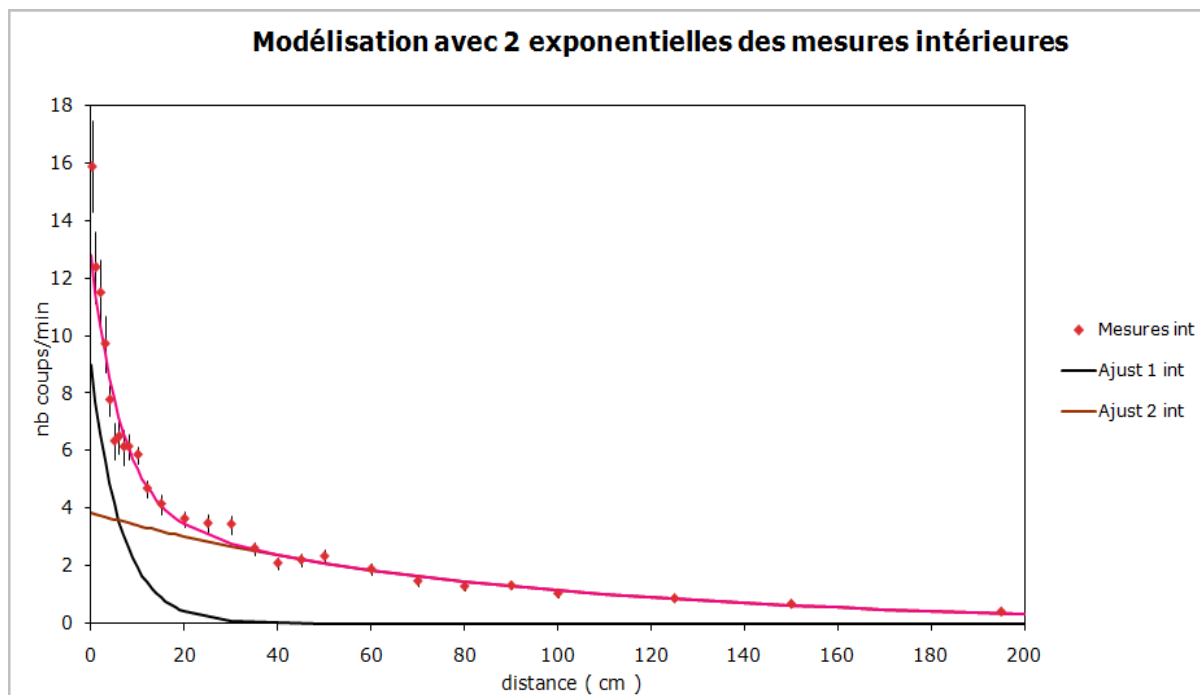


Nous avons alors réalisé des mesures : le but étant de compter le nombre de muons coïncidents avec les scintillateurs 2 et 3, en fonction de la distance.

Etant donné que les mesures allaient s'étaler sur plusieurs jours, on nous a attribué une salle afin que d'éventuels changements de lieu n'occasionnent pas des variations des conditions expérimentales.

Toujours dans le même souci, nous avons mesuré le flux de muons à chaque demi-journée, afin de corriger au cas échéant par un coefficient.

Voici les mesures que nous avons obtenues :



Les points rouges représentent les mesures réalisées à l'intérieur de la salle. Il s'agit du nombre d'impulsions comptées en coïncidence dans les détecteurs 2 et 3, en fonction de la distance entre ceux-ci. La courbe rouge est la courbe qui, grâce à la méthode des moindres carrés, passe le plus proche de ces points.

Après observation des points obtenus nous avons essayé de faire une modélisation avec une exponentielle décroissante. Mais cela n'a pas fonctionné, l'écart était trop grand.

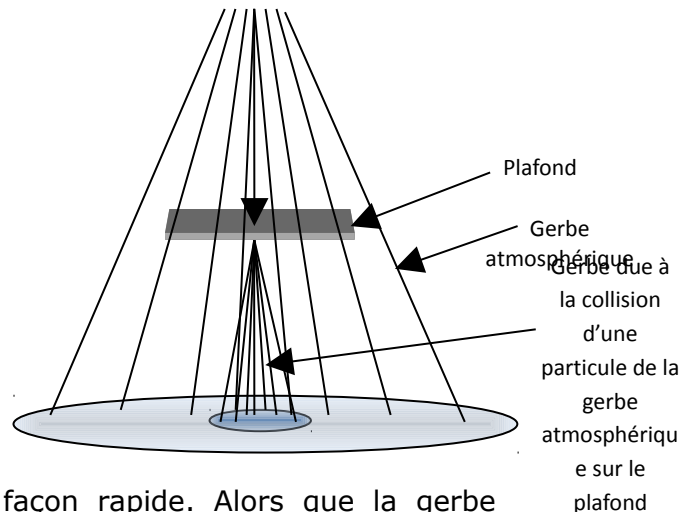
Nous avons alors essayé de faire une modélisation grâce à deux exponentielles, et cela a été beaucoup plus concluant. Cette modélisation est représentée sur la figure ci-dessus. La courbe rouge serait alors la somme des exponentielles représentées par la courbe noire (qui décroît rapidement – nommée ajust 1 int), et la courbe marron (qui décroît beaucoup plus lentement – nommée ajust 2 int).

? Quelle(s) interprétation(s) donner à l'allure de la courbe obtenue ?

Si cette modélisation est correcte, elle pourrait être la signature de deux phénomènes distincts. Nous avons recherché des interprétations possibles dans les articles rédigés par Pierre Auger en 1939 et 1940.

En lisant les articles rédigés par Auger, nous pouvons émettre l'hypothèse que la courbe noire représente en réalité des gerbes issues de collisions entre des particules de la gerbe atmosphérique avec de la matière dense rencontrée, telle que le plafond de la salle dans laquelle nous avons réalisé les mesures. L'évolution plus lente de la courbe marron devrait quant à elle représenter les particules de la gerbe atmosphérique.

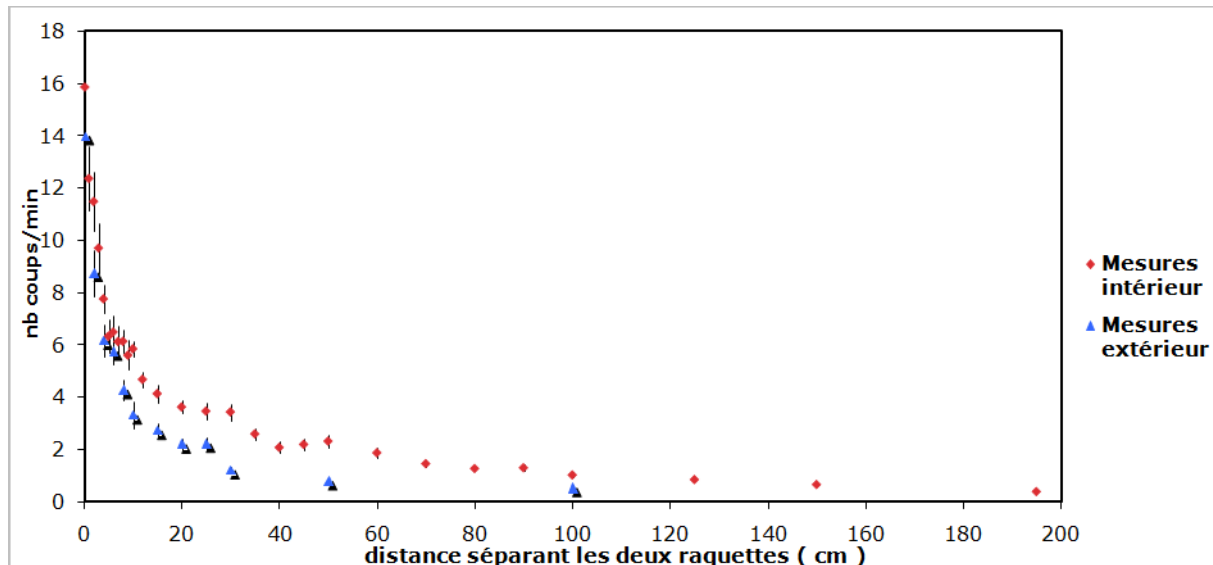
Ceci est intuitif. En effet, (figure ci-contre) la gerbe créée lors du passage d'une particule dans le plafond venant de moins haut verra ses particules concentrées sur une plus petite surface, si bien qu'en s'éloignant du centre de la gerbe, la densité de particules ne pourra que décroître de façon rapide. Alors que la gerbe atmosphérique, venant de beaucoup plus haut, se répandra sur une surface beaucoup plus grande, avec une densité de particules plus homogène, d'où une variation lente de cette densité lorsque l'on s'éloigne du centre de la gerbe.



