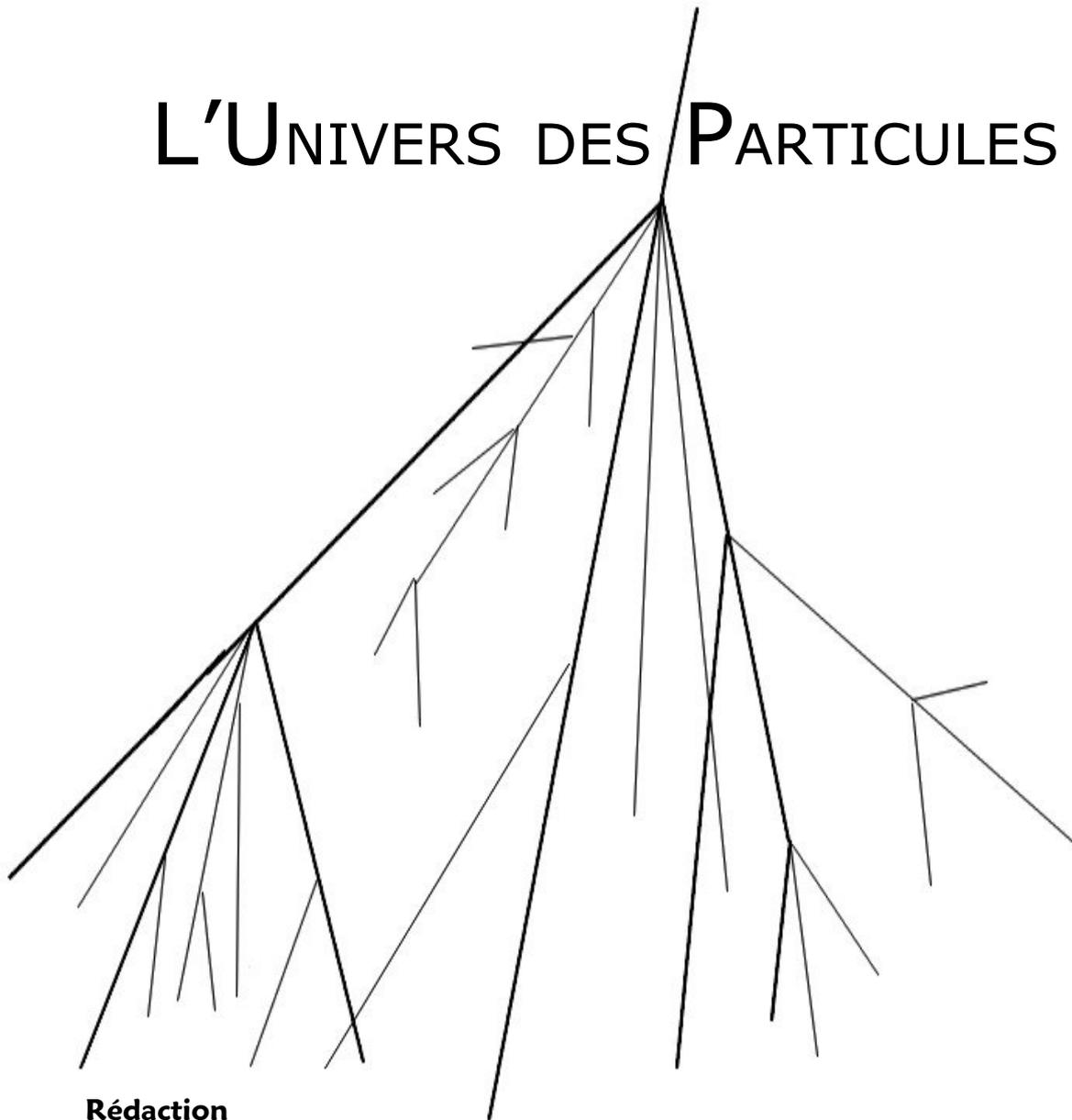


L'UNIVERS DES PARTICULES



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 que l'on perçoit entre infiniment grand et 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, et nous menons des expériences avec un détecteur de muons confectionné par l'in2p3, avant de réaliser notre propre détecteur.

I	Les objectifs du projet	3
II	La chambre à brouillard	4
III	Le Cosmodétecteur	6
IV	Notre détecteur de muons	14
V	Le jeu de société	15
VI	Site internet et exposition	17
VII	Les perspectives	18
VIII	Annexes	19

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 modèle, 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 de 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 rendu 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 étant banalisées. 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 du 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.

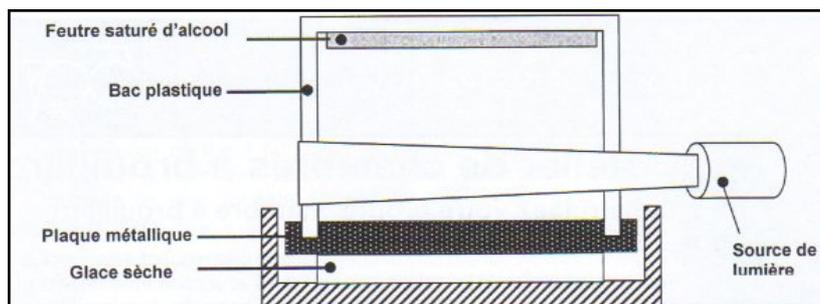
Des développements de cet outil furent ensuite longtemps utilisés pour repérer les trajectoires et déterminer la nature des particules.

Nous avons commencé notre initiation par cette expérimentation.

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

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 d'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 ajoutée une résistance 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. (voir photographies en annexe 1)

Clichés de la chambre à brouillard :

Sur cette première photographie, la trace présente une modification de la trajectoire. Il pourrait alors s'agir de la désintégration d'un muon qui conduirait à la formation de neutrinos (invisible), ainsi qu'un électron. Le muon et l'électron seraient alors les deux particules responsables des deux directions prises par la trace sur ce cliché.



Sur cette seconde photographie, il semblerait que les deux traces proviennent du même endroit, mais ce n'est pas suffisamment net pour l'affirmer. Mais si tel était le cas, cela proviendrait de la collision entre un muon et un électron d'un atome du gaz d'alcool.

Il est possible aussi de voir des traces plus chaotiques, mais nous n'avons pas encore observé de telles figures. Cela proviendrait de rayons cosmiques de basse énergie heurtant successivement des atomes du gaz d'alcool.

Les applications de cette chambre à l'apparence simple sont multiples mais nous avons décidé de ne pas nous concentrer uniquement sur ce moyen de détection de muons.

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 précises.

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'une action menée par Sciences à l'école.

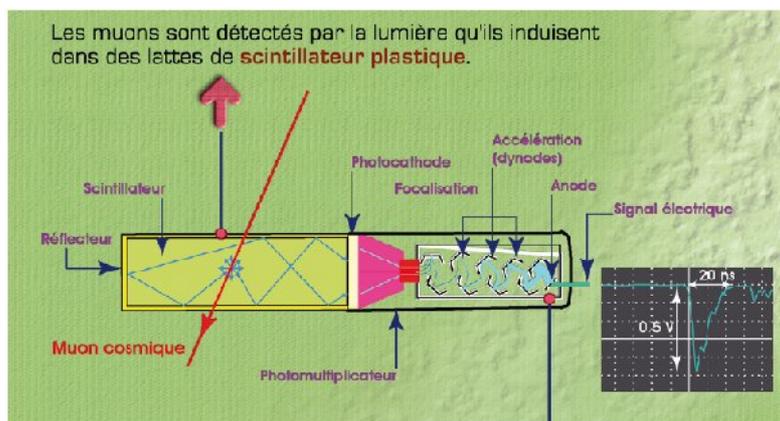
Il s'agit d'un instrument capable de compter les muons issus de rayons cosmiques entrant en collision avec les molécules de l'atmosphère. Comme nous le disions en introduction, observer et compter ces particules revient à observer la source des rayons cosmiques, située dans l'espace. Cette source peut 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 (1) séparées d'une vingtaine de centimètres. Chaque plaque est reliée à un photomultiplicateur (2).

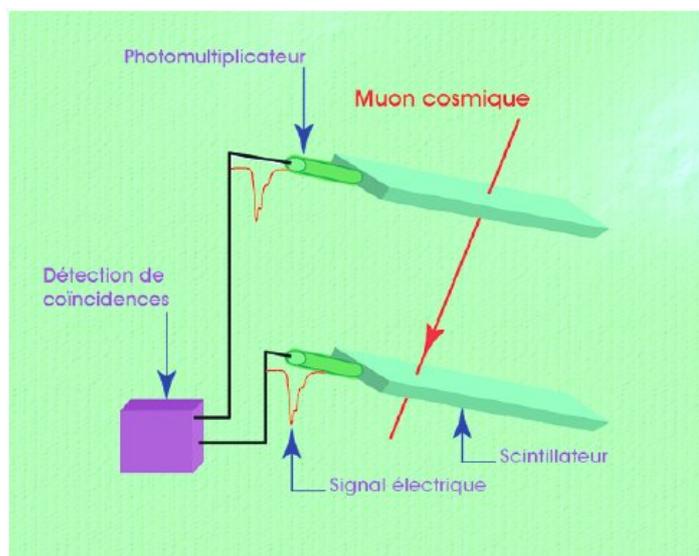


? Comment fonctionne le télescope à muons ?

Lorsqu'un muon traverse les deux plaques, il excite alors les molécules des scintillateurs, 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.

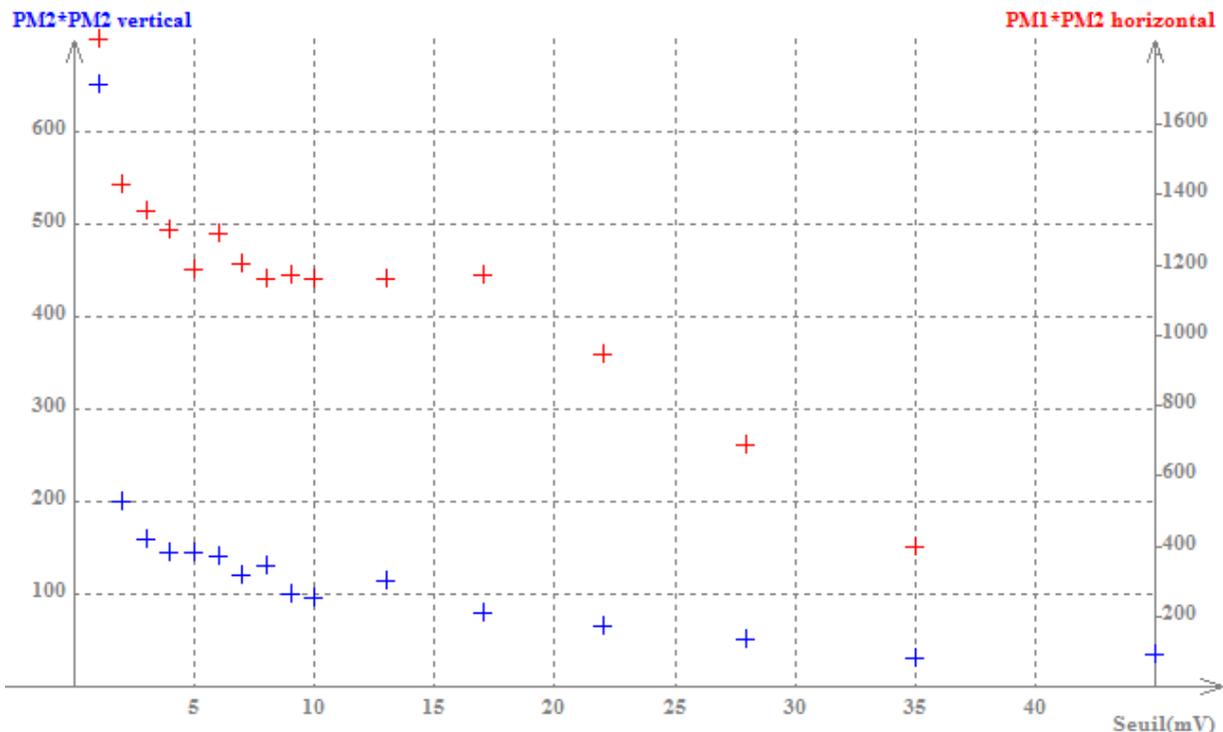
Pour s'affranchir des coïncidences fortuites, des réglages sont à ajuster, et nous avons dû comprendre sur-lesquels nous devons influencer.

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) comptée durant des durées de 10 minutes, en faisant varier le seuil (en mV) (en abscisse), en positionnant les scintillateurs à l'horizontale.



Graph 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.

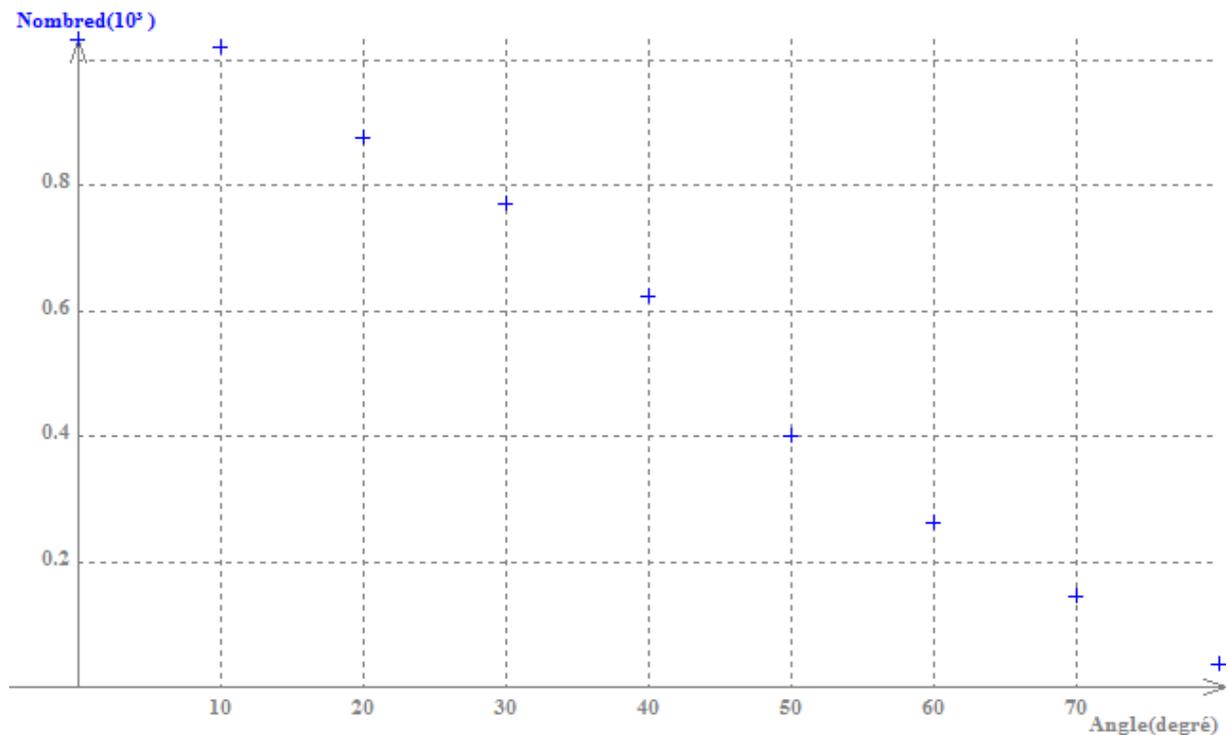
Cette interprétation semble cohérente avec une deuxième expérience que nous avons menée, représentée par les points bleus figurant sur ce même graphique. Ceux-ci ont été obtenus en mesurant les coïncidences durant des durées de 10 minutes, mais en positionnant cette fois-ci les scintillateurs de manière 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 **graph 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 faible amplitude : 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 .

Mais nous sommes allés un peu plus loin que cela. Lors de la sélection interacadémique des Olympiades de Physique, une question nous a été posée et, malheureusement, nous n'avons pas pu y apporter de réponse :

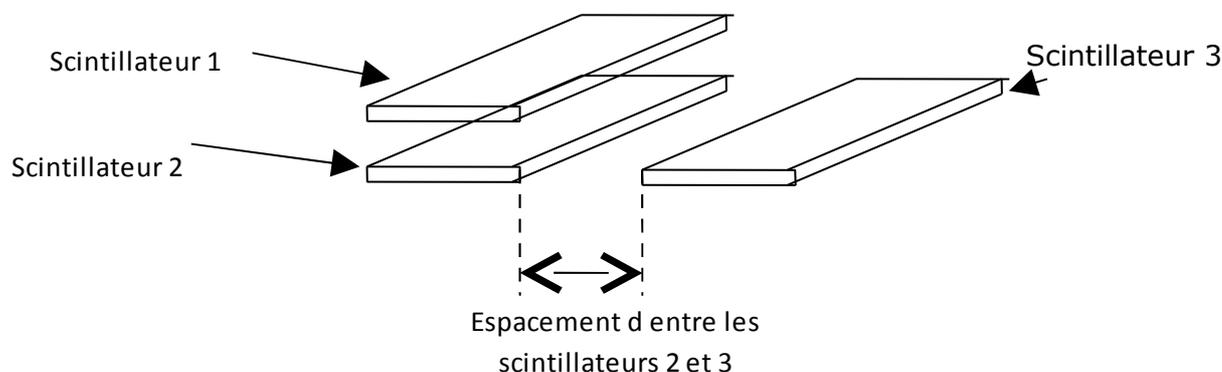
? Qu'en est-il des gerbes de particules ?

Nous ne pouvons 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 le jour des sélections interacadémique à Marne la Vallée, 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 qui a consisté à décrocher le troisième scintillateur de l'emplacement sur lequel il était fixé, pour le porter à hauteur du deuxième scintillateur.

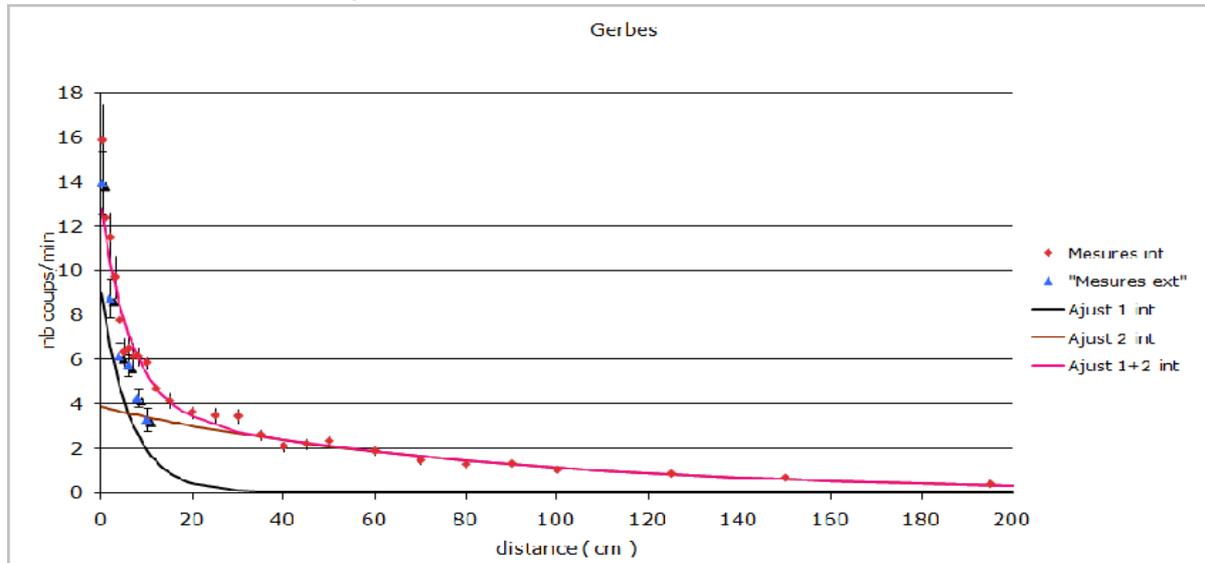


Nous avons alors réalisé des mesures : le but étant de compter le nombre de muons coïncidents avec les scintillateurs 2 et 3, en fonction de la distance.

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.

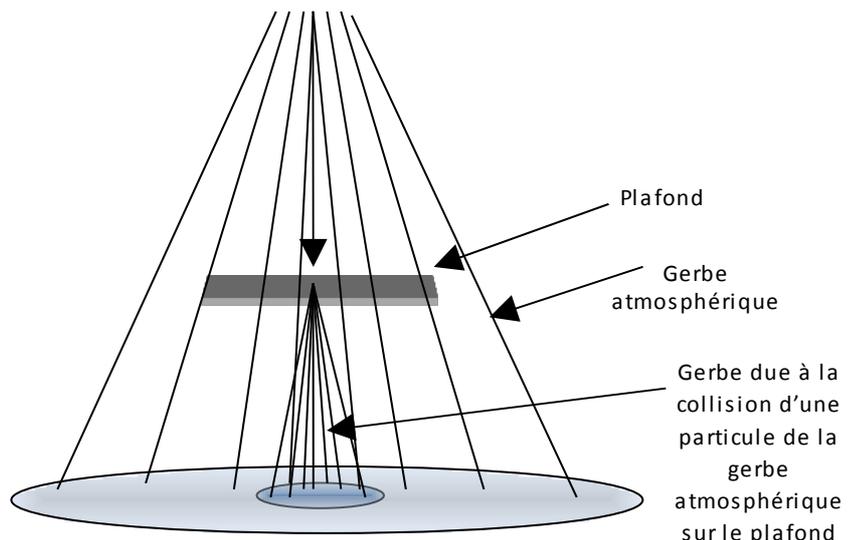
Nous avons alors essayé de faire une modélisation grâce à deux exponentielles, et cela a été beaucoup plus concluant. Cette modélisation est représentée sur la figure ci-dessus. La courbe rouge serait alors la somme des exponentielles représentées par la courbe noire (qui décroît rapidement – nommée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

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.

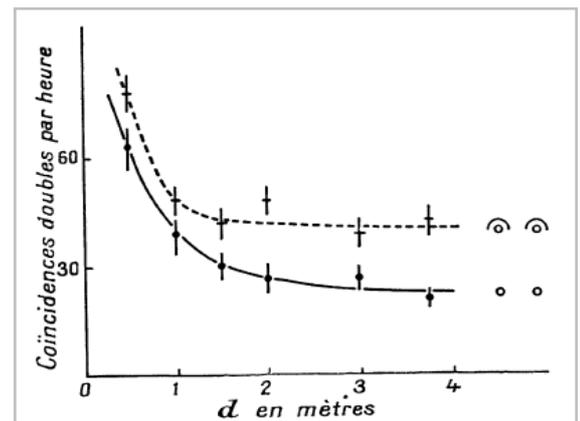


Après un moment de déception, il fallait tout de même en comprendre la raison. Notre première hypothèse fut que le scintillateur N°1 perturbe la mesure, car il se situe sur un plan au dessus des deux autres, et pourrait ainsi générer des gerbes. Mais cette piste n'a rien donné de probant.

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 montraient 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.



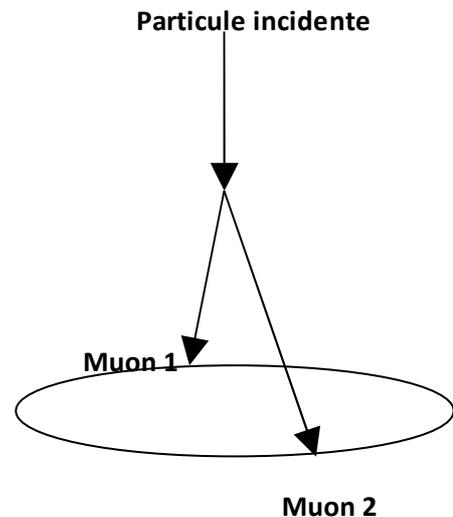
Nous avons alors pensé que cela venait du matériel utilisé pour réaliser ces acquisitions. Il est clair que le matériel que nous utilisons aujourd'hui est plus performant que celui utilisé par Pierre Auger. Mais au delà de la différence technologique, il y a aussi la différence géométrique des détecteurs utilisés. Alors nous nous sommes intéressés à l'influence de la géométrie du détecteur sur la détections 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 écartement entre les scintillateurs de l'ordre de grandeur de la largeur 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 obtenue 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 :

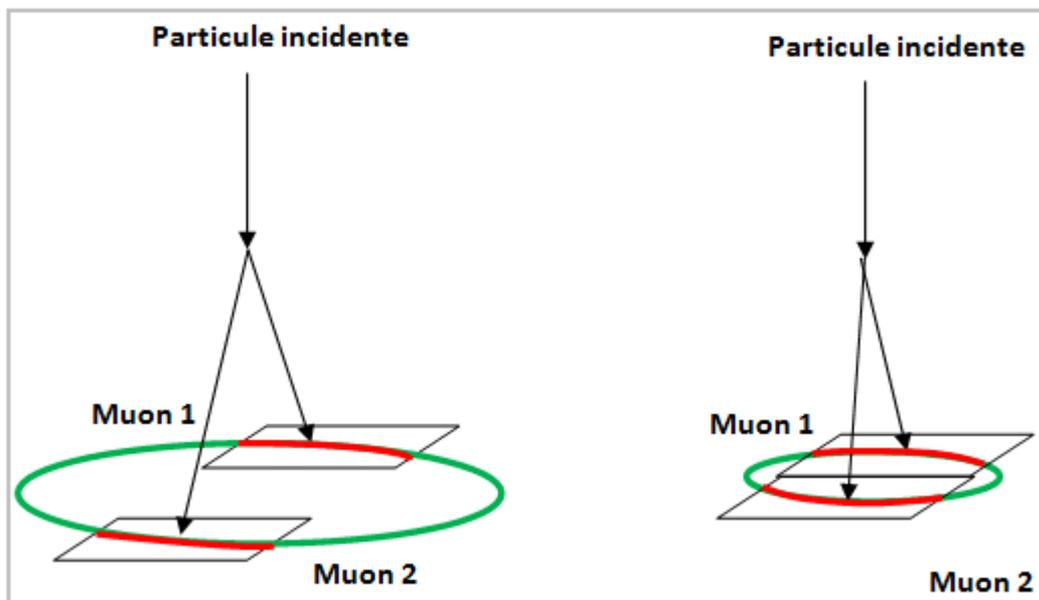


Figure a – Scintillateurs écartés d'une distance d

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

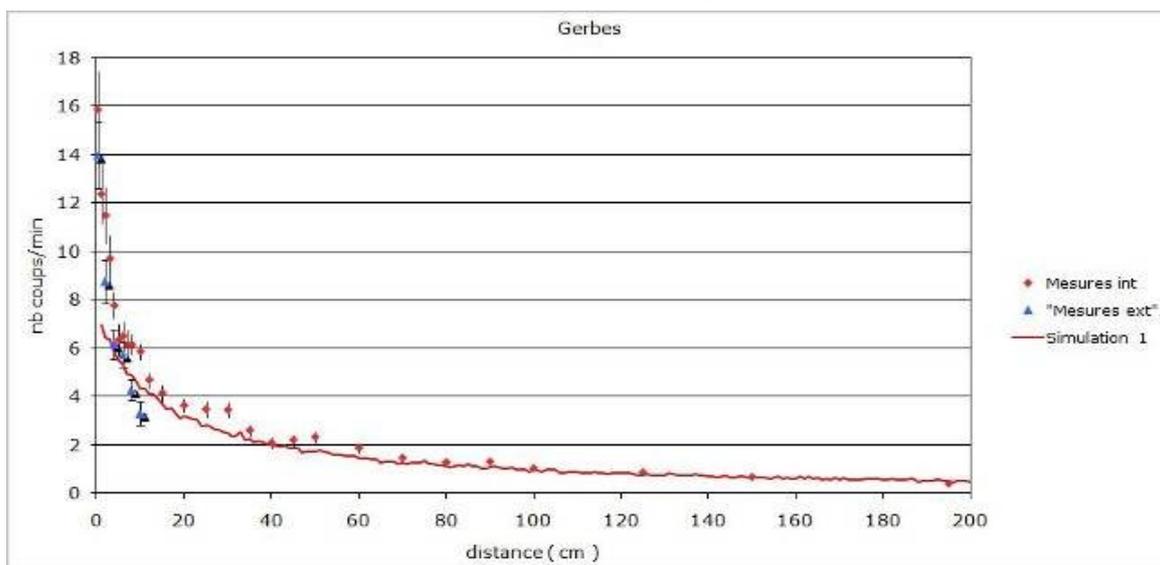
Les muons ne seront détectés que s'ils tombent sur les scintillateurs, sur les parties du cercle surligné en rouge. On peut donc évaluer les probabilités que les muons soient détectés :

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, nous avons réalisé un calcul plus poussé (*Principe : voir annexe 3*).

Convaincu alors de l'impact de la distance entre les scintillateurs sur les mesures réelles de muons, nous avons participé, avec Eric Lesquoy et Gérard Tristam, à la réalisation d'un programme permettant d'évaluer précisément la correction à apporter aux mesures. (*Principe : voir annexe 2*).

Avec cette correction, voici la courbe (en rouge) que nous obtenons alors :



Il apparaît clairement que la correction fait évoluer la courbe dans le bon sens.

Notons alors que la courbe rouge tend vers une asymptote horizontale, contrairement à l'exponentielle que nous proposons dans un premier temps. Le fait d'obtenir cette asymptote témoigne du fait qu'à grande distance, nous détectons assurément les gerbes atmosphériques, dont le point de départ est alors situé très haut dans l'atmosphère, sans quoi on observerait une décroissance du signal. Il reste toutefois à expliquer le fait que la courbe remonte pour de faibles écartements. Cela pourrait être le fait de muons proches de l'horizontale, qui pourraient alors donner des coïncidences, avec une probabilité d'autant plus grande que les scintillateurs sont proches l'un de l'autre.

Il nous reste également finir les mesures en extérieur, et à leur appliquer la même correction, ce que nous ferons avant la finale. Quelles surprises ces mesures nous réserveront-elles ?

La poursuite des mesures et l'interprétation que nous en donnerons s'avèrent des plus passionnantes!

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, assisté 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.

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 réfléchissons 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.

Enfin, par mesure de sécurité, le cosmodétecteur ne permet pas de faire varier certains paramètres, tel que la tension d'alimentation des photomultiplicateurs, et ne permet pas la visualisation des signaux issus des photomultiplicateurs. Nous voudrions que notre détecteur nous permette ces observations, pour montrer par exemple les différences entre les signaux résultant du bruit de fond, de ceux résultant du passage d'un muon dans les scintillateurs.

Dans un deuxième temps, suite aux manipulations réalisées sur le cosmodétecteur de prêt, 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. Il est vrai que ce n'est pas le cas avec le détecteur actuel, qui est lourd et encombrant. Ce sera ainsi une de nos priorités.

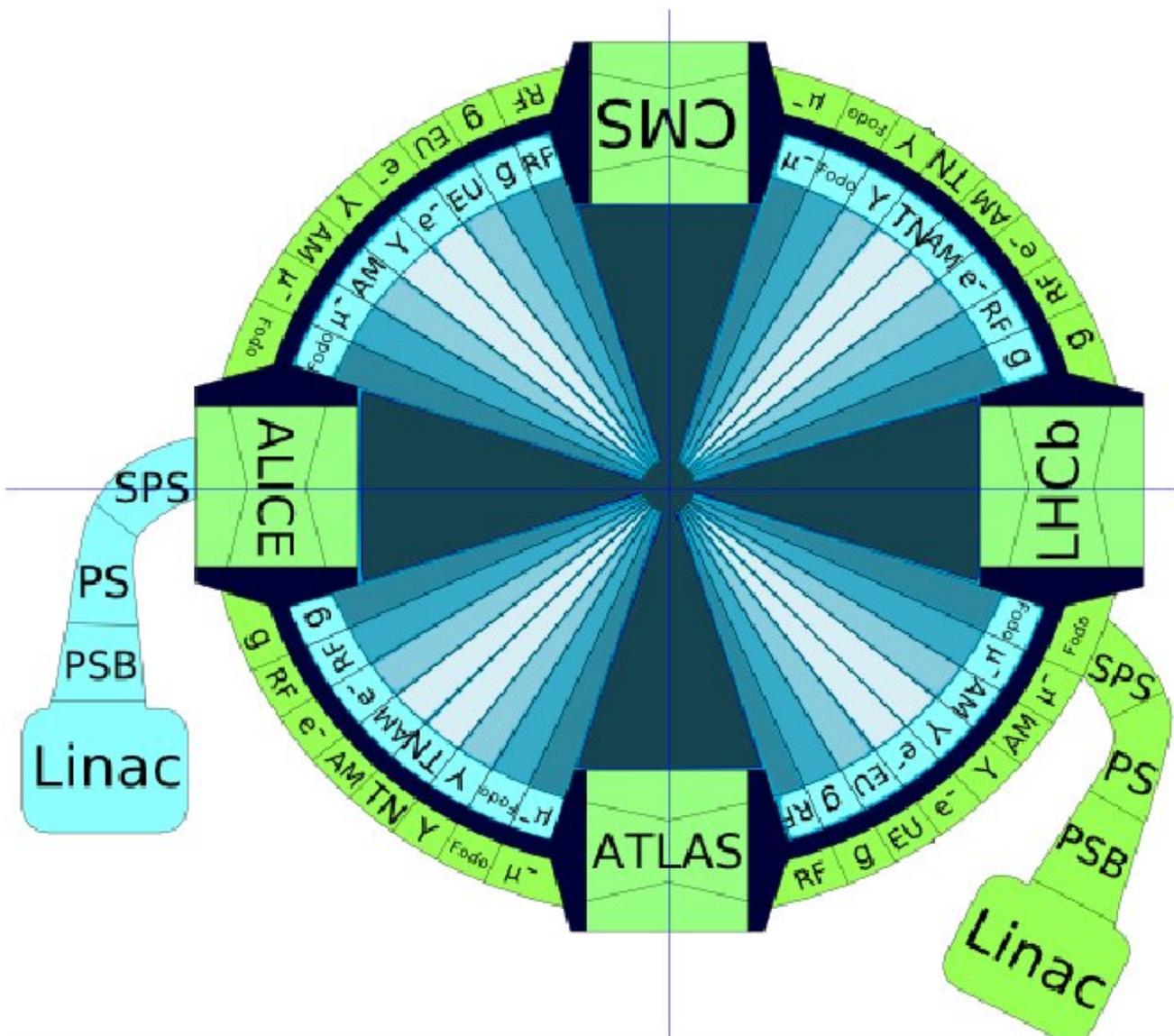
Ce détecteur est actuellement en cours d'élaboration.

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, 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.

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.

Le jeu comporte le plateau (ci-dessus), réalisé grâce à un logiciel de dessin vectoriel, ce qui permettra de l'imprimer dans une taille quelconque sans altérer la qualité de l'image (qui sera bien meilleure que la qualité de l'image ci-dessus) et des cartes.

Les protons, issus des molécules de dihydrogène, doivent être accélérés en plusieurs étapes avant d'accéder au LHC. Ceci est réalisé par un 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 présentée sur le plateau de jeu, et circulent alors en sens contraire, dans deux chambres à vide distinctes.

Ces deux chambres à vide sont nécessaires car pour faire circuler des protons en sens inverse, il faut courber leur trajectoire en utilisant deux champs magnétiques opposés. Ainsi, même si d'un point de vue technologique cela s'avère plus compliqué et aussi plus coûteux, il a fallu créer ces deux chambres à vide, associées chacune à un champ magnétique distinct.

Un synchrotron est un enchaînement d'aimants, capables de faire tourner les particules (aimant bipolaire) et de les focaliser (aimant quadripolaire), que l'on peut rassembler en groupes constitués d'une alternance d'aimants bipolaires et d'aimants quadripolaires. Ce groupe, appelé cellule « FODO », constitue alors l'élément de base des synchrotrons. Nous avons représenté cette cellule dans quelques cases du jeu.

D'autre part, le LHC doit fournir de l'énergie aux particules. Ceci est parmi grâce à des cavités résonantes que nous avons également disposées sur le parcours des protons.

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.

Ce jeu se joue différemment, en fonction du nombre de joueurs. Par exemple, en mode 4 joueurs, on pourra constituer 2 équipes de deux. Dans chaque équipe, les joueurs auront chacun 1 pion simulant un proton qui circulera dans le LHC. Ainsi, un proton parcourra l'anneau dans un sens, tandis que l'autre proton le parcourra dans l'autre sens. Le but est que ces deux protons se rencontrent dans un des 4 détecteurs du LHC.

Pour confectionner le jeu, il a fallu que chacun d'entre nous comprenne le fonctionnement du LHC et ait suffisamment de connaissances sur le sujet de la physique des particules. En effet, pour que les pions puissent avancer lors d'une partie, le joueur devra, en fonction des cases rencontrées, répondre à des questions dont des exemples figurent ci-dessous. Pour rendre le jeu attrayant et ludique, chaque carte comporte un petit article et une photo sur le sujet de la physique des particules. (*voir annexe 4*)

Ce jeu est un réel réinvestissement des connaissances que nous avons acquises sur le sujet de l'univers des particules. Nous faisons depuis tout notre possible pour qu'il réponde maintenant à certains critères tels que design, durée d'une partie, engouement du joueur et ici, inévitablement son côté ludique. Nous espérons pouvoir le commercialiser un jour dans la boutique du CERN.

VI – Site internet et Exposition

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.

A ce jour, tous les articles ont été rédigés. La structure du site est terminée. Seule une mise en forme des articles et des schémas et photos doit être améliorée. (*voir plan du site dans l'annexe 5*). Le site est actuellement en cours de finition (*voir deux des nombreux articles dans l'annexe 6*).

L'exposition

Lors de nos échanges avec le CERN, le CERN nous a fait cadeau d'une magnifique exposition sur la physique des particules. Cette exposition comporte 17 panneaux. Nous les avons collés sur des cadres en bois et nous les avons fait plastifier de façon à les protéger.

Le lycée étant en forme de cercle, avec un seul couloir desservant toutes les salles de cours, nous avons choisi d'installer cette exposition dans ce lieu de passage qui représente en quelque sorte, une chambre à vide d'un synchrotron dans laquelle tous les élèves seraient des protons y circulant, plus ou moins bien focalisés.

Lors de la journée portes ouvertes du lycée, nous avons joué ce rôle de proton et nous avons expliqué aux visiteurs, au cours de leur trajectoire, les panneaux exposés.

Nous mettons de plus cette exposition à disposition d'autres établissements scolaires, sous simple demande, avec ou sans les commentaires des élèves investis dans ce projet.

Un travail sérieux a donc nécessaire de notre part pour préparer le discours qui accompagne l'exposition.

VII – Les perspectives

Ce projet que nous menons avec des membres appartenant aux trois niveaux, seconde, première et terminale du lycée va se poursuivre l'année prochaine. Ce sont nous, élèves de terminale, qui en avons la responsabilité cette année, et qui passerons la main aux élèves de première l'année prochaine. Mais il est déjà à envisager que de nouveaux élèves s'intègrent au groupe car le sujet suscite beaucoup d'intérêt auprès de la communauté du lycée.

Il s'agira alors de poursuivre l'utilisation du détecteur afin de mener de réelles études statistiques. Nous avons également l'intention de partir avec ce compagnon en expédition au pic du midi de Bigorre, sur les pas de Louis Leprince Ringuet, afin de détecter les particules en altitude.

Le site internet sera alors complété par les résultats de nos expériences.

Le site présentera également une description détaillée du détecteur que nous réalisons.

Nous poursuivons nos rencontres et entretiens avec le CERN, notamment pour finaliser le jeu en vue d'une commercialisation.

Nous savons qu'il sera également possible, avec le matériel dont nous avons fait l'acquisition, de mesurer la durée de vie des muons par effet Cerenkov. Nous comptons l'année prochaine nous pencher sur la question.

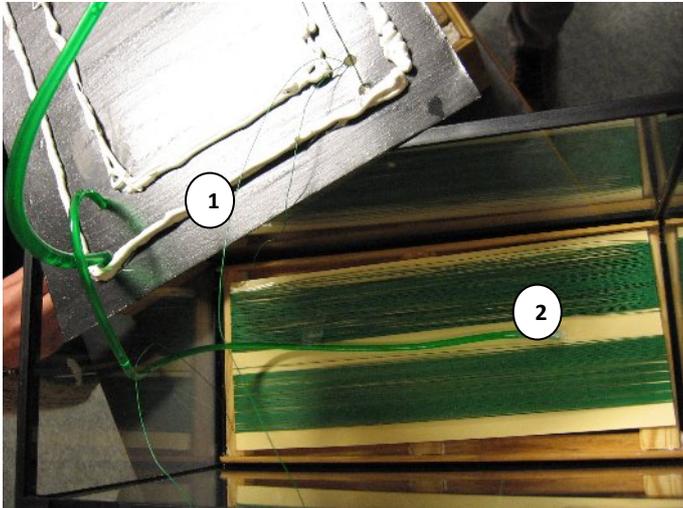
Bref, le sujet est tellement passionnant, que nous avons la volonté de continuer d'explorer et de poursuivre à notre vitesse, les particules élémentaires et la façon qu'elles ont d'interagir entre elles !

Nous rappelons ici nos partenaires que nous remercions vivement :

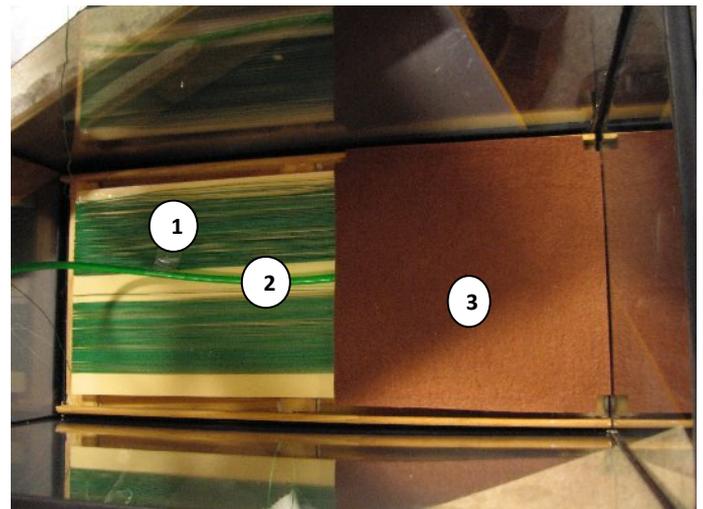
- Jose Busto – in2p3– CPPM Marseille
- Eric Lesquoy – CEA
- Mick Storr – CERN
- Catherine Thibault – in2p3
- Gérard Tristam – in2p3

VIII – Annexes

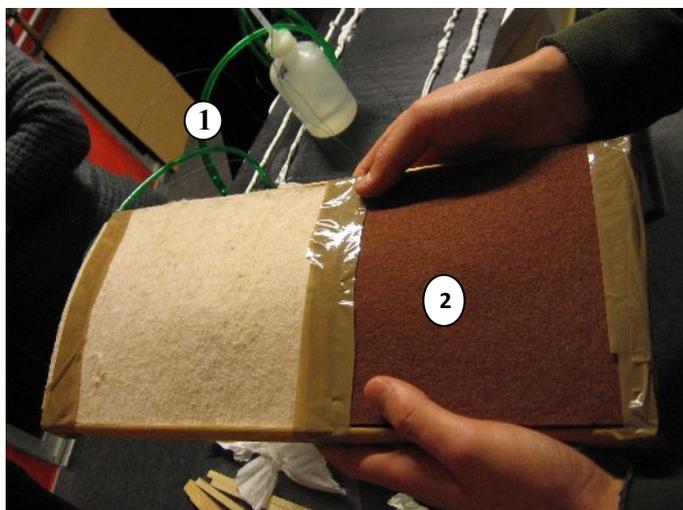
Annexe 1 – Amélioration de notre chambre à brouillard



Haut de la chambre :
1 – Socle
2 – Haut de la chambre



Haut de la chambre :
1 – Résistance
2 – Tuyau percé
3 – Feutrine



Haut de la chambre :
1 – Tuyau percé
2 – Feutrine

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

Le problème est en gros le même que si des baguettes horizontales tombaient sur les plaques, et que, pour un écart de plaques données, le détecteur comptait 1 si les deux extrémités du bâton étaient 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 :

- $0 < x_1 < L$
- $s+l < y_1 < s+2l$

Annexe 3 – 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

l : largeur du scintillateur

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

On suppose que les muons issus d'une gerbe font un V.

? Comment varie la probabilité que ces muons soient détectés en coïncidence en fonction du rayon du cercle sur lequel on suppose que 2 muons traverseront, de manière diamétralement opposée ?

1) Si $d > 22,5 \text{ cm}$

ABC triangle rectangle

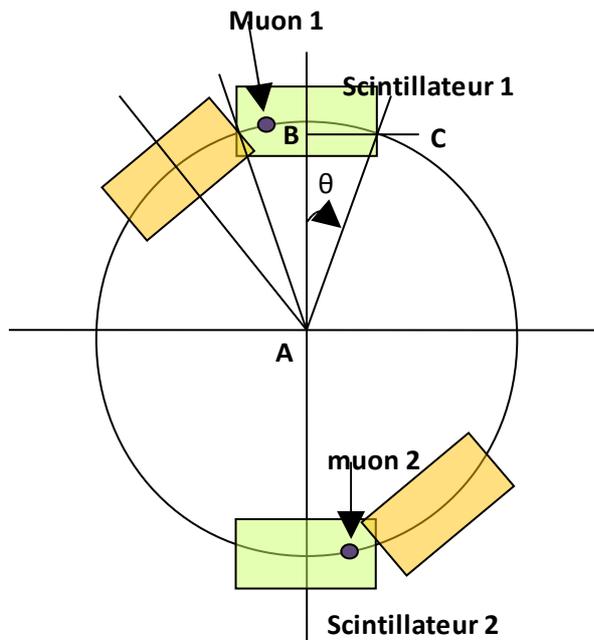
$$AC = \frac{d+l}{2}$$

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

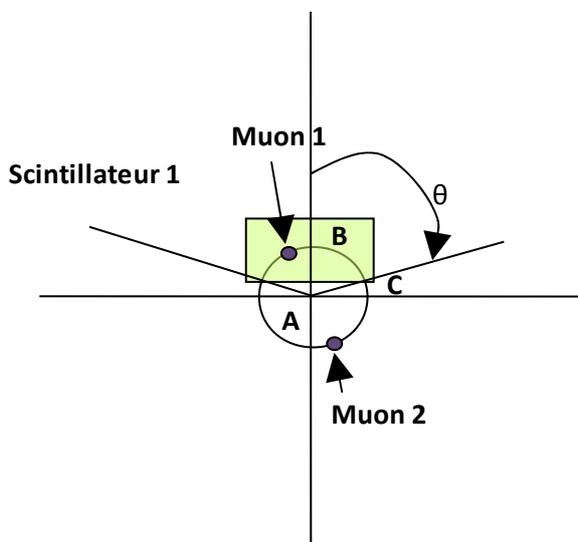
$$\theta = \text{Arcsin}\left(\frac{L}{d+l}\right)$$

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

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



2) Si $d < 22,5 \text{ cm}$



$$AB = \frac{d}{2}$$

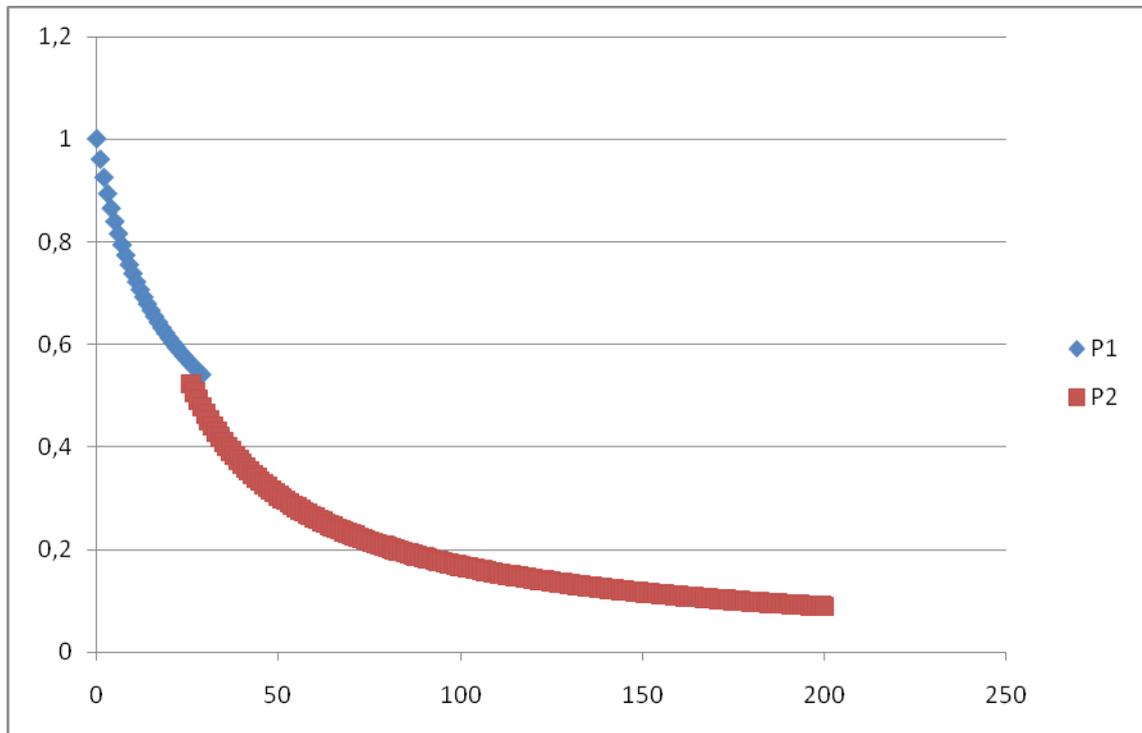
$$AC = \frac{d+l}{2}$$

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

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.



Annexe 4 – Cartes de notre jeu de société

Lequel de ces prénoms correspond à une expérience du LHC ?

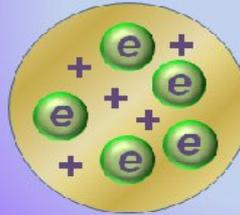
- a) Alice
- b) Julien
- c) Sandra
- d) Nicolas



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.

Combien il y a de quarks up dans un électron ?

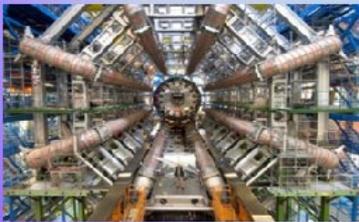
- a) 0
- b) 1
- c) 2
- d) 3



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.

Que signifie le « T » du détecteur « ATLAS » ?

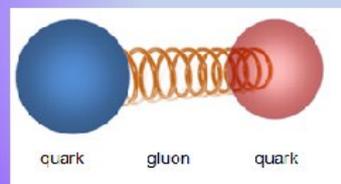
- a) Toroidal
- b) Top
- c) TeV
- d) Torre



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.

Le gluon est une particule...

- a) De matière ?
- b) Transmetteur de l'interaction forte ?
- c) Transmetteur de l'interaction faible ?
- d) Fictive ?



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 créé par un autre quark, et plus la force d'interaction qui les lie est intense.

Annexe 5 - Plan du site internet

Introduction : Quelques ordres de grandeur : longueur et énergie

I. Quelles sont les particules élémentaires

1. Des molécules jusqu'aux protons , neutrons et électrons
2. Des nucléons jusqu'aux quarks
 - a. Les rayons cosmiques
 - b. Les gerbes de particules
 - c. L'étrangeté des particules
 - d. Les quarks
 - e. Les perspectives

II. Les rayons cosmiques

1. Origine
2. L'astronomie par l'observation des particules
 - a. L'observatoire de Pierre Auger
 - b. Le télescope Antares
3. Chambre à brouillard

III. The Light Hadrons Collider – Le LHC

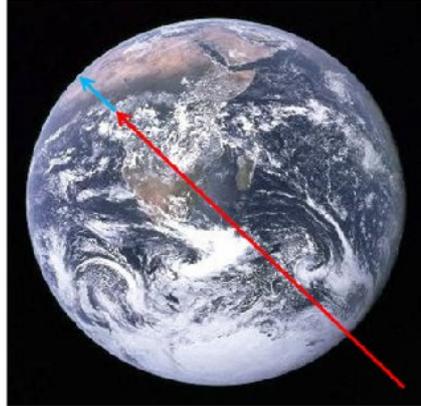
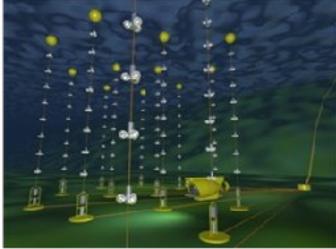
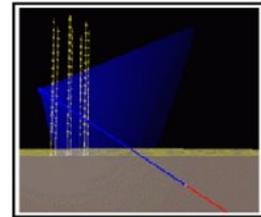
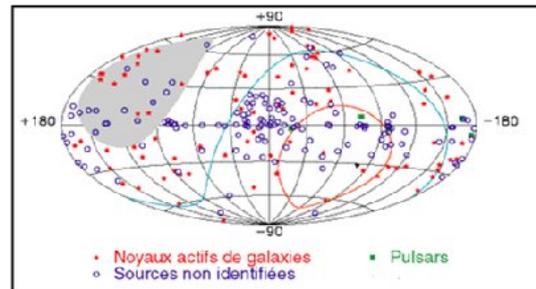
1. Pourquoi chercher à disposer d'une énergie toujours plus grande ?
2. Guider les protons vers le LHC : un synchrotron
 - a. Le LHC : un synchrotron
 - b. Injection des protons dans le LHC
 - c. Comment faire tourner les particules ?
3. Structure détaillée du LHC
 - a. Quelques contraintes dont il faut tenir compte
 - b. Focalisation du faisceau de protons
 - c. Particules n'ayant pas la bonne énergie. Quelles conséquences ?
 - d. Comment gérer les imperfections des aimants ?
 - e. Accélération des protons
 - f. Les détecteurs

IV. Le modèle standard

1. Les particules élémentaires de matière
2. Les particules élémentaires qui véhiculent l'interaction
 - a. Les interactions fondamentales, telles qu'on les connaissait dans les années 60
 - b. L'interaction électromagnétique telle qu'on la décrit dans le modèle standard
 - c. Généralisation à l'ensemble des interactions fondamentales
 - d. La portée de l'interaction
 - e. Diagramme de Feynman - exemples d'interactions entre quelques particules élémentaires
3. Bilan : les particules élémentaires au complet – le boson de Higgs.
4. L'interaction électrofaible

V. Les objectifs du LHC

1. Quelles sont les grandes questions auxquelles tente de répondre le LHC ?
2. Comment va-t-on isoler les bons événements ?
 - a. Le quark Top
 - b. Le boson de Higgs
 - c. La supersymétrie
 - d. Le plasma de quarks et de gluons
 - e. La matière et l'antimatière

Annexe 6 – Quelques articles du site**Article 1****b – Le télescope Antares***Expérience Antares - Toulon**Effet Cerenkov**Ciel observable par Antares*

Antares est situé dans la méditerranée, au large de Toulon, et a pour but la détection des neutrinos cosmiques, issus de réactions nucléaires produites dans des astres de l'univers. Mais les neutrinos n'étant sensibles qu'à l'interaction faible, les observer directement est une tâche trop délicate. Les neutrinos peuvent traverser la Terre entière sans subir d'interaction. Mais, et même si cela reste rare, certains neutrinos vont tout de même entrer en collision avec un noyau d'un atome de la Terre. Lors de cette interaction, il se crée un muon, qui se déplace dans la même direction que le neutrino, capable de parcourir une dizaine de kilomètres dans la croûte terrestre. Si la collision se passe proche de la surface de la Terre, alors le muon pourra entrer dans la mer méditerranée. La vitesse du muon étant alors plus grande que la célérité de la lumière dans l'eau, on observe une lumière de faible intensité dans son sillage. C'est ce que l'on appelle l'effet Cerenkov. C'est cette lumière que l'on va chercher à détecter, au moyen d'un ensemble de photomultiplicateurs placés sous la mer, à 2400 m de profondeur.

Les neutrinos mis en évidence par Antares provenant de l'hémisphère sud, Antares scrutera l'univers situé du côté de l'hémisphère sud.

Pour observer l'univers situé du côté de l'hémisphère nord, on met en place une expérience nommée « Icecube », située au pôle sud, reposant sur le même principe qu'Antares. Icecube devrait être opérationnelle en 2011.

Article 2

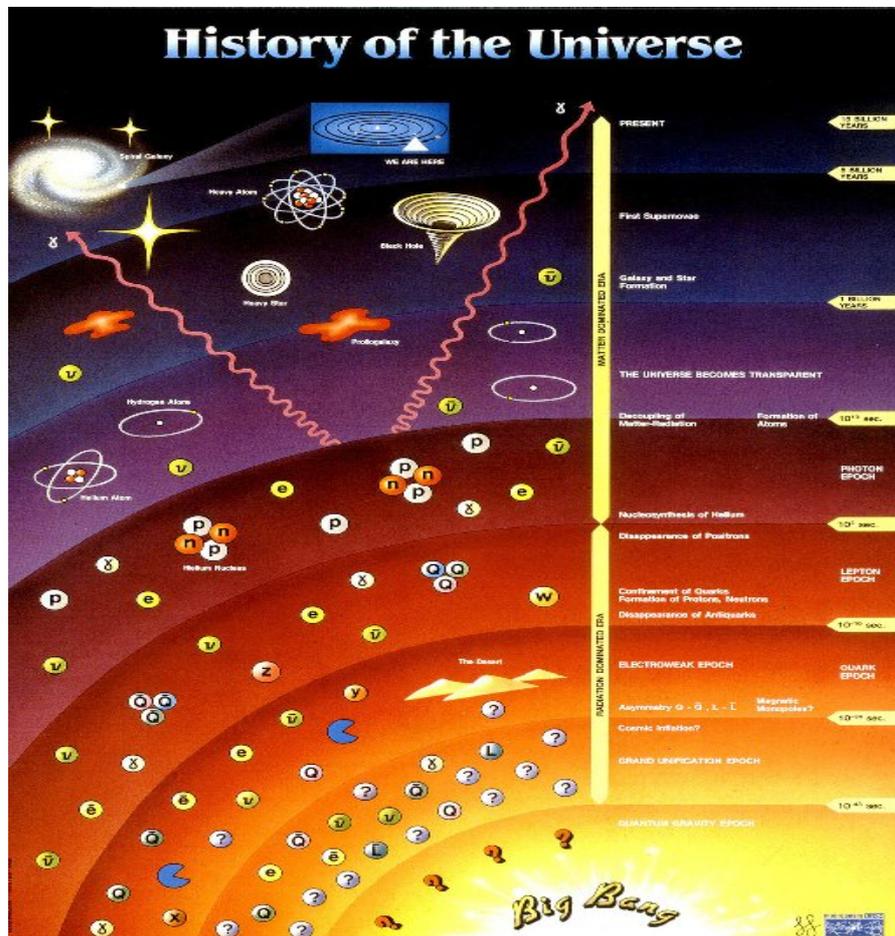
1) Pourquoi chercher à disposer d'une énergie toujours plus grande ?

Un des buts de la physique des particules est de connaître la composition de l'univers dans les premiers instants du bigbang.

Après le bigbang, l'univers n'a cessé de s'étendre. Toute l'énergie, s'est alors réparti dans un volume qui n'a cessé de s'accroître. La densité énergétique a donc quant à elle diminué.

Or, de manière générale, un système physique est stable par rapport aux contraintes auxquelles il est soumis. Etant donné que ces contraintes ont changé au cours de l'extension de l'Univers, les objets stables qui demeuraient dans l'univers dans ses premiers instants ne sont donc pas les mêmes que ceux d'aujourd'hui.

Si aujourd'hui des corps complexes peuvent exister, comme par exemple des protéines, il n'en était rien avant : la densité énergétique était tellement élevée, que l'on ne devait trouver que des objets élémentaires.



La seule façon d'observer ces particules élémentaires aujourd'hui, c'est de créer un environnement identique à celui qui régnait dans les premiers instants après le bigbang, en termes énergétiques. Et plus on sera capable de disposer d'une densité énergétique élevée dans un accélérateur, plus on aura de possibilités d'observer des particules qui existaient de plus en plus tôt dans l'univers.