

BRIET Terek

BURG Dorian

JOUD Lancelot

MASSON Paul

Encadrés par QUIROS Carinne et ROUCANIERES Christelle

Lycée Gaston Monnerville de Cahors

Y'A-T-IL UN MUON DANS L'AVION ?



lycée polyvalent
lycée des métiers
G. Monnerville
Lot
académie
Toulouse



Résumé du projet :

Le projet réalisé en grande partie en 1S, s'est construit en AP autour de la découverte de la physique des particules. Nous avons **observé** des muons lors de la réalisation de chambres à brouillard.

Pour expérimenter davantage sur les particules relativistes créées suite aux collisions entre les particules cosmiques et notre atmosphère, nous avons voulu établir un modèle qui décrit l'évolution du flux de muons avec l'altitude. Nous avons établi puis **réalisé** un protocole permettant de comparer des flux mesurés en avion, à différentes altitudes, pendant 15 minutes. Par la suite, nous avons pu déterminer un modèle expérimental. Afin de le **vérifier** nous avons voulu le confronter à un modèle théorique ou une simulation.

SOMMAIRE

INTRODUCTION..... page 4

I/ OBSERVER POUR DECOUVRIR page 5

- 1) Construction d'une chambre à brouillard
- 2) Observations
- 3) Découverte du muon

II/ COMPTER POUR MIEUX COMPRENDRE page 9

- 1) Comment mesurer le flux de muons ?
- 2) Comment réaliser des mesures en altitude?
- 3) Description du protocole
- 4) Problèmes rencontrés
- 5) Exploitation des mesures
- 6) Modèle expérimental

III/ SIMULER POUR VERIFIER page 17

CONCLUSION..... page 19

ANNEXE..... page 20

BIBLIOGRAPHIE..... page 21

INTRODUCTION

Depuis deux ans nous suivons un projet scolaire autour de la physique des particules. En Sciences Physiques, la part du programme consacrée aux expériences actuelles de physique est très limitée. Nous avons donc découvert cette partie de la physique moderne grâce à des expériences et des visites de laboratoires dans le cadre de l'accompagnement personnalisé de Première S.

Pour cela nous avons tout d'abord réalisé des chambres à brouillard qui nous ont permis d'observer des particules issues du rayonnement cosmique telles que les muons. Après quelques recherches sur les rayonnements cosmiques, nous nous sommes aperçus qu'ils étaient formés en haute altitude suite aux collisions entre l'atmosphère et les particules du rayonnement primaire. Une corrélation entre l'altitude et le « rayonnement cosmique » est donc envisageable, mais nous n'avons trouvé aucune « loi » physique décrivant ce phénomène. Grâce au cosmodétecteur de Sciences à l'école à notre disposition, nous pouvions mener différentes expériences de comptage des muons. Nous avons donc décidé de répondre à la problématique suivante :

« Peut-on modéliser l'évolution du flux de muons avec l'altitude ? »

Nos résultats expérimentaux, nous ont permis aussi « d'observer » le phénomène de relativité que nous découvrons en terminale.

Le projet global s'est conclu par une visite au Centre Européen de Recherche Nucléaire (CERN) de Genève, et par notre présentation au concours des Olympiades. Lors de la phase académique du concours, nous avons rencontré Mr Hubert, chercheur à l'ONERA, qui a pu enrichir nos connaissances.



*Le cosmodétecteur prêté par
Sciences à l'Ecole*

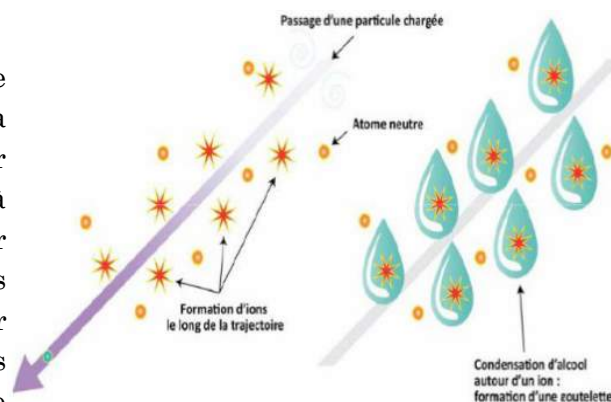
I/ OBSERVER POUR DECOUVRIR

Nous avons, dans le cadre de l'Accompagnement Personnalisé de 1^{ère} S, étudié l'histoire de la découverte du rayonnement cosmique, ainsi que la chambre à brouillard, son principe et ses utilisations. Celle-ci permet donc de visualiser les particules issues des rayonnements cosmiques et leurs trajectoires. Après avoir fait quelques recherches et choisi différents composants, nous en avons fabriqué plusieurs avec nos moyens mais tout en conservant le même principe de fonctionnement.