Nous avons alors voulu vérifier cette hypothèse, en se plaçant à l'extérieur, afin d'éliminer la composante rapide du signal. Après avoir choisi un terrain éloigné de tout bâtiment pouvant créer des gerbes qui gêneraient nos mesures, nous avons mesuré le flux de muons dans ce nouvel environnement afin de tenir compte notamment de l'absorption des muons lors des mesures réalisées en intérieur et de pouvoir ainsi comparer les mesures réalisées en intérieur et en extérieur.

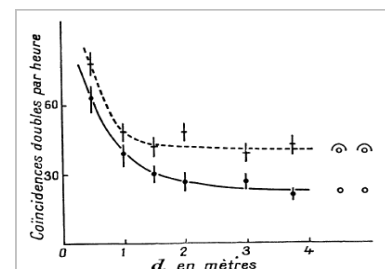


Le temps n'étant pas propice, et la date butoir arrivant à grand pas, nous n'avons pu réaliser que quelques mesures qui figurent en bleu sur le graphique ci-dessus. **Contrairement à ce que nous attendions, la courbe décroît là encore rapidement pour des faibles distances entre les scintillateurs.**



Après un moment de déception, il fallait tout de même en comprendre la raison. Notre première hypothèse fut que le scintillateur N°1 perturbe la mesure, car il se situe sur un plan au dessus des deux autres, et pourrait ainsi générer des gerbes. Mais cette piste n'a rien donné de probant.

D'autre part, un retour sur les documents écrits par Pierre Auger montrait que nous faisons peut-être fausse route, en particulier cette courbe ci-contre qui montre en quelque sorte la densité de gerbes en fonction de l'éloignement des détecteurs :



La courbe en pointillée a été réalisée sous un toit, alors que celle en trait plein a été obtenue à l'air libre : notre modélisation ne nous permettait pas d'obtenir une courbe horizontale pour des distances supérieures à 2m. D'autre part, les pentes des descentes des deux courbes obtenues par Pierre Auger sont moins abruptes que celles que nous obtenons.

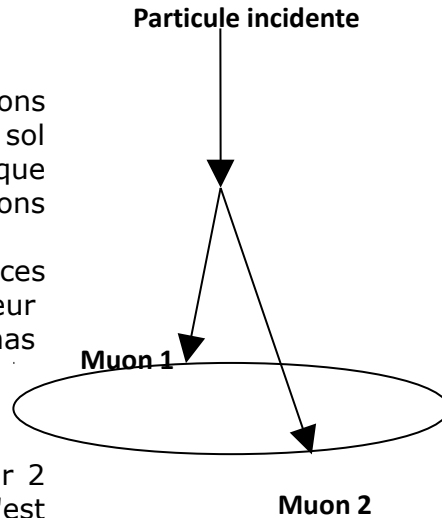
Nous avons alors pensé que cela venait du matériel utilisé pour réaliser ces acquisitions. Premièrement, le matériel que nous utilisons aujourd'hui est plus performant que celui utilisé par Pierre Auger. Mais au delà de la différence technologique, il y a aussi la différence géométrique des détecteurs utilisés. Alors nous nous sommes intéressés à l'influence de la géométrie du détecteur sur la détection des muons. L'intérêt porté à ceci était conforté par le fait que la décroissance (peut-être trop rapide) de nos signaux se faisait pour des écartements entre les scintillateurs de l'ordre de grandeur de la largeur même du scintillateur.

Ainsi, après réflexion et après discussion avec Eric Lesquoy et Gerard Tristam, il nous a paru évident qu'un facteur géométrique devait être pris en compte pour corriger nos mesures. La décroissance rapide des signaux obtenus au début des

courbes pourraient provenir uniquement des caractéristiques géométriques du détecteur, et non à la probabilité de trouver plus ou moins de muons dans un endroit donné.

En effet, de façon intuitive, prenons 2 muons formant un V et se dirigeant chacun vers le sol (figure ci-contre). Supposons pour simplifier que ces muons passent par deux positions diamétralement opposées d'un cercle.

On comptera alors une coïncidence si ces deux muons frappent chacun un scintillateur différent. Nous allons montrer grâce aux schémas ci-dessous que la probabilité de détecter 2 muons proches l'un de l'autre est plus grande que celle de détecter 2 muons éloignés l'un de l'autre, même s'il est aussi probable de trouver 2 muons proches que 2 muons éloignés (ce qui n'est pas le cas en réalité).



Voyons cela sur deux schémas :

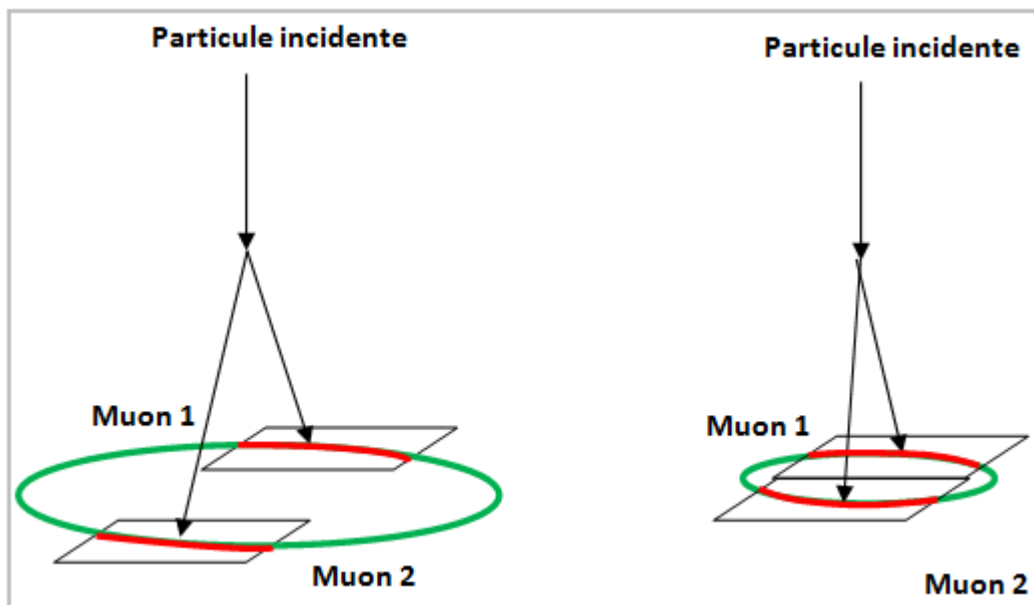


Figure a – Scintillateurs écartés d'une distance d

Figure b – Scintillateurs écartés d'une distance $d = 0$ cm

Les muons ne seront détectés que s'ils tombent sur les scintillateurs, sur les parties du cercle surligné en rouge. On peut donc évaluer les probabilités que les muons soient détectés :

Cette probabilité est proportionnelle au rapport de la longueur curviligne des arcs rouges sur le périmètre du cercle. Or ce rapport est bien plus grand lorsque les scintillateurs sont rapprochés (figure b), que lorsque les scintillateurs sont éloignés (figure a).

