

Axel Bortolotti, Florian Flament, Théo Pochet

Professeurs référents : Olivier Sauvanet, Claire Huet, Jean-Paul Bruffa

Lycée Vauban de Givet, Académie de Reims

Chercheurs associés : Alessandra Tonazzo (APC – Paris 7)

Muons de Double Chooz

Etude des éventuelles influences des muons sur les aurores boréales et le champ magnétique terrestre

Mémoire-Olympiades de la physique 2018

Sommaire:

Introduction-Page 2

Partie 1-Page 3

Partie 2-Page 8

Partie 3-Page 13

Conclusion-Page 17

Sources-Page 18

Résumé :

Notre travail pour les olympiades de la physique 2018 porte sur les muons détectés par l'expérience Double Chooz et leur possible corrélation avec les aurores boréales. Ainsi, nous avons choisi d'étudier les données muons pour les dates du 18 mars et du 23 juin 2015, car nous savons que des aurores importantes au vu d'un indicateur fiable se sont produites. Ensuite, nous avons étudié les données d'un détecteur de rayons cosmiques (constitués à 98% de muons) pour les mêmes dates et pour une autre date intéressante fin 2003. Ce que nous avons observé sur la quasi-totalité des graphiques est que le nombre de muons ou l'intensité du rayon cosmique a un pic d'intensité durant 1 ou 2 jours avant l'aurore, puis baisse pendant et après l'aurore, et retourne en quelques jours à la normale. Nous avons remarqué la même chose sur les données du champ magnétique pour ces dates : cela nous amène à penser que les muons du rayonnement cosmique influent sur les aurores boréales et le champ magnétique, ou l'inverse.

Introduction

Durant quelques mois, nous avons effectué une plongée dans le quotidien des chercheurs en physique fondamentale : dans ce cadre, ce sur quoi nous avons travaillé est le lien éventuel entre les muons provenant des rayons cosmiques et les aurores polaires. Les muons, qui peuvent être d'énergies très variables (de quelques GeV à plusieurs centaines de GeV) sont issus de la pénétration de rayons cosmiques dits primaires dans l'atmosphère terrestre, et il en pénètre de grandes quantités chaque heure dans cette dernière. Les rayons cosmiques n'ont pas une origine prouvée, mais leur existence est avérée et la plupart de la communauté scientifique pense que ceux-ci viennent de l'explosion de supernovae ou d'autres objets cosmiques, mais cela reste un domaine à explorer. Nous avons cherché des corrélations entre les muons cosmiques, les variations du champ magnétique terrestre et les aurores boréales. Pour mesurer l'intensité de ces dernières, on utilise les Kp (indice **K** au niveau planétaire, l'indice K étant un indice donnant idée de l'intensité des aurores boréales au niveau local(5)) : globalement, au-dessus d'un Kp de 6, une forte aurore boréale se produit. Nous avons utilisé les données du détecteur de rayons cosmiques de Mexico, les estimations de Kp, le détecteur de Dourbes pour les variations du champ magnétique terrestre et surtout les données muons de l'expérience Double Chooz, qui se situe assez près de notre lycée (moins de 10 km), qui fournit des données sur les muons en plus des données sur les neutrinos, car les muons peuvent interférer dans les mesures de neutrinos et il fut nécessaire pour les physiciens de l'expérience de connaître les mesures de muons pour corriger les données pour les neutrinos. Durant tout ce mémoire, nous allons présenter notre démarche scientifique et les corrélations (et leur taux) que nous avons trouvés pour quelques dates intéressantes sur plusieurs années, pour essayer d'en faire notre interprétation.

I) L'expérience Double Chooz et les aurores boréales de mars et juin 2015

Nous nous sommes en priorité concentrés sur les résultats des détecteurs de Double Chooz au vu de la proximité de notre lycée avec l'expérience, ce qui induit un aspect local qui nous a intéressés.

A l'origine, cette expérience était mise en place pour la détection des neutrinos émis par le cœur des réacteurs nucléaires de la centrale de Chooz B, tout proche, mais l'expérience a aussi produit des données fiables pour les muons, que nous exploitons dans ce mémoire et qui nous ont conduit à observer des corrélations prononcées.