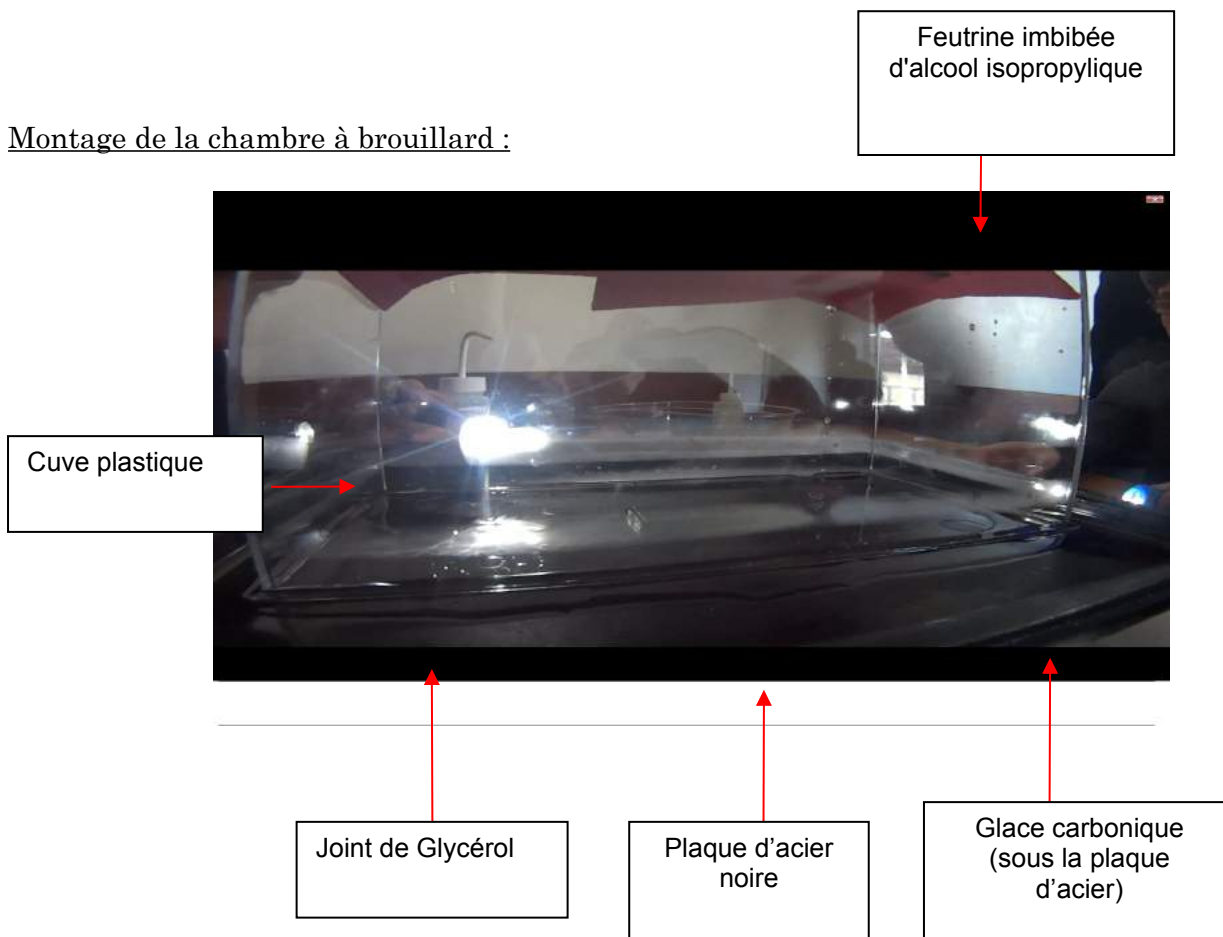
1) Construction d'une chambre à brouillard

Principe :

Une chambre à brouillard est constituée d'une enceinte fermée hermétiquement dans laquelle se trouve de la vapeur d'alcool sursaturée. Celle-ci est générée par l'évaporation de cet alcool dans un milieu refroidi à -30°C par de la neige carbonique sous une plaque d'acier pour notre expérience. Les particules issues des gerbes cosmiques (chargées) vont déposer progressivement leur énergie le long de leur parcours en ionisant les atomes constituant la vapeur d'alcool. Il en résulte alors une accumulation locale d'énergie, des milliers de gouttelettes d'alcool se condensent au passage d'une particule, formant ainsi les traînées observables.



Montage de la chambre à brouillard :



2) Observations

En éclairant le brouillard en lumière rasante, nous avons pu observer différentes «traces», correspondants à différentes particules : des particules alpha, des électrons, des positrons ou encore des muons. On peut les identifier grâce à l'aspect de la trace qu'ils laissent, spécifiques à chaque particule selon leur épaisseur, leur longueur ou encore leur trajectoire :

Particules α (noyaux d'hélium) :



MUONS :