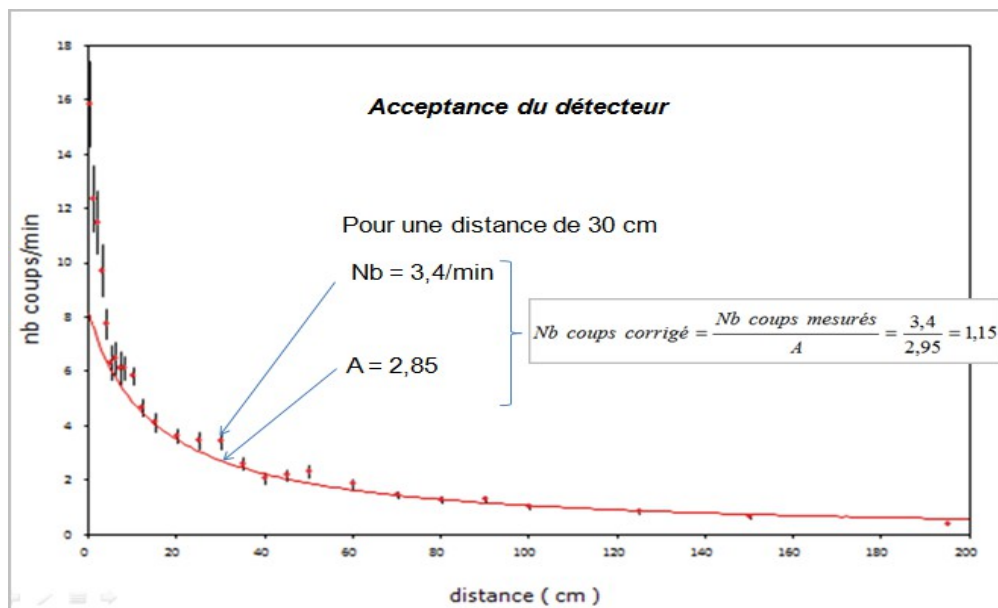
Mais pour se rendre compte de l'effet réel de ce facteur géométrique (appelé

« acceptance du détecteur »), nous avons réalisé un calcul plus poussé. Nous avons

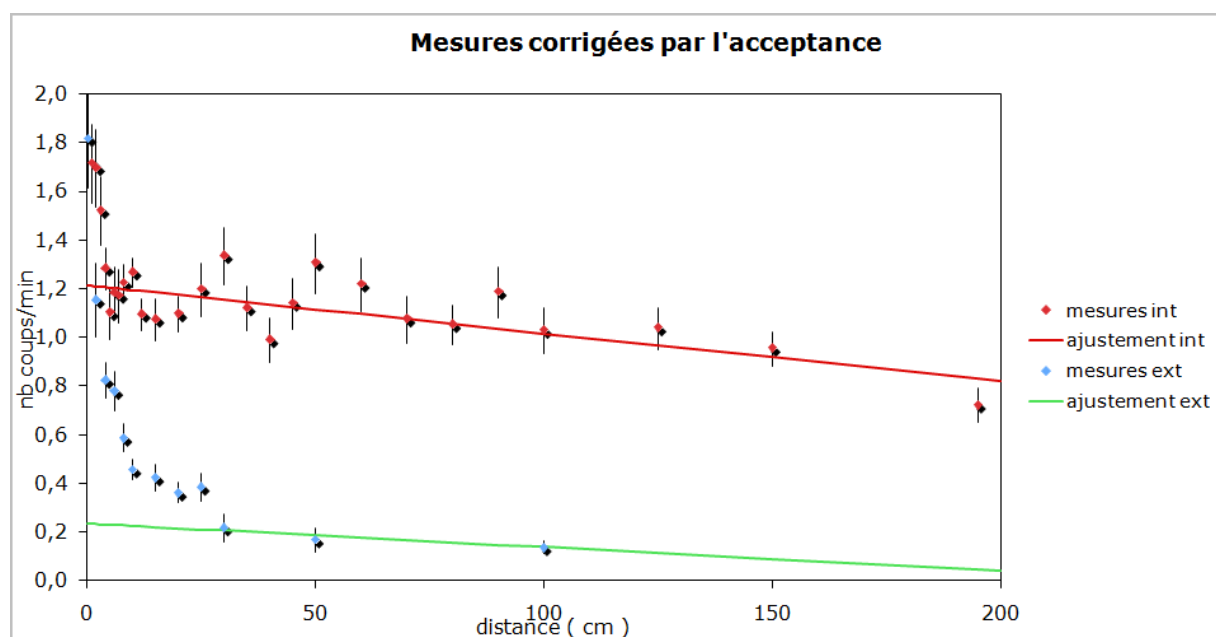
Convaincu alors de l'impact de la distance entre les scintillateurs sur les mesures réelles de muons, nous avons écrit un programme permettant d'évaluer précisément la correction à apporter aux mesures. Il s'agit d'une simulation « Mont Carlo ». Le calcul ainsi que le principe du programme se trouvent en annexe 1.

Ci dessous, la courbe en rouge représente l'acceptance (notée A) du détecteur en fonction de l'écartement entre les raquettes. Elle est liée à la probabilité que le détecteur détecte 2 muons en coïncidence, en fonction de l'écartement.

Puisque pour les faibles écartements, le détecteur a « A » fois plus de chance de détecter des muons en coïncidence, il faut diviser toutes les mesures obtenues par A, pour chaque écartement.



Après correction, voici les courbes obtenues.



Nous constatons ici que cela ne résout pas les problèmes du pic obtenu pour de faibles écartements.

Ces pics représentent-ils un phénomène physique, ou proviennent-ils des caractéristiques du détecteur encore une fois ? Nous penchons pour la deuxième réponse. En effet, en considérant les valeurs maximales de ces pics, cela conduirait à un flux de muons bien plus important que celui mesuré lors de coïncidences de muons uniques.