Grâce à l'expérience Double Chooz, nous avons eu des mesures de détections de muons, par heure, sur les deux détecteurs que compte le site de Double Chooz, comme sur le schéma suivant:

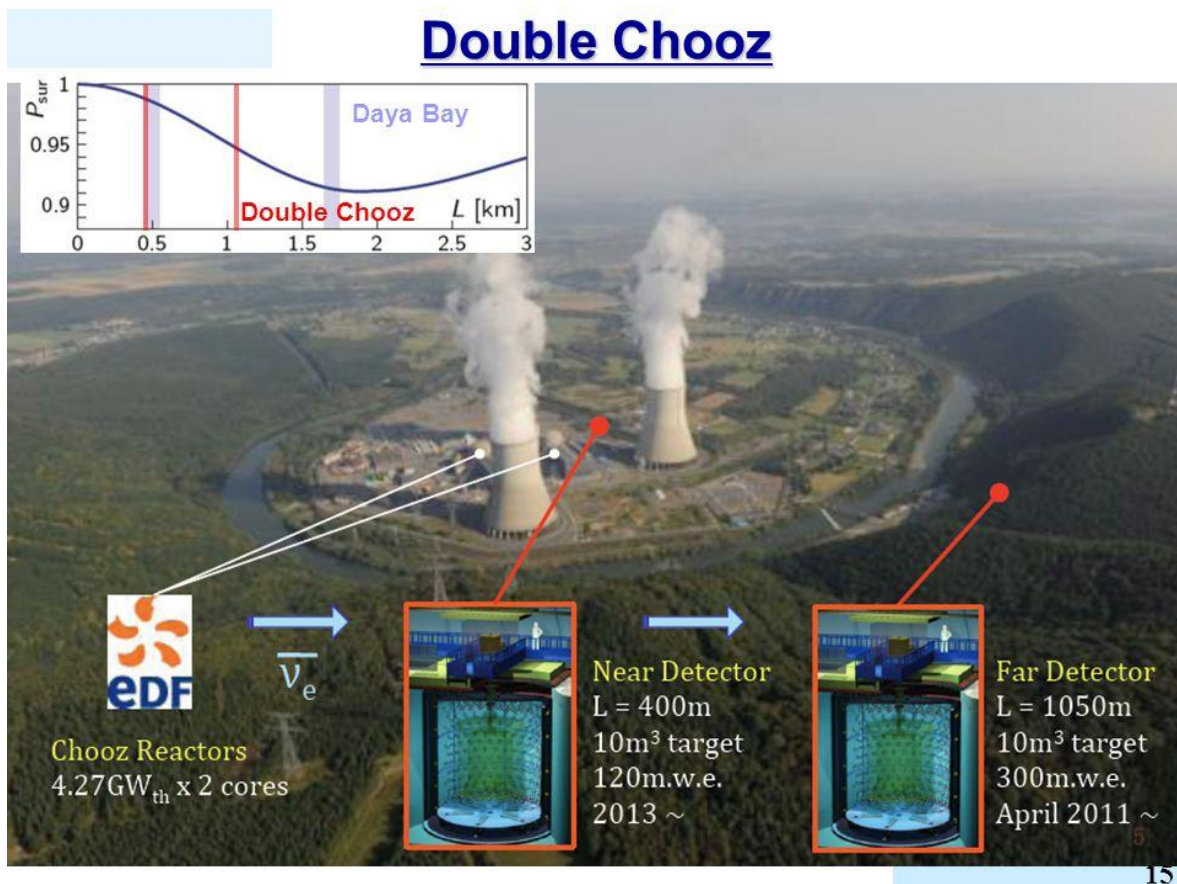


Image légendée représentant la centrale de Chooz B et les deux détecteurs de l'expérience Double Chooz

Les deux détecteurs sont, en plus d'être éloignés l'un de l'autre, enterrés sous une couche de roche d'une épaisseur différente. Cela donne donc des mesures différentes pour les muons, car ceux-ci sont d'énergies diverses comme vu auparavant et ils traversent plus ou moins bien la couche de

roche (ainsi, certains sont stoppés, ce qui explique qu'il y a moins de muons détectés par le détecteur lointain, plus enfoui, que par le détecteur proche).

On voit donc sur cette image que les deux détecteurs sont différents: le near detector est situé au plus près des réacteurs, sous une couche de roche faible, tandis que le far detector est situé plus loin et plus profond.