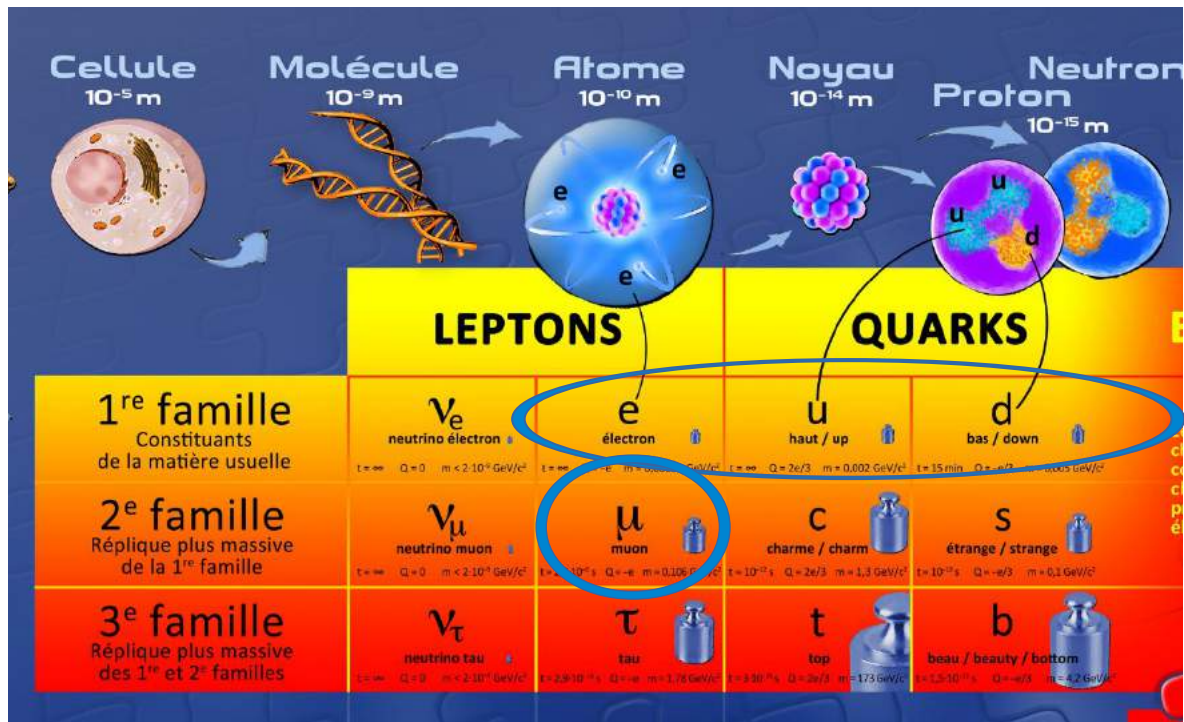
Electrons ou positrons :



3) Découverte du muon

Nous savons que la matière qui nous entoure est composée d'atomes, tous constitués de 3 particules élémentaires :

- les quarks up et down, qui constituent les protons et les neutrons
- les électrons, autour du noyau



Dans ce tableau des constituants élémentaires de la matière, nous trouvons le muon et ses caractéristiques.

Carte d'identité des Muons :

Charge : $q = -1,60 \times 10^{-19} \text{ C}$ (comme l'électron)

Masse : $m = 1,88 \times 10^{-28} \text{ kg}$ (207 fois plus lourd qu'un électron)

Temps de vie faible (environ deux microsecondes)

Particule relativiste (vitesse proche de la vitesse de la lumière : $v = 0,997c$)

➤ D'où viennent ces muons ?

Il existe plusieurs expériences actuelles concernant la physique des particules. Un des buts principaux de ces expériences est de détecter ces particules, par exemple à la surface de la Terre avec l'observatoire Pierre Auger, qui détecte les particules secondaires, ou bien hors de l'atmosphère terrestre, le module attaché à la station ISS, AMS 02, qui lui détecte les particules primaires.

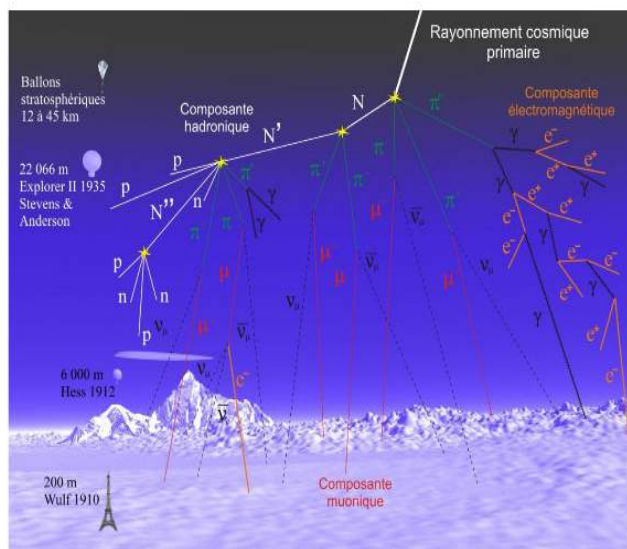
➤ Mais que ce passe-t-il entre les deux ?

Les rayons cosmiques se composent de particules énergétiques en provenance de l'espace. Ces particules sont pour 87% des protons, pour 12% des noyaux d'hélium et pour 1% des électrons. Lorsque ces rayons cosmiques rencontrent l'atmosphère terrestre ils interagissent avec les noyaux des atomes des molécules présentes dans l'air et les électrons pour produire des particules dites secondaires. Elles forment alors une gerbe de particules : la gerbe cosmique. Le nombre importants de collisions au sein de chaque gerbe constituait autrefois une source d'information importante sur les particules élémentaires avant que les accélérateurs tels que le CERN ne voient le jour.

Certaines particules de cette gerbe sont chargées et donc dirigées vers les pôles grâce au champ magnétique terrestre. Ce sont ces particules qui entrent en collision avec des molécules présentes dans l'air et forment les aurores boréales par exemple.

Au niveau du sol, la plupart des particules composant la gerbe ont disparues du fait de leur temps de vie limité. Ainsi, on observe que 75% de la gerbe se compose de muons et de neutrinos. Les muons ont une énergie équivalente à quelque GeV (Giga Electron Volt) au niveau du sol et on en observe une centaine par seconde par mètre carré au niveau de la mer.

La découverte de ce rayonnement cosmique est due à Théodore Wulf qui s'était aperçu qu'un rayonnement inconnu provenant de l'espace déchargeait un électroscope plus rapidement en altitude.



Formation de gerbe de particules par interaction des rayons cosmiques avec l'atmosphère.
Crédit : C. Lagoue

➤ Muons... relativistes ?

En ayant dit que le temps de vie d'un muon est $2 \mu s$, une question se pose assez vite : quelle distance peuvent-ils parcourir ?

D'après le calcul ci contre ils peuvent parcourir 600 m durant leur temps de vie... or leur formation a lieu à plusieurs dizaines de kilomètre du sol. Et pourtant on en a observé en classe !!

L'observation de muons au niveau du sol s'explique donc par le fait qu'ils sont relativistes, et donc que le temps ne s'écoulent pas de la même façon dans leur référentiel, en mouvement, et dans notre référentiel d'observateur au sol.

$$v = \frac{d}{\Delta t}$$

Soit $d = v \times \Delta t$

$$d = 0,997 \times 3.10^8 \times 2.10^{-6}$$

$$d = 6.10^2 m$$

II/ COMPTER POUR MIEUX COMPRENDRE

Après la phase d'observation, nous avons voulu en savoir plus sur les particules cosmiques, et en particulier les muons. Nous savions grâce à la découverte des gerbes cosmiques que les muons étaient créés dans la haute atmosphère.

Certains d'entre nous, passionnés d'aéronautique ont discuté avec un pilote d'avion et ont découvert que les pilotes de ligne avaient un temps de vol limité contrairement aux pilotes privés volant à basse altitude... alors que des muons sont détectés au niveau du sol ! Une corrélation entre l'altitude et le « rayonnement cosmique » est donc envisageable, mais nous n'avons trouvé aucune « loi » physique décrivant ce phénomène.

Grâce au cosmodétecteur de Sciences à l'école à notre disposition, nous pouvions mener différentes expériences de comptage des muons. Nous avons donc décidé de répondre à la problématique suivante :

« Peut-on modéliser l'évolution du flux de muons avec l'altitude ? »

1) Comment mesurer le flux de muons ?



Cosmodétecteur en fonctionnement relié à l'ordinateur. Crédit : Sciences à l'École.

Le cosmodétecteur, prêté par Science à l'école, est un détecteur de muons, composé de 3 éléments principaux :

- le **scintillateur** qui détecte le passage des muons. Il est constitué d'un matériau plastique transparent qui permet d'utiliser le principe de la fluorescence : un muon qui traverse le scintillateur excite les molécules du matériau en émettant un photon dès qu'ils se désexcitent.

- **le photomultiplicateur (PM)** qui amplifie le signal du scintillateur. En effet, le signal issu du scintillateur est trop faible pour être détectable. Le système est composé d'un tube vidé d'air où sont enfermées une douzaine d'électrodes équidistantes avec des tensions croissantes (+100V environ). Le tube à vide doit donc être sous haute tension

- **la partie électronique**, gérée par le logiciel du cosmodétecteur. Elle permet d'acquérir les informations, convertit le signal analogique en numérique et supprime les signaux indésirables. Elle est composée d'un module de coïncidence qui ne sélectionne que les signaux qui arrivent en même temps sur deux raquettes (seuls les muons peuvent traverser les scintillateurs).

Calibrage :

Nous avons en classe, calibré l'appareil afin de définir les tensions d'alimentation des photomultiplicateurs (environ 1100V) et les tensions seuils de détection (10 mV) à utiliser pour être le plus précis possible. Nous avons effectué des mesures de tests pour trouver les réglages qui ne prennent pas les bruits de fond en compte afin de ne compter que les muons et non toutes les autres particules, qui ne nous intéressent pas dans notre expérience.

Un autre problème était l'alimentation du système : nous avons dû assurer l'autonomie du cosmodétecteur et de l'ordinateur associé lors des vols. Pour cela, l'utilisation de batteries a été nécessaire et donc un choix a été fait en fonction de nos besoins et de leurs caractéristiques.

Positionnement des raquettes :

Durant nos expériences, les trois raquettes étaient positionnées l'une sur l'autre à l'horizontale (de haut en bas : PM3, PM1, PM2), donc nous permettaient de détecter les particules sur un angle de 180°, vers le ciel, donc tous les muons. Nous avons mesuré la surface de chevauchement des raquettes : $S = 448 \text{ cm}^2$



Dispositif lors des mesures au sol à l'aérodrome

2) Comment réaliser des mesures en altitude?

Nous avons envisagé plusieurs possibilités, comme nous déplacer vers des régions plus « escarpées » pour faire des mesures à des altitudes différentes, mais ceci posait les problèmes suivants :

- variation des conditions météorologiques
- mesures sur plusieurs jours
- changement de latitude
- budget !

L'aéroclub du Quercy de Cahors-Lalbenque propose aux jeunes du lycée Monnerville, des cours théoriques sur les bases de l'aviation jusqu'à l'obtention du Brevet d'Initiation à l'Aéronautique (BIA). Un partenariat s'est ainsi construit afin que l'on puisse emporter le cosmodétecteur à bord d'un avion et répondre à notre problématique.

Nous sommes allés à l'aéroclub, (qui est connu pour accueillir le plus important centre de parachutisme de France), où plusieurs élèves ont pu monter dans le quadriplace Robin DR-400 piloté par Henri De Pembroke, pour effectuer des mesures à différentes altitudes. Ce partenariat a été pour nous une expérience enrichissante, et a permis à certains d'entre nous de faire un baptême de l'air, offert par l'aéroclub.



3) Description du protocole

Le but de notre expérience est de démontrer l'influence de l'altitude sur le nombre de muons détectés. Pour cela nous avons élaboré une série de deux protocoles pour rendre notre étude complète :

- **Problème n°1 : Le fuselage de l'avion a-t-il une influence sur les mesures du cosmodétecteur ?**
- **Problème n°2 : Comment le flux de muons varie-t-il en fonction de l'altitude ?**

Problème n°1 : Le fuselage a-t-il une influence sur les mesures du cosmodétecteur ?

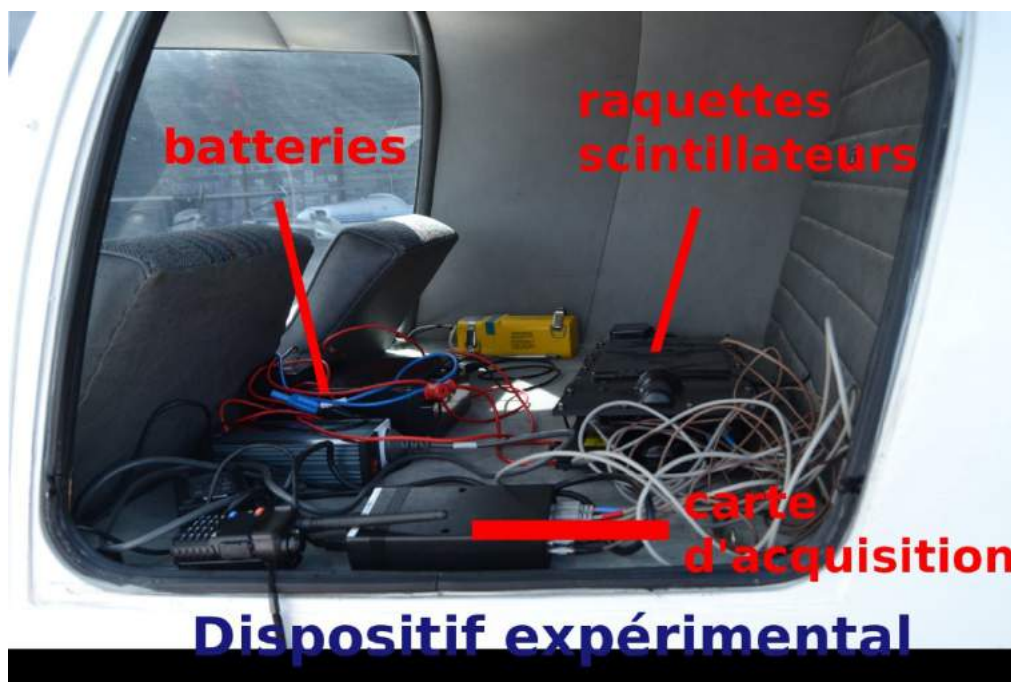


Photo du dispositif à l'arrière de l'avion

PROTOCOLE :

Pour évaluer l'influence du fuselage sur le nombre de muons détectés, nous avons réalisé un comptage de 20 minutes à l'extérieur de l'avion puis un autre à l'intérieur. Le cosmodétecteur était paramétré de manière à mesurer le flux de muons sur une durée de 10 secondes afin que les valeurs obtenues soient facilement exploitables.

Problème n°2 : Le flux de muons varie-t-il en fonction de l'altitude ?

PROTOCOLE :

Pour mesurer l'influence de l'altitude sur le flux de muons nous avons réalisé des vols à différentes altitudes. Nous avons d'abord prévu en classe d'effectuer des mesures entre 276 mètres -altitude de l'aérodrome- et 3300 mètres, par paliers de 500 mètres; ce qui représentait 6 différents paliers en vol. A chaque altitude les comptages toutes les 10 s devaient être faits pendant 20 min. Pour lancer le comptage, 3 élèves différents étaient présents dans l'avion à chaque vol : le premier remplissait le carnet d'expérience, le deuxième s'occupait des communications radio avec l'équipe au sol et vérifiait l'altimètre, et le troisième tenait l'ordinateur et lançait l'acquisition.

4) Problèmes rencontrés

La date du mercredi 30 mars 2016 a été choisie car la météo était idéale : ciel dégagé, très beau temps.

Durant notre expérimentation, nous avons rencontrés plusieurs difficultés.

Le pilote a choisi de faire d'abord les vols les plus hauts en début d'après-midi et avec les élèves les plus légers. Or, le vol a été très long pour atteindre l'altitude maximum. Et comme nous n'avions que ce mercredi après-midi pour réaliser nos mesures, nous avons décidé de limiter le temps de comptage à 15 minutes par palier au lieu des 20 minutes initialement prévues.

Le problème majeur a été l'usure plus importante que prévue des batteries, celle de l'ordinateur notamment et celle que nous avons calibrée en classe pour alimenter le cosmodétecteur (à cause du froid, de l'altitude ?). Nous avons dû charger la batterie de l'ordinateur entre chaque vol, ce qui a causé des pauses plus longues au sol.

Les communications radio entre l'avion et les élèves au sol ont perturbé le comptage. C'est pour cela que lors de l'exploitation de nos données nous avons dû éliminer des valeurs aberrantes.

Ensuite, les mesures prévues à 1800 et 2300m n'ont pas été réussies car les expérimentateurs n'utilisaient pas correctement le cosmodétecteur. Ces élèves prenaient l'avion pour la première fois et n'ont pas su lancer le logiciel de mesure à cause du stress.

Les paliers inférieurs à 2800m ont du être modifiés à 1000 et 2000m car une partie de l'après-midi s'était déjà écoulée. Les paliers prévus étaient 300/800/1300/1800/2300/2800/3300m. Finalement nous avons réalisés deux paliers en moins, soit : 300/1000/2000/2800/3300m

Enfin, une imprécision de nos altitudes peut être considérée. Nous avons un altimètre qui mesure la variation de pression, et par manque de précision nous avons préféré nous fier à l'altimètre de l'avion. Cependant, celui-ci présente aussi des incertitudes, non évaluables pour nous, (dues aux graduations de l'instrument, au calibrage de ce dernier...). On peut estimer qu'une fois l'altitude atteinte, l'avion oscillait entre plus ou moins 20 m autour de la valeur choisie.

5) Exploitation des mesures

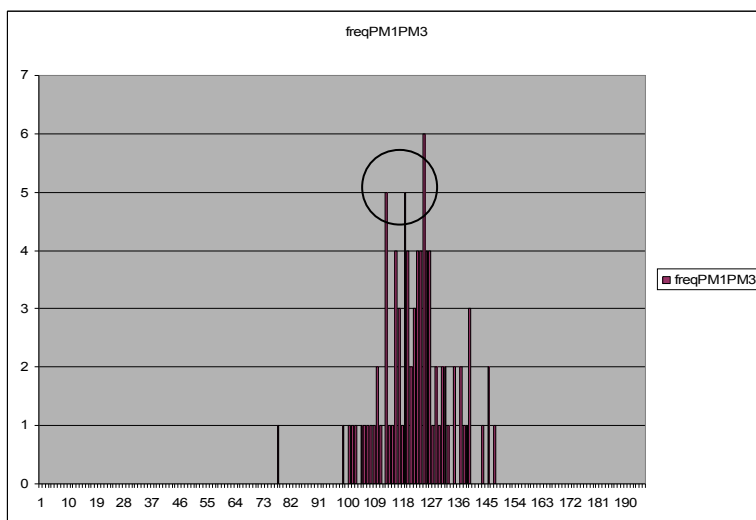
De retour en classe, nous avons traité les mesures effectuées durant les vols.

Nous avons mis en **Annexe** l'extrait d'un tableau de mesure ouvert directement après les enregistrements (les valeurs supprimées sont celles sur lesquelles il y avait des interférences avec la radio du pilote). Les comptages sont faits toutes les 10 secondes pendant 15 minutes, donc il y a 90 comptages.

A partir de ses tableaux, nous effectuons des comptages de récurrences :

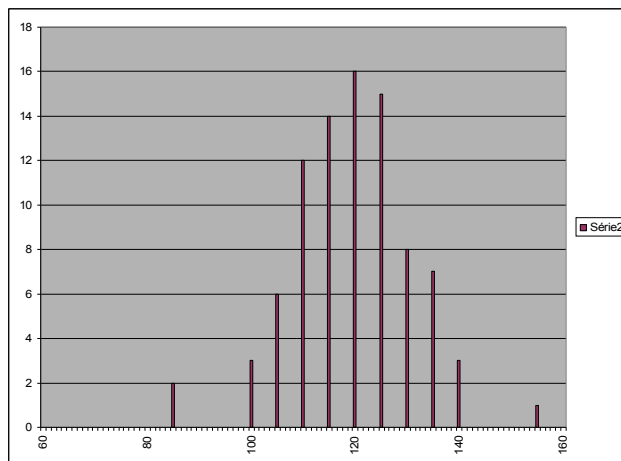
Combien de fois y a-t-il x muons comptés pendant 10 s ?

Ceci nous permet d'obtenir un histogramme, par exemple à l'altitude de **3300 m** :



Par manque de temps, nous nous sommes contentés de valider nos mesures après avoir remarqué que la moyenne sur 15 minutes de comptages (122 muons pour 10 s à 3300 m), correspondait plus ou moins à la valeur médiane de la répartition dans l'histogramme.

Nous observons aussi que les valeurs sont réparties symétriquement autour de cette médiane, ceci est d'autant plus vrai si on regroupe 5 par 5 le nombre de muons :



Ensuite, grâce à l'écart type à la moyenne, nous avons déterminé l'incertitude de répétabilité sur la mesure, en prenant un facteur d'élargissement $k=2$ pour un intervalle de confiance à 95,4% grâce à la formule suivante :

$$U = \frac{k \times \sigma_{n-1}}{\sqrt{n}}$$

Remarque :

Les valeurs (moyenne et écart type) ont été ramenées à un flux par seconde, par m^2 . La surface des scintillateurs étant $S = 448 \text{ cm}^2$

Problème n°1 : Le fuselage a-t-il une influence sur les mesures du cosmodétecteur ?

Les données que l'appareil nous a fournies montrent que le fuselage n'a pas d'importance significative sur le flux de muons détectés sur 10 secondes. Grâce au tableau ci-dessous on remarque également que l'écart type à la moyenne est dans le même ordre de grandeur pour les deux comptages.

On en déduit donc que le flux de muons détecté dans l'avion sera relativement proche de celui mesuré en extérieur.

Nom fichier	heure	Comptage total sur 20 min	Moyenne sur 10 s	σ (Ecart type Moyenne) pour 10 s	Nombre muon/s/m ²
Sol	13h21	5600	46.7	5.42 (soit 12 pour une moyenne en /s/m ²)	104 ± 3
Sol avion	14h04	3927	45.4	5.9 (soit 13 pour une moyenne en /s/m ²)	101 ± 3

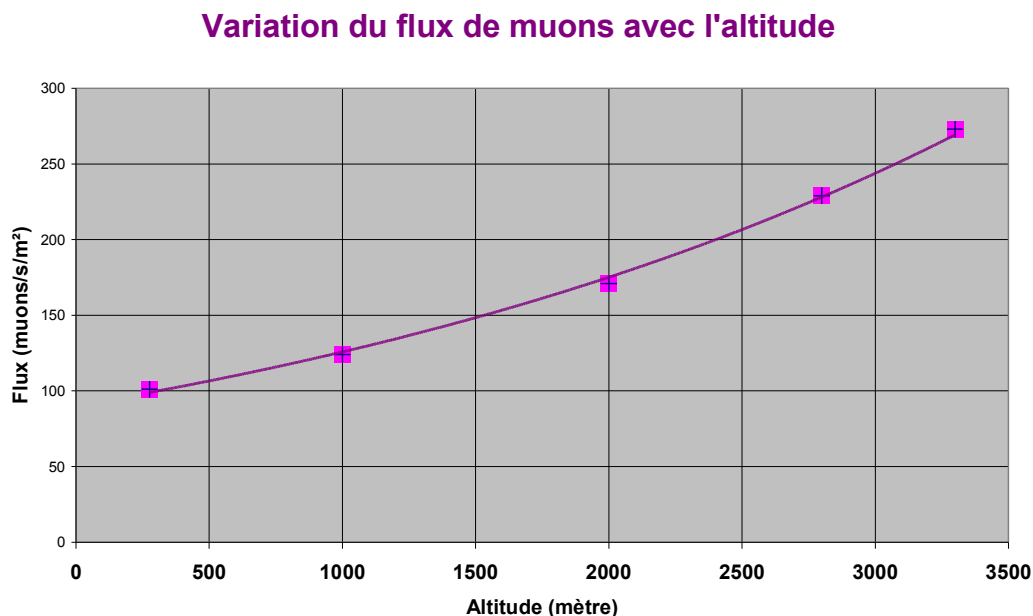
Problème n°2 : Le flux de muons varie-t-il en fonction de l'altitude ?

Altitude en m	Nom fichier	heure	Comptage total sur 15 min	Moyenne sur 10 s	σ (Ecart type Moyenne) pour 10 s	Nombre muon/s/m ²
276	Manip Avion Sol 2	14h04	3927	45.4	5.9 ($\sigma = 13$ muons /s/m ²)	101 ± 3
1000	Manip Air 1000	18h50	4990	55.6	5.9 ($\sigma = 13$ muons /s/m ²)	124 ± 3
2000	Manip Air 2000	17h54	6200	76.4	6.9 ($\sigma = 15$ muons /s/m ²)	170 ± 4
2800	Manip Air 2800	15h37	8650	102.6	8.9 ($\sigma = 20$ muons /s/m ²)	229 ± 4
3300	Manip air 3300	15h18	10500	122.2	8.7 ($\sigma = 19$ muons /s/m ²)	272 ± 4

Nos résultats montrent bien que le flux de muons augmente avec l'altitude, pour mieux visualiser ce phénomène, nous avons représenté cette variation sous forme de graphique.

6) Modèle expérimental

Nous avons pu tracer la courbe représentant l'évolution du flux de muons en fonction de l'altitude, grâce au logiciel « Excel »



Ensuite, grâce à l'outil de modélisation graphique nous avons déterminé l'équation de la courbe obtenue. Cette équation est en fait celle qui permet de connaître le flux de muons en fonction de l'altitude d'après notre modèle expérimental.

Entre 300 m et 3300 m

$$Flux = 90 \times e^{0.0003 \times h} \quad \text{avec Flux en muons/s/m}^2 \text{ et } h \text{ en m.}$$

On peut lire dans les données du cahier pédagogique « Cosmos à l'école », qu'au niveau de la mer, on détecte 1 muon/min/cm², ce qui fait 166 muons/s/m².

D'après notre modèle expérimental, on trouverait 90 muons/s/m², soit presque la moitié ! Cet erreur est peut être dûe au calibrage du cosmodétecteur. Par ailleurs, la courbe est assez « lisse » et passe par tous les points.

III/ SIMULER POUR VERIFIER

Nos résultats expérimentaux paraissent satisfaisants, cependant sans pouvoir vérifier les constantes de notre modèle nous pouvons nous demander quelle est l'influence du calibrage, des réglages du cosmodétecteur sur nos résultats...

Après quelques recherches nous n'avons trouvé aucun modèle théorique, aucune loi qui décrive l'évolution du flux de muon avec l'altitude. Nos connaissances ne nous permettent pas non plus d'en établir un, bien que nous ayons vu que les muons, comme les éléments radioactifs, suivent une loi de décroissance radioactive, exponentielle décroissante :

A l'instant t , le nombre N de muons est :: $N(t) = N_0 \times e^{-\lambda t}$

avec $\lambda = \frac{0.693}{t_{1/2}}$ et $t_{1/2} = 1,56 \mu\text{s}$ le temps de demi vie

Notre modèle expérimental est cohérent avec le phénomène de décroissance radioactive, car les muons sont formés à une haute altitude puis se déplacent vers le sol, tout en se désintégrant, ce qui explique que leur nombre décroisse suivant une exponentielle. Mais le phénomène de relativité nous empêche de vérifier les constantes de notre modèle.

Une aide nous a été apportée par Mr Hubert, chercheur à l'ONERA, que nous avons rencontré lors du concours académique des Olympiades, à Toulouse. En effet, ses recherches portent sur les flux de neutrons, qu'il mesure au Pic du midi, ou même en Antarctique. Mr Hubert nous a dit pouvoir simuler les flux de muons aux altitudes et coordonnées GPS de nos mesures. Nous attendons donc ses résultats pour les comparer à notre modèle expérimental.

CONCLUSION

Lors de ce projet, nous avons d'abord constaté que nous sommes traversés en permanence par des particules issues des gerbes cosmiques : les muons. Grâce à nos expériences en avion, nous avons réussi à déterminer un modèle mathématique décrivant l'évolution du flux de muons détectés en fonction de l'altitude. Cette évolution est une exponentielle faiblement croissante. Nous n'avons pas pu vérifier les constantes de notre modèle mathématique par manque de connaissances.

Ce projet nous a permis de confronter des domaines du programme de Sciences Physiques à des expériences concrètes comme par exemple la relativité. La mise en œuvre des expériences en partenariat avec l'Aéroclub a été pour certains une découverte et la journée de mesures restera un bon souvenir pour tout le groupe. La préparation des expériences en classe, les mesures et l'exploitation des données ont été réalisées par l'ensemble des élèves de Sciences de l'Ingénieur de notre classe. Le travail de groupe fut donc enrichissant.

La réalisation de ce projet n'aurait pu être menée à bien sans la participation de l'Aéroclub du Quercy et de Sciences à l'École pour le prêt du cosmodétecteur. Un grand merci à Mme Quiros pour avoir organisé les visites au CEA de Gramat et au CERN, et pour son encadrement lors des différentes phases du projet. Merci à tous les professeurs, Mme Roucanières, Mr Bernardin qui nous a aidé à rendre le cosmodétecteur « embarquable », et à nos professeurs de mathématiques, Mr Moreau et Mr Bertrand, pour leur aide.



Les TS du lycée Monnerville en voyage au CERN en 2016

ANNEXE

Extrait du tableau de comptage à 3300 m :

Date du: mercredi 30 mars 2016

Heure:15:1

8

manip air 3300

HT PM1: 1100V

Seuil PM1: 10mV

HEURE	COMPTAGE FONCTION PM1xPM2	COMPTAGE FONCTION PM1xPM3	COMPTAGE FONCTION PM2xPM3	COMPTAGE FONCTION PM1xPM2xPM3
15:18:08	85	78	74	67
15:18:18				
15:18:28			233	292
15:18:38			204	268
15:18:48	129	121	111	101
15:18:58	112	102	95	89
15:19:08	108	101	100	90
15:19:18	125	122	114	104
15:19:28	159		325	105
15:19:38	132	124	117	106
15:19:48	116	117	107	101
15:19:58	124	126	117	107
15:20:08	116	123	111	99
15:20:18	127	126	124	111
15:20:28	116	116	103	95
15:20:38	124	125	113	104
15:20:48	112	110	105	91
15:20:58	127	125	112	108
15:21:08	128	132	123	113
15:21:18	139	146	127	122
15:21:28	120	120	104	102
15:21:38	122	113	105	100
15:21:48	125	121	118	103
15:21:58	101	99	94	87
15:22:08	142	140	126	120
15:22:18	121	129	122	106
15:22:28	116	123	107	96
15:22:38	120	116	115	108
15:22:48	127	120	118	108
15:22:58	100	108	103	90
15:23:08	142	144	133	122
15:23:18	116	115	98	88
15:23:28	124	124	109	101
15:23:38	122	125	114	106
15:23:48	128	127	119	112
15:23:58	124	123	122	109
15:24:08	113	110	101	93
15:24:18	136	133	129	117
15:24:28	122	132	113	105

BIBLIOGRAPHIE

Sites internet utilisés :

- www.sciencesalecole.org/
- <https://home.cern/fr>

Bibliographie :

- Cahier pédagogique « Cosmos à l'école »
- Exposition « Les mystères des rayons cosmiques »
- BUP Février 2009, « Réalisation d'un détecteur de muons » par C.Lagoute
- **Passeport pour les deux infinis**, éd DUNOD, Nicolas ARNAUD, Jacques PAUL