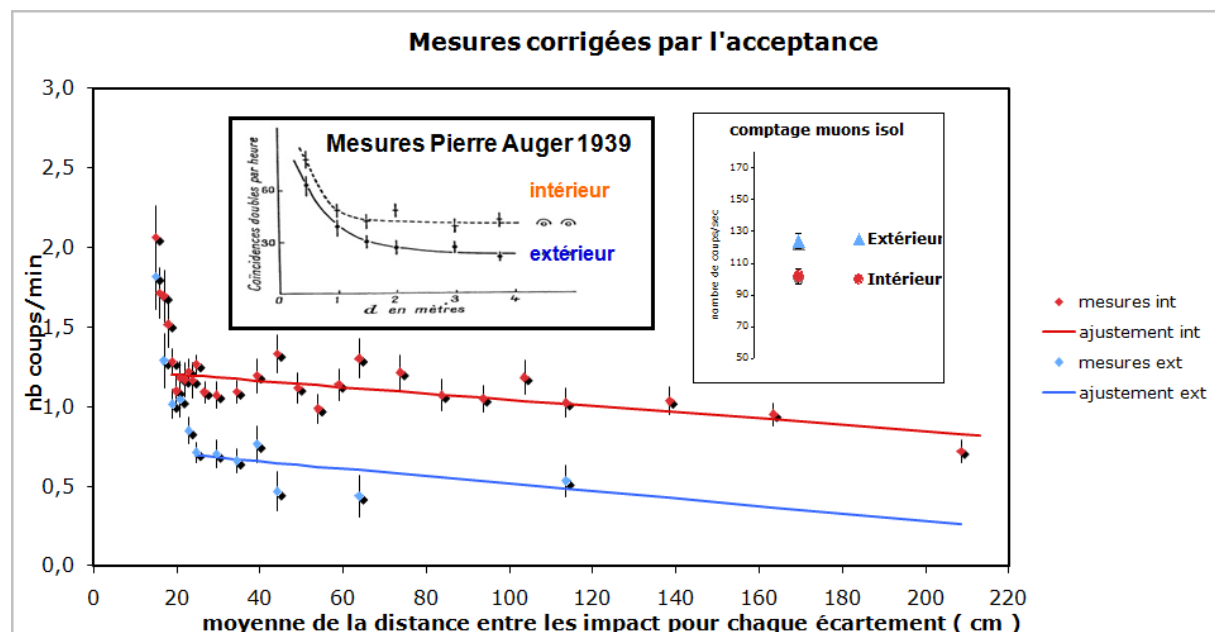
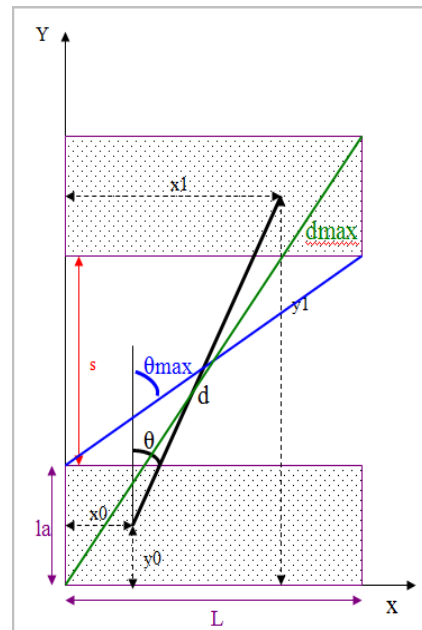
Nous avons décidé alors de nous soucier de la deuxième partie des mesures. En modélisant par une droite, nous obtenons les courbes ci dessus. Les pentes des courbes obtenues sont relativement faibles, ce qui nous pousse à penser que nous observons ici les gerbes atmosphériques et non des gerbes créées lors de la traversée de muons dans le plafond.

Par contre, il est intéressant de remarquer une différence de pente entre les deux courbes obtenues.

Mais nous faisons peut-être une erreur dans la construction de nos graphiques. En effet, pour un écart s entre les scintillateurs, la distance moyenne entre les 2 muons détectés en coïncidence est $(s+d_{\max})/2$.

Il paraît donc plus judicieux d'exprimer les coups comptés en coïncidence, non pas en fonction de l'écart s entre les scintillateurs, mais en fonction de la distance moyenne entre deux muons détectables pour un écart s entre les scintillateurs.

Voici alors les courbes obtenues après cette nouvelle correction :



Les pentes des droites obtenues sont alors identiques, et faibles. Comme nous le suggérons auparavant, ces faibles pentes doivent montrer que le point de convergence, c'est à dire le départ de la gerbe, doit être très haut dans l'atmosphère. Nous pensons donc observer des gerbes atmosphériques dans les deux cas (intérieur et extérieur).

Mais ce qui est étrange, c'est de constater que la courbe bleue est sous la courbe rouge. Cela signifierait que le nombre de gerbes est plus important à l'intérieur qu'à l'extérieur, alors que le flux de muons est plus important à l'extérieur qu'à l'intérieur (ce qui est logique compte tenu de l'absorption des muons par la matière).

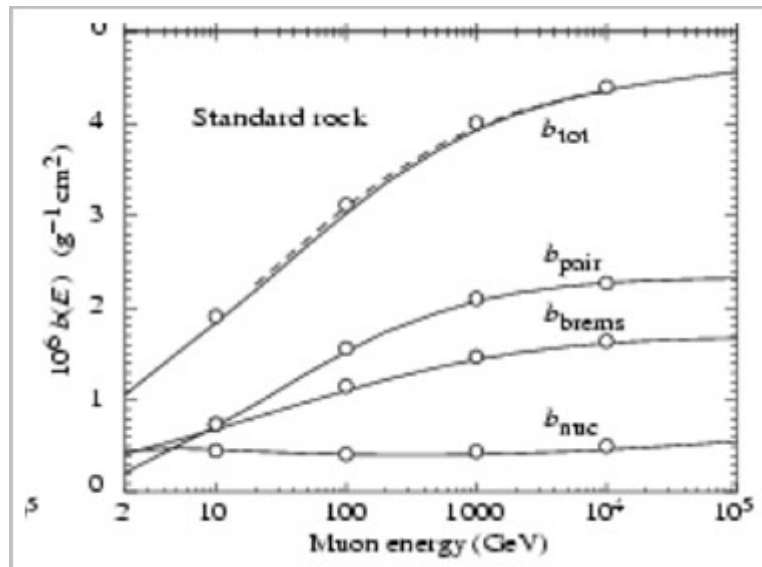
Il est clair que cela doit être un effet provoqué par le plafond. Mais nous ne savons pas encore quel phénomène en est responsable.

Deux points sont donc à expliquer :

- Les pics obtenus pour de faibles écarts, qui devraient résulter de la géométrie de l'appareil. Une façon de déterminer l'influence de la géométrie consisterait à assembler des scintillateurs de largeurs beaucoup plus faibles avec des photomultiplicateurs et de procéder à un ensemble de mesures.
- L'influence du plafond pour expliquer la position relative des deux courbes.

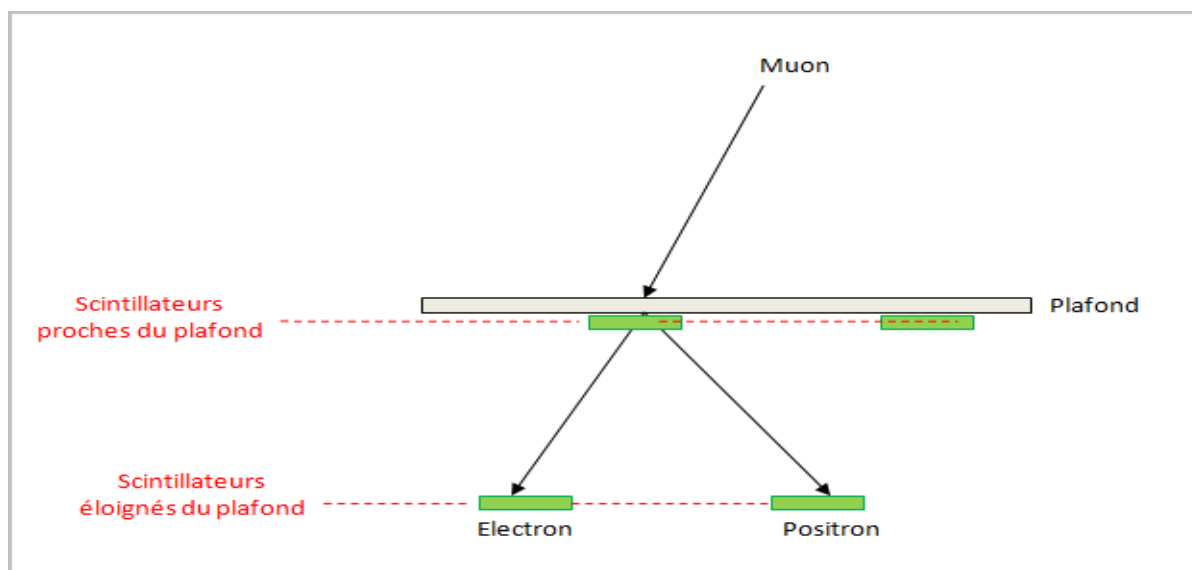
Nous faisons des recherches documentaires pour comprendre les interactions qui peuvent avoir lieu entre la matière et les muons lorsque ceux-ci la traversent.

Un document (ci-dessous) montre alors que les muons peuvent émettre des paires « électron-positron » lors d'interaction avec la matière, ou encore des photons par rayonnement de freinage.



Ces particules pourraient peut-être être émises avec des angles suffisamment grands pour être comptées en coïncidence dans les deux scintillateurs.

Nous allons vérifier cette hypothèse en faisant des mesures à l'extérieur des bâtiments, directement sous une dalle en béton que nous allons fabriquer. Ainsi, les particules telles que les paires électron-positron, ainsi que les photons seraient trop proches pour pouvoir traverser les deux scintillateurs, comme le montre le schéma ci-dessous.

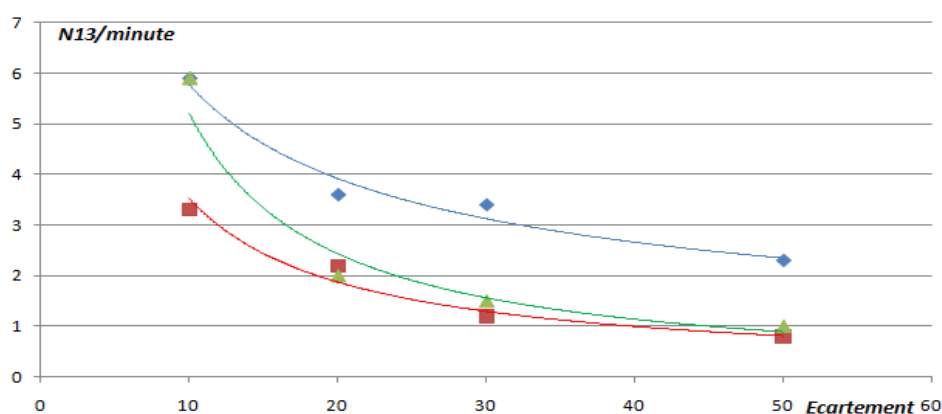


Suite à quelques problèmes techniques rencontrés, en particulier une alimentation qui a rendu l'âme, puis une fuite de lumière dans un scintillateur, et enfin un climat peut propice à mettre un détecteur de muons dehors, nous n'avions dans un premier temps, qu'un résultat expérimental, mais qui s'avérait très prometteur.

La dalle en béton couvre une surface de 1m sur 50 cm, et a une épaisseur de 15 cm. Pour des raisons techniques, les scintillateurs sont à 20 cm sous la dalle en béton. Le nombre de muons mesurés alors en coïncidence est reporté dans le tableau ci dessous :

	Avec la dalle	Sans la dalle
Coïncidence N13 (par min)	1,33	1,72

Puis depuis peu, nous avons pu compléter nos résultats qui apparaissent ci-dessous



Le graphique ci dessus montre la comparaison entre le nombre de gerbes détectées en coïncidences N13 avec et sans plafond.

La courbe bleue a été obtenue à l'intérieur du lycée, celle en vert a été obtenue à l'extérieur du lycée, avec la dalle de béton au dessus, et enfin, celle en rouge a été obtenue à l'extérieur du lycée, sans dalle de béton au dessus.

L'expérience confirme nos hypothèses :

La courbe bleue étant bien au dessus de la courbe verte, cela signifie qu'en

réalisant les mesures lorsque le détecteur est proche du plafond, les scintillateurs n'arrivent pas à détecter en coïncidence les particules résultant de l'interaction entre les muons et la matière. La courbe verte suit alors la courbe rouge obtenue sans plafond ni dalle de béton au dessus du détecteur.

Sauf pour les faibles distances entre les scintillateurs 1 et 3, où la courbe verte se rapproche alors de la courbe bleue. Cela peut s'interpréter par le fait que lorsque la distance est suffisamment faible, les particules issues de l'interaction entre les muons et le béton peuvent être capter par les deux scintillateurs en coïncidence.

Il pourrait être intéressant de voir à partir de quelle hauteur de la dalle de béton, les particules créées par l'interaction entre le muon et le béton commencent sérieusement à être pris en compte dans le comptage. On pourrait alors pourquoi pas en déduire un angle entre les directions des électrons et des positrons. Mais le problème sera alors d'avoir une dalle de béton de surface plus grande pour être certain que le détecteur en est bien recouvert.

Il se pourrait ainsi que la suite de ces expériences nous poussent à étudier plus particulièrement l'interaction des muons avec la matière.

IV – Notre détecteur de muons

Dans la mesure où l'in2p3 met à notre disposition le cosmodétecteur pour une durée limitée (de 3 ans tout de même), nous avons la volonté d'élaborer notre propre détecteur de muons. Le principe de détection résultant de l'association de scintillateurs avec des photomultiplicateurs sera identique. Mais le traitement de l'information sera différent et résultera d'une réflexion personnelle du groupe, assistée à la fois de nos professeurs, mais aussi de José Busto et de Catherine Thibault dont les conseils nous seront précieux. Notre but n'est pas de reproduire un détecteur identique à celui existant. Au fur et à mesure de l'utilisation de la roue cosmique, nous réfléchissons aux particularités que nous souhaiterions apporter au dispositif ou au traitement de l'information, selon ce qu'il paraît nous manquer dans son utilisation et des mesures que nous souhaitons effectuer.

Dans un premier temps, nous comptons ainsi motoriser la rotation des scintillateurs, et synchroniser cette rotation aux mesures réalisées. Nous souhaitons également associer un GPS au dispositif, de sorte d'enregistrer les coordonnées d'espaces et de temps du passage des muons, dans un but ultérieur.

D'autre part, le projet mené dans le lycée intéressant de plus en plus d'enseignants, nous réfléchissions à l'exploitation que nous pourrions faire des données avec les professeurs de mathématique, SVT, mais aussi de philosophie, grâce à notre professeur de philosophie qui est très impliqué dans ce projet. Cela nécessite d'élaborer nous même le circuit électronique qui gèrera l'information, ainsi que le logiciel qui pilotera l'ensemble du dispositif.

Mais finalement, les expériences menées avec le cosmodétecteur nous ont emmené vers d'autres priorités.

Dans un deuxième temps, suite aux manipulations réalisées sur le cosmodétecteur du CPPM, nous nous disons qu'il serait intéressant qu'il permette l'étude des gerbes atmosphériques, ainsi que l'étude de gerbes issues de la traversée de particules dans de la matière dense.

D'autre part, les études en altitude étant également intéressantes, il faudrait que ce détecteur soit facilement transportable, et facile à rendre opérationnel pour procéder à des mesures. Pour l'avoir déjà transporter un grand nombre de fois afin de procéder à des mesures en extérieur, ce sera ainsi une de nos priorités.

D'autre part, il pourrait être intéressant, dans un premier temps, de se limiter à la conception d'autres raquettes de surfaces différentes pour procéder à des mesures dont nous parlions précédemment.

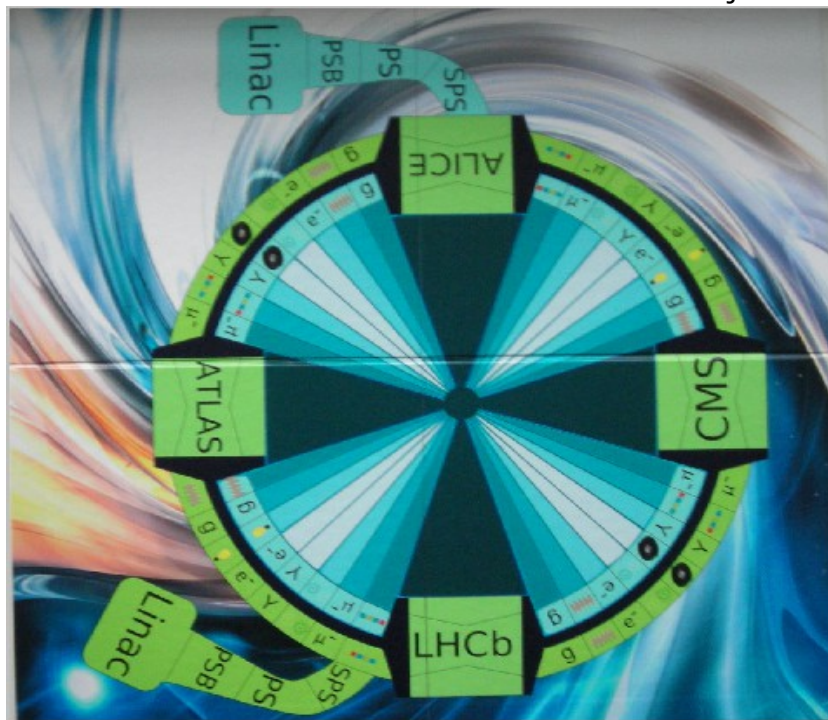
Ainsi, avec deux détecteurs synchronisés, il pourrait-être possible d'aller plus loin dans la détection des gerbes, mais nous avouons que cela nous semble bien compliqué pour le moment.

A l'heure actuelle, nous avons pu nous occuper de la partie optique du détecteur et nous avons pu ainsi tester les réponses des photomultiplicateurs en coïncidence.

Il nous reste à élaborer la partie électronique.

V – Le jeu de société

Le LHC étant un projet très médiatisé et à l'origine du projet que nous menons, nous nous sommes documenté sur son fonctionnement et ses objectifs.



De façon à partager nos connaissances, et à les rendre accessible à un public plus large, nous avons eu l'idée de réaliser un jeu de société basé sur le fonctionnement du Trivial Pursuit. Après avoir réalisé une première version (Voir le plateau de jeu ci-dessus), nous l'avons montré à Mick Storr, notre principal contact au CERN. Par la voix de Mick Storr qui était très intéressé par ce jeu, le CERN nous a

encouragé à poursuivre ce projet, en le rendant plus réaliste et plus ludique. Une deuxième version plus sérieuse a alors été réalisée. Cette version a été présentée lors de la finale des Olympiades de Physiques et a notamment séduit Michèle Leduc, présidente alors de la Société Française des Physiciens, qui nous a mis en rapport avec Guy Wormser l'in2p3 pour que ce jeu soit commercialisé. Sciences à l'Ecole, par l'intermédiaire de Cécile Barbachoux qui nous met en relation avec Etienne Augé, vice président de l'in2p3, nous accompagne dans ces démarches.



Ci dessus, présentation du jeu au CERN

Le but du jeu est de fabriquer un boson de Higgs. Et cela se réalisera lorsque 2 protons circulant en sens inverse se trouveront tous deux dans un même détecteur.

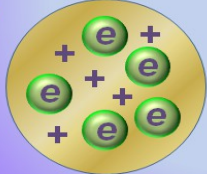
Il s'agit d'un jeu de société dont le design rappelle le fonctionnement du LHC et qui doit permettre à ceux qui y jouent d'apprendre sur la physique des particules ainsi que sur le LHC.

Les protons, issus des molécules de dihydrogène, doivent être accélérés en plusieurs étapes avant d'accéder au LHC. Ceci est réalisé par une accélérateur linéaire (LINAC) puis par trois accélérateurs circulaires, les synchrotrons PSB, PS, et SPS. Avec une énergie suffisante, les protons peuvent donc entrer dans le LHC, via les deux rampes bleue et verte présentées sur le plateau de jeu, et circulent alors en sens contraire, dans deux chambres à vide distinctes.

Mais pour rendre la partie de jeu attrayante, nous avons volontairement aussi incorporé des cases « piège ». C'est ainsi que vous trouverez des cases « gluon », trou noir, ou encore antimatière, cette dernière ayant pour conséquence l'annihilation pure et simple du pion, comme le veulent les lois de la physique.

Suite aux différentes remarques que nous avons eu en présentant ce jeu, nous avons encore apporté quelques modifications. Nous devons également faire d'autres

questions (le jeu en compte actuellement une centaine – voir ci-dessous), et traduire l'ensemble en anglais. Pour rendre le jeu attrayant et ludique, chaque carte comporte un petit article et une photo sur le sujet de la physique des particules.

<p>Lequel de ces prénoms correspond à une expérience du LHC ?</p> <p>a) Alice b) Julien c) Sandra d) Nicolas</p> 	<p>Alice est un détecteur constitué d'un très grand nombre de capteurs. Dimensions : 16 m de largeur, 16 m de hauteur, et 22 m de longueur. Alice sera utilisé lors de collisions réalisées entre des noyaux de plomb. Le but principal d'Alice sera d'étudier un état particulier de la matière, le plasma de quarks et de gluons. On pense que cet état a existé lors des premiers instants après le big-bang, lorsque la température était trop élevée pour que les quarks ne puissent se lier entre eux.</p>	<p>Combien il y a de quarks up dans un électron ?</p> <p>a) 0 b) 1 c) 2 d) 3</p> 	<p>L'électron est une particule élémentaire, donc une particule insécable. Il a été découvert en 1898 par J.J. Thomson. Le modèle de l'atome de Thomson était un « pudding » dans lequel se mélangeaient charges positives et électrons, le tout étant neutre.</p>
<p>Que signifie le « T » du détecteur « ATLAS » ?</p> <p>a) Toroidal b) Top c) TeV d) Terre</p> 	<p>ATLAS est un détecteur géant. Il résulte de 20 années de travail. Il mesure 44m de long, 22m de diamètre, et pèse 7000 tonnes. ATLAS est un emboîtement d'un ensemble de détecteurs. On trouve ainsi un détecteur de trace (capteur au silicium) qui s'intéresse aux particules chargées, un calorimètre électromagnétique qui détecte photons et électrons, un calorimètre hadronique sensible aux particules contenant des quarks, puis un spectromètre à muons. Ainsi, ATLAS est un détecteur polyvalent, capable de détecter toutes nouvelles particules et d'en calculer la masse.</p>	<p>Le gluon est une particule...</p> <p>a) De matière ? b) Transmetteur de l'interaction forte ? c) Transmetteur de l'interaction faible ? d) Fictive ?</p> 	<p>Les gluons sont les transmetteurs de l'interaction forte. Lorsque 2 quarks interagissent entre eux, ils échangent un gluon. La particularité de l'interaction forte vient du fait que le gluon interagit également avec les quarks. Il en résulte que l'interaction forte est précisément... extrêmement forte. Plus on essaie d'arracher un quark du champ d'interaction crée par un autre quark, et plus la force d'interaction qui les lie est intense.</p>

VI – Site internet

Outre le jeu, nous avons désiré laisser une trace personnelle plus facilement accessible, sous la forme d'un site internet. Ce site doit permettre à chacun, même sans connaissance particulière dans ce domaine, de se mettre à jour concernant la physique des particules et le LHC.

Les articles qui y figurent doivent bien entendu être personnels, issus d'une recherche approfondie sur ce sujet. Le CERN s'est ici avéré d'une aide précieuse en mettant à disposition une dizaine de conférences sur internet, qu'il nous a été possible de visionner. Cela constituait souvent des points de départ à partir desquelles nous dirigeons nos recherches.

La structure du site est terminée. Mais tous les articles ne sont pas encore rédigés.

Voici toutefois l'adresse du site :

http://www.lpi.ac-poitiers.fr/doc/annee_09_10/acf_09_10/univers-particules/html/modele_standard.html#question12

Nous rappelons ici nos partenaires que nous remercions vivement :

- Jose Busto – in2p3– CPPM Marseille
- Eric Lesquoy – CEA
- Mick Storr – CERN
- Catherine Thibault – in2p3
- Gérard Tristam – in2p3

- Sciences à l'Ecole, grâce au projet COSMOS à l'école.

Annexe 1 : Acceptance du détecteur :

1) Calcul analytique de l'influence de l'écart entre les scintillateurs sur la probabilité de détecter deux muons en coïncidence

On suppose ici que les 2 muons formant un V peuvent venir avec des angles (entre les deux branches du V) différents avec la même probabilité, de sorte de n'évaluer que l'effet engendré par la géométrie du détecteur.

Soient :

L : longueur du scintillateur

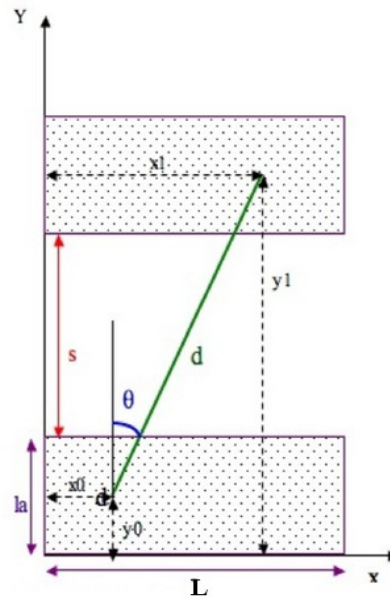
la : largeur du scintillateur

s : distance entre les faces internes des deux scintillateurs posés sur le même plan

d : distance entre les deux muons formant un V.

(x_0, y_0) coordonnées du muon 1

(x_1, y_1) coordonnées du muon 2



? Comment varie la probabilité que ces muons soient détectés en coïncidence en fonction de l'écart entre les scintillateurs?

On suppose que les deux muons d'un même V passent par un cercle, de manière diamétralement opposée (voir schéma suivant).

- Si $d > 22,5$ cm

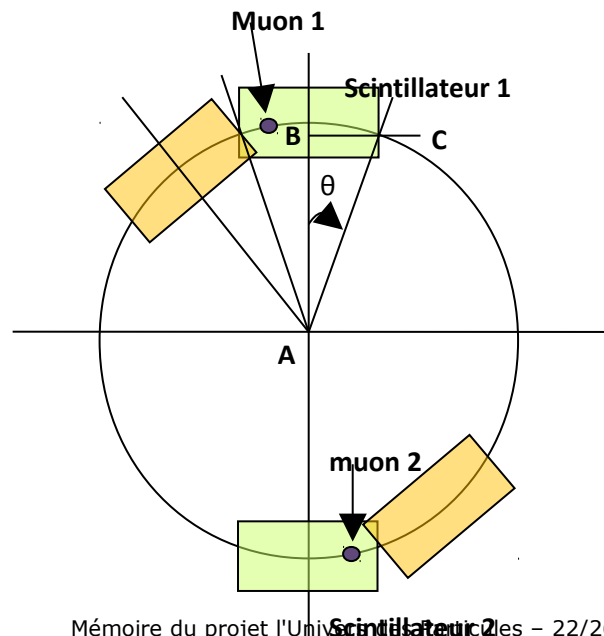
ABC triangle rectangle

$$AC = \frac{d+l}{2}$$

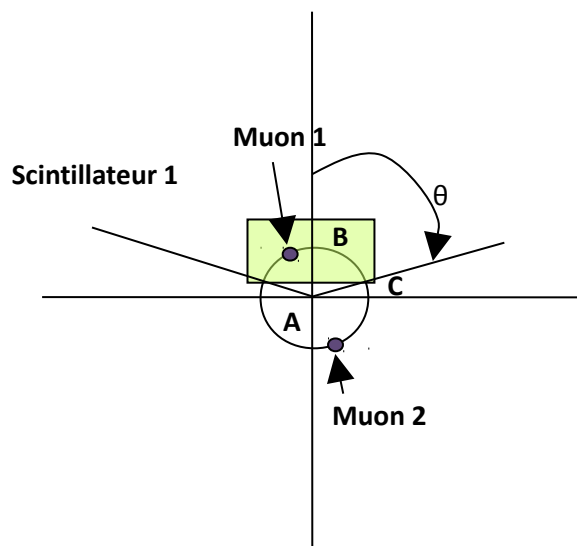
$$BC = \frac{L}{2}$$

$$\theta = \text{Arcsin}\left(\frac{L}{d+l}\right)$$

La probabilité pour que ces muons soient détectés en coïncidence sera donc :



$$P_1 = \frac{2\theta}{2\pi} = \frac{1}{\pi} \text{Arcsin}\left(\frac{L}{d+l}\right)$$



- **Si $d < AB = \frac{d}{2}$**

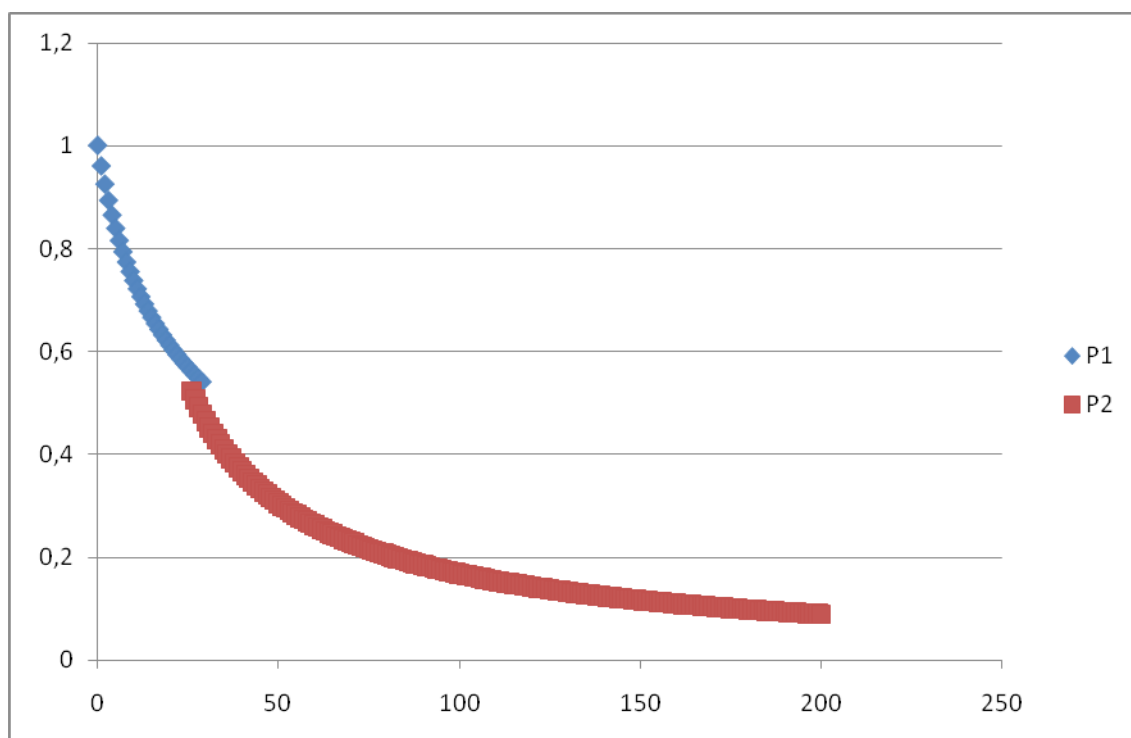
$$AC = \frac{d+l}{2}$$

$$\theta = \text{Arc cos}\left(\frac{d}{d+l}\right)$$

La probabilité pour que ces muons soient détectés en coïncidence sera donc :

$$P_2 = \frac{2\theta}{2\pi} = \frac{1}{\pi} \text{Arc cos}\left(\frac{d}{d+l}\right)$$

Ce qui donne le graphique suivant, montrant la probabilité en ordonnée, en fonction de la distance en abscisse.



2) Principe du programme mesurant l'acceptance du détecteur pour les scintillateurs 2 et 3 sur le même plan.

Le problème est modélisable par des baguettes horizontales tombant sur les plaques. Pour chaque écart entre les plaques, le détecteur compte 1 si les deux extrémités du bâton sont chacune sur une raquette différente, et 0 sinon. On suppose qu'il y a la même densité de baguettes en fonction de leur longueur et de l'angle qu'elles font avec les raquettes. On se met dans un système d'axes dont l'origine est sur le coin bas gauche de la raquette fixe, l'axe des x le long de sa longueur L et celui des y le long de sa largeur l.

La distance s qui sépare les deux raquettes est le long de l'axe y.

Dans la pratique, on ne s'intéresse qu'aux baguettes dont l'une des extrémités est dans la première raquette.

Pour chaque distance s qui sépare les deux raquettes, en allant de 1 à 200 cm, on tire au hasard avec une densité uniforme :

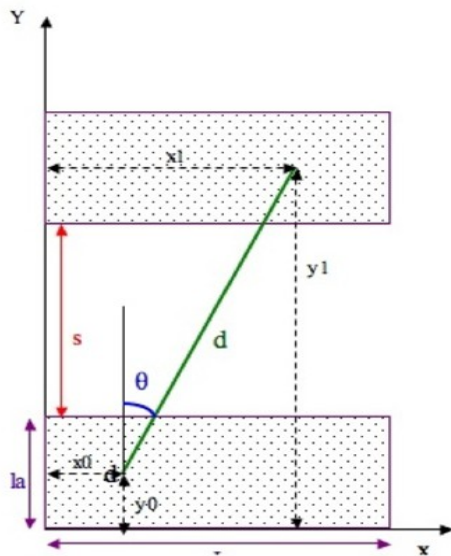
- une abscisse x_0 ($0 < x_0 < L = 30$ cm)
- une ordonnée y_0 ($0 < y_0 < l = 13$ cm)
- une longueur de baguette d ($0 < d < 230$ cm)
- un angle θ ($0 < \theta < \pi/2$, le problème étant symétrique entre $0 - \pi/2$ et $\pi/2 - \pi$)

On calcule ensuite les coordonnées x_1 , y_1 de l'extrémité de la baguette :

- $x_1 = x_0 + \cos(\theta) * d$
- $y_1 = y_0 + \sin(\theta) * d$

et on regarde si :

$$\begin{aligned} 0 &< x_1 < L \\ s+l &< y_1 < s+2l \end{aligned}$$



$$x1 = x0 + d \cdot \sin(\theta)$$

$$y1 = y0 + d \cdot \cos(\theta)$$

s varie de 0 à s_{\max}

simulation:
 $0 < x0 < L$
 $0 < y0 < la$
 $0 < d < d_{\max} = \sqrt{(2 \cdot la + s_{\max})^2 + L^2}$
 $0 < \theta < \pi/2$

événement accepté si:
 $0 < x1 < L$
 $s + la < y1 < s + 2 \cdot la$

Annexe 2 : Document scientifique historique

LES GRANDES GERBES DE RAYONS COSMIQUES

PAR PIERRE AUGER, ROLAND MAZE, PAUL EHRENFEST Jr, ANDRÉ FRÉON.

Sommaire. — Les coïncidences entre des compteurs de Geiger-Müller, placés à des distances de plusieurs mètres ont pu être décelées et ont conduit à mettre en évidence l'existence de très grandes gerbes de rayons cosmiques dans l'atmosphère. Les caractères de ces gerbes sont étudiés dans des laboratoires de haute montagne et à Paris. Ils conduisent à voir dans ces gerbes des cascades de Bhabha-Heitler, produites par des électrons d'énergie très élevée atteignant 10^{14} eV. Une composante pénétrante qui pourrait contenir des neutrons est également mise en évidence dans ces gerbes.

1. Introduction. — Pour mettre en évidence les effets secondaires des rayons cosmiques, Rossi [1] a employé un système de trois compteurs de Geiger Müller disposés de telle sorte qu'une seule particule ionisante ne pouvait les traverser tous les trois. Si les trois compteurs sont mis en action simultanément, donnant une coïncidence dans les appareils sélecteurs qu'ils alimentent, on a la preuve du passage simultané de deux ou plusieurs particules à travers l'appareil; les groupes de particules ainsi décelés se nomment gerbes. Rossi a montré qu'un écran de plomb disposé au-dessus d'un tel système de compteurs augmentait le nombre de gerbes, qui est très petit lorsque les appareils sont placés à l'air libre sans qu'aucun objet formé de matière dense ne les domine. Cet effet obtenu ainsi en l'absence de tout écran a été attribué aux gerbes de l'air. Bothe et Schmeiser [2] ont étudié la décroissance du nombre de « gerbes de l'air » lorsqu'on écarte un des compteurs du groupe, mais n'ont pu mesurer l'effet au delà de quelques décimètres, le nombre de coïncidences obtenues devenant du même ordre de grandeur que celui des coïncidences fortuites.

On peut cependant s'attendre à observer, dans un milieu aussi peu dense que l'air, des gerbes beaucoup plus étendues en surface, d'après la théorie de la formation des gerbes en cascades. Quoique les angles sous lesquels sont émises les paires successives de positons et de négatons soient très petits, les parcours dans l'air sont assez longs pour leur permettre de s'écarter notablement les uns des autres. Une étude des effets de ce genre consiste donc à rechercher les coïncidences entre compteurs éloignés, et pour pouvoir la faire utilement la réduction du nombre des coïncidences fortuites est nécessaire.

2. Appareils. — On sait que le nombre de coïncidences fortuites données par un appareil dépend du nombre de compteurs et du pouvoir de résolution du dispositif sélecteur. En augmentant le nombre de compteurs cependant on diminue généralement la grandeur de l'effet utile que l'on veut mesurer, et s'il est déjà très petit comme dans le cas présent, ce

procédé devient rapidement impraticable. Nous avons travaillé avec un nombre de compteurs allant de 2 à 4 et avons dû par conséquent porter notre effort sur les qualités du dispositif sélecteur. Celui-ci a été construit par M. Roland Maze suivant les principes qu'il a indiqués dans un récent article [3] et le pouvoir de résolution obtenu a atteint 5.10^{-6} sec. Cette valeur, prévue par le calcul, a été confirmée par une expérience simple dans laquelle le nombre de chocs individuels de deux compteurs est fortement augmenté par l'approche d'une substance radioactive : aucune augmentation des coïncidences réelles n'étant à prévoir dans ce cas, l'accroissement du nombre de coïncidences observées n'est dû qu'à l'obtention de fortuites plus nombreuses. Le nombre de fortuites peut être évalué par la formule

$$N = \frac{n^2 \tau (x-1)}{60(x-2)}$$

où n est le nombre de chocs individuels par minute, x le nombre de compteurs en coïncidences (supposés recevoir le même nombre de chocs) et τ le pouvoir de résolution en secondes. N est alors donné en coïncidences fortuites par heure, et son accroissement en fonction de celui de n donne τ .

Avec un tel appareil, et en utilisant des compteurs qui donnent dans notre laboratoire environ 200 chocs par min, les nombres de fortuites sont les suivants (par heure) :

Pour 2 compteurs	0,2
— 3 —	3.10^{-4}

On voit que l'emploi de deux compteurs n'est possible que pour la mesure d'effets assez notables, mais qu'avec trois, les fortuites sont absolument négligeables.

Les compteurs employés dans nos mesures provenaient des Établissements Philips (système Max Cosyns) ; leurs dimensions utiles sont : 34 cm de long, 32 mm de diamètre. Cela représente une surface utile d'environ 110 cm² soit 1/90 m². Dans les expériences