Carte de France présentant la localisation de Chooz où se déroule l'expérience Double Chooz

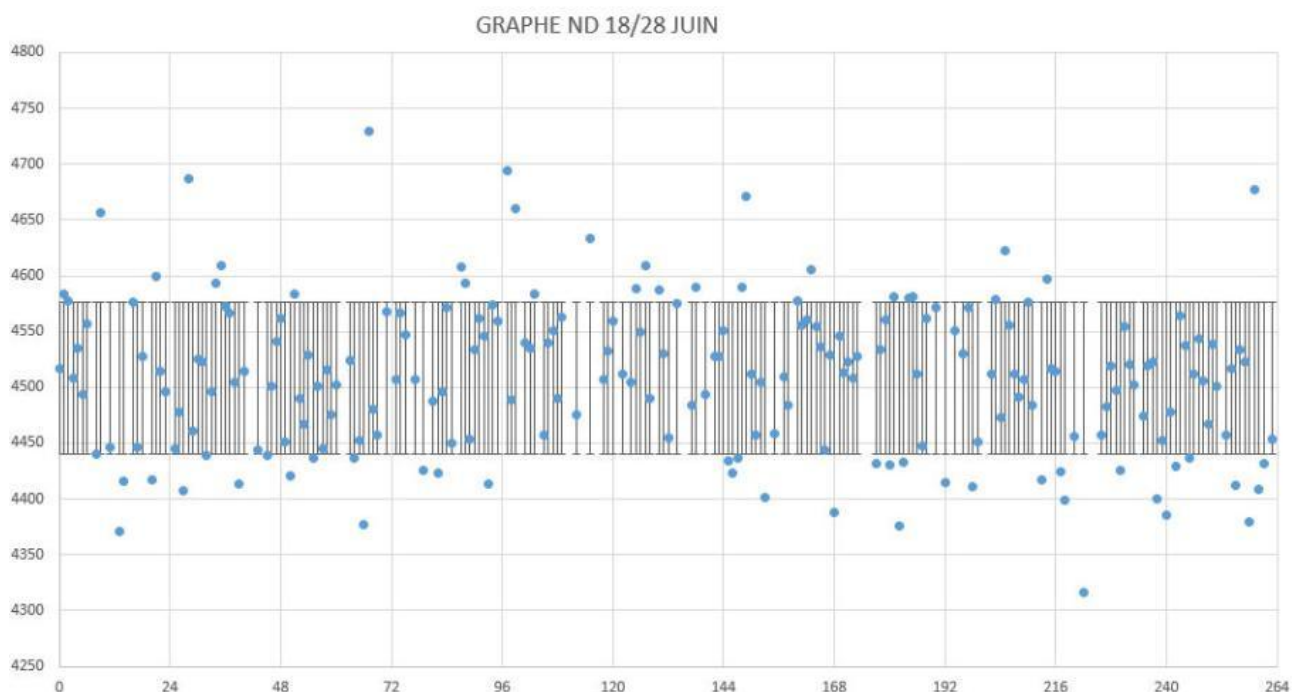
Etant donné que notre travail porte sur les aurores boréales, nous avons sélectionné deux dates intéressantes et sur lesquelles notre travail s'est concentré: le 18 mars 2015 et le 23 juin de la même année. Lors de ces jours, des aurores boréales importantes ont pu être observées en France, comme le montre l'image suivante, prise le matin du 23 juin en Normandie:



Le fait que ces aurores prennent place en France nous a inévitablement conduit à utiliser les détecteurs Double Chooz.

Après avoir eu les données en notre possession pour les mois de mars et juin, nous nous sommes rendus compte que le nombre de muons était calculé non pas sur une heure, mais sur une heure et quelques centièmes, ce que nous avons corrigé par souci de précision avec une simple formule de proportionnalité. Pour étudier sur la durée les muons associés aux dates des aurores, nous avons pris de larges intervalles (cinq jours avant et cinq jours après l'aurore), puis nous avons fait quatre graphiques (un par détecteur et par date) en prenant soin d'intégrer des barres d'erreur faites en fonction de l'écart type des séries statistiques étudiées.

Pour le near detector, sur la date du 23 juin, nous avons obtenu le nuage de points suivant:



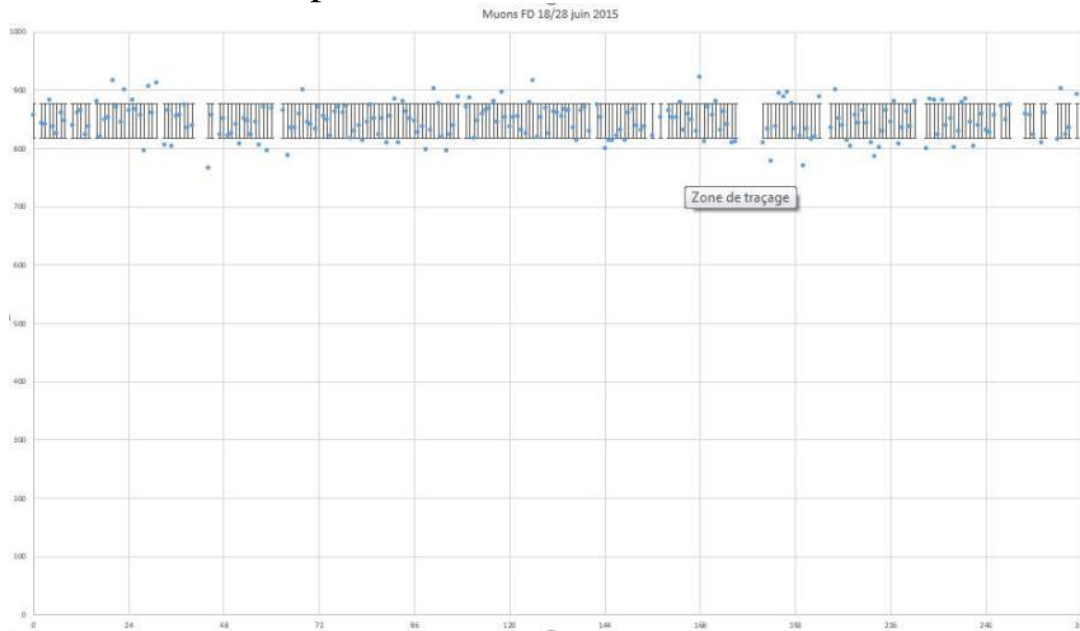
Graphique présentant les données du détecteur proche de Double Chooz du 18 au 28 juin 2015, avec des barres d'erreur faites en fonction de l'écart-type.

Abscisse : t_n où $t_0 = 18/06/15$ à minuit (en heures)

Ordonnée : nombre d'événements muons détecté au ND

En abscisses, le jour de l'aurore dure sur la sixième section en partant de la gauche, c'est à dire de 120 à 144, l'axe des abscisses correspondant au temps en heures dans l'intervalle. On peut remarquer lors des jours précédents une forte activité muonique se traduisant par des pics s'élevant au-dessus de 4700 muons alors que la moyenne de l'intervalle se trouve à un peu plus de 4500

Cependant, après l'aurore, les taux de muons mesurés baissent : il y en a de moins en moins au dessus de l'intervalle des barres d'écart type, mais de plus en plus en dessous : atteignant même un minimum à ~4320. On peut alors regarder le détecteur lointain qui fournit des informations comparables:



Graphique présentant les données du détecteur lointain de Double Chooz du 18 au 28 juin 2015 avec des barres d'erreur modulées en fonction de l'écart type.

Abscisse : t_n où $t_0 = 18/06/15$ à minuit (en heure)

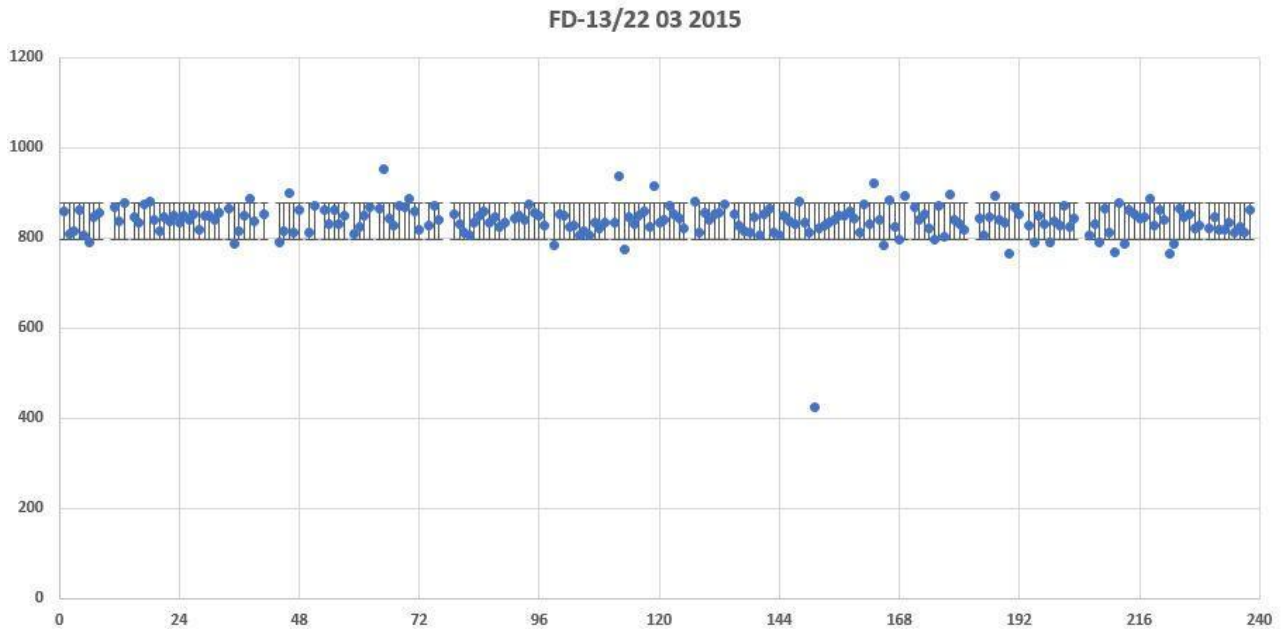
Ordonnée : nombre d'événements muon détecté au FD

Ici, le jour de l'aurore boréale correspond aussi à la sixième section. On remarque ici le même phénomène un peu atténué, dû sûrement au fait que les muons doivent traverser une plus grande couche de roche pour parvenir au far detector: on peut voir que le jour de l'aurore est précédé d'un jour très agité avec six points au-dessus des barres d'écart-type, tandis que le jour suivants est fortement calme: une seule valeur se hisse un petit peu au-dessus des barres, tandis que pour le deuxième jour après l'événement, seul un point se démarque des autres au même point qu'avant l'éclipse: cela correspond à ce que le near detector a mesuré.

Cela nous amène ainsi à l'étude des données pour la deuxième date: le 18 mars 2015, qui a vu se produire de superbes aurores, comme celle-ci en altitude dans les Vosges:



Pour étudier cette aurore, on commence par le Far Detector, qui fournit des données intéressantes:



Graphique présentant les données du détecteur lointain de l'expérience Double Chooz du 13 au 22 mars 2015.

Abscisse : t_n où $t_0 = 13/03/15$ à minuit (en heure)

Ordonnée : nombre d'événements muon détecté au FD

Comme usuellement, l'aurore se situe sur la sixième portion des abscisses. On retrouve alors un schéma déjà connu, c'est à dire que le jour précédant l'aurore est très agité, avec deux points fortement au-dessus des barres d'écart-type, tandis que le jour de l'aurore et celui qui suit sont assez calmes en comparaison: par après, les données reviennent à la normale, mais cela confirme encore une fois ce que nous avons vu plus haut.

Cependant, il ne sera pas possible ici d'étudier les données du Near Detector pour le 18 mars, celles-ci étant incomplètes en raison d'un problème technique survenu sur ce détecteur à cette période. Ainsi, nous avons terminé l'étude des données Double Chooz pour ces deux dates, mais il reste évidemment beaucoup de dates à traiter éventuellement pour des recherches futures.

II) Le détecteur de rayons cosmiques de Mexico et les aurores boréales d'octobre 2003

Après quelques recherches, nous nous sommes rendus compte qu'à la fin du mois d'octobre 2003, une tempête solaire s'est produite (1). Cet afflux de particules chargées a été la conséquence d'aurores polaires visible à latitude très faible sur Terre, donc à Kp très grand.

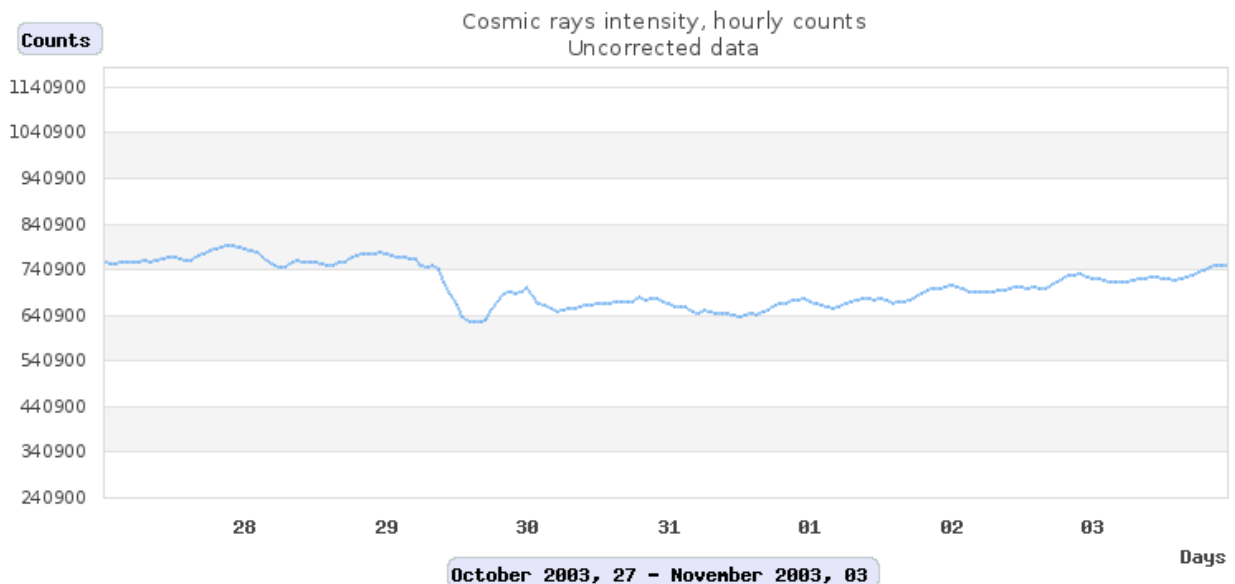
A cette date-là, l'expérience Double Chooz n'avait pas encore été mise en place et il a fallu se tourner vers un autre détecteur de rayons cosmiques. Issus de la gerbe cosmique, le muon représente 98% du rayon cosmique (2). Si le détecteur de Double Chooz nous donne une mesure précise d'événements muons ; le détecteur de Mexico, que nous avons choisis, est un "neutron monitor", c'est à dire un détecteur qui mesure directement le taux de rayon cosmique, entre 8,5 et 200 GeV (3). Son intérêt réside principalement dans la grande gamme de dates auxquelles des mesures ont été effectuées, mais aussi sa latitude basse différente de celle de Chooz (19,4°N environ pour Mexico, 50,1°N environ pour Chooz). En effet, les muons ont un impact localisé et le nombre de muons arrivant

sur un endroit précis n'est pas le même d'un lieu à l'autre.



Source : site de l'observatoire de Mexico (4)

Voici les données de l'observatoire de Mexico pour la date de la tempête solaire entre le 27 octobre et le 3 novembre 2003 : (4)



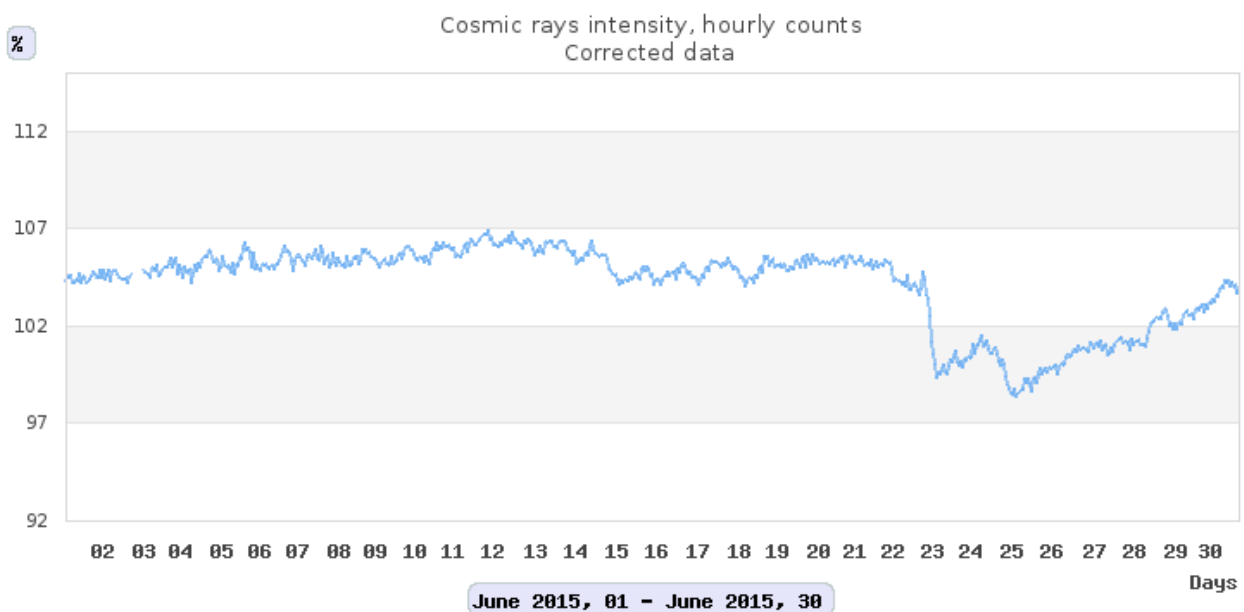
Graphique montrant les rayons cosmiques mesurés entre les mois d'octobre et novembre 2003 par le détecteur de Mexico

Abscisse: jours

Ordonnées: événements/h

La baisse du taux de rayon cosmique mesuré est flagrante après le 29 octobre, date du début des perturbations de l'atmosphère par les particules chargées. Le taux met plusieurs jours avant de revenir à la normale.

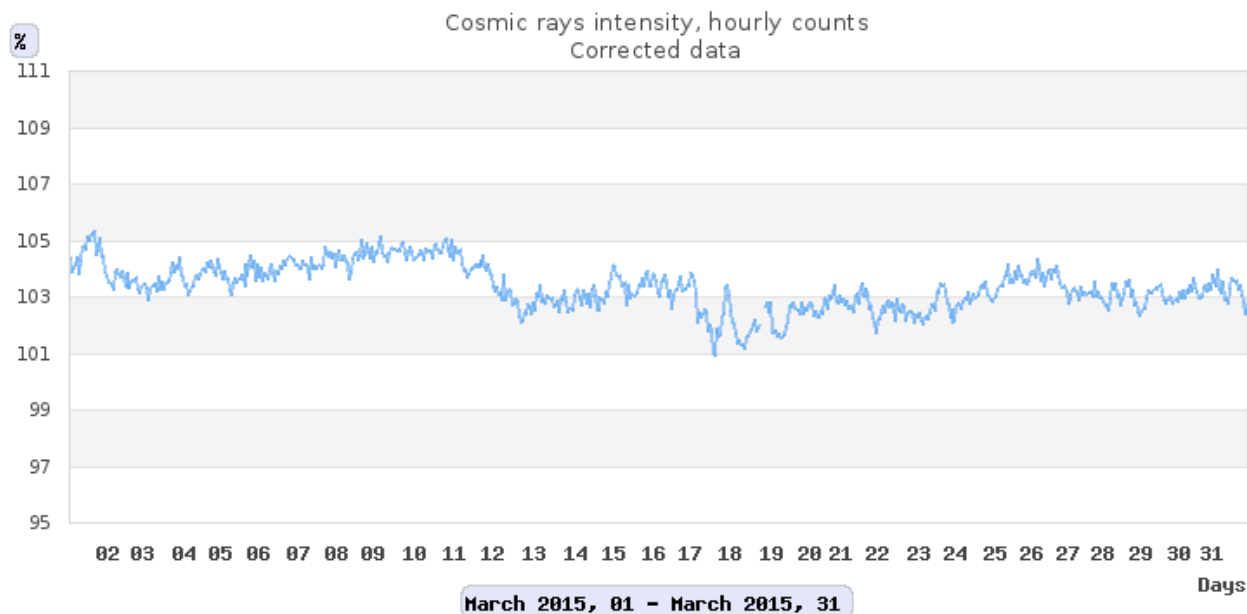
Une telle observation peut se faire pour les deux dates d'aurores boréales que nous avons déjà traitées antécédemment dans ce mémoire via les données Double Chooz. Cependant, pour y voir plus clair, nous allons devoir utiliser les données "corrigées" et non plus les données brutes. En effet, ces données corrigées prennent en compte la pression atmosphérique qui a une influence non négligeable sur le taux de rayon cosmique. Le résultat n'est alors plus donné en nombre d'événement, mais en pourcentages. Cependant, l'allure de la courbe reste intéressante à traiter.



Graphique montrant les rayons cosmiques mesurés durant le mois de juin 2015 par le détecteur de Mexico

Abscisses: jours

Ordonnées: % de la moyenne habituelle



Graphique montrant les rayons cosmiques mesurés durant le mois de mars 2015 par le détecteur de Mexico

Abscisses: Jours

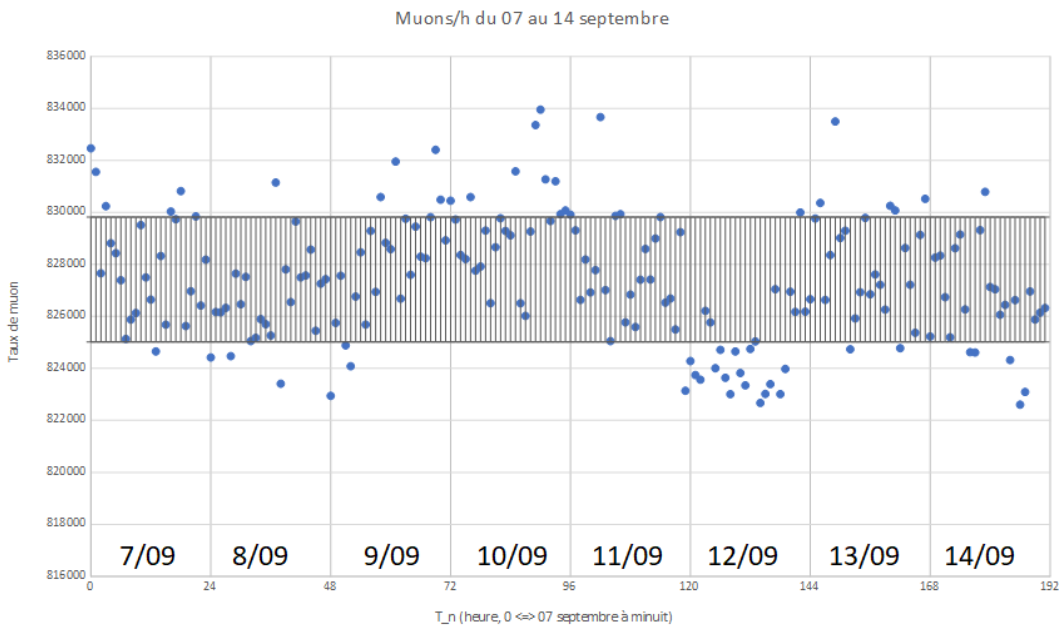
Ordonnées: % de la moyenne habituelle

Les chutes violentes et, d'ailleurs, les minimums, de chaque mois sont atteints le jour de l'aurore ou après.

Le 11 septembre 2018, une aurore boréale à fort Kp s'est déclarée : d'après le site de la NOAA, un Kp de 8 a été atteint.

Nous avons dû utiliser les données de Mexico car l'expérience Double Chooz était terminée et les détecteurs démantelées.

Nous avons décidé de faire subir les mêmes traitements que sur les données de Double Chooz : cela a du sens, en effet s'il y a une baisse du taux de muon comme nous pouvons le voir de manière flagrante pour les aurores de 2003 et 2015, alors il y aura plus de point sous l'intervalle d'écart type pour la date de l'aurore et pour après. Il ne suffirait que de les compter et d'essayer d'y voir une corrélation avec le Kp.



Graphique montrant le nombre de muons détectés par heure sur le site de Mexico en fonction de la date entre le 7 et le 14 septembre 2018

Abscisses :date

Ordonnées: Muons/h

A partir de ce graphique et du site du NOAA, nous avons tiré deux séries de statistiques pour les huit jours de mesure :

- Une première série (variable aléatoire X) qui représente le nombre de points sous l'écart type pour un jour.
- Une seconde série (variable aléatoire Y) qui représente le Kp max du jour précédent pour un jour.

En utilisant la formule statistique du coefficient de corrélation :

$$\text{Cor}(X, Y) = \frac{E[(X - E(X))(Y - E(Y))]}{\sigma_X \sigma_Y} = \frac{E(XY) - E(X)E(Y)}{\sigma_X \sigma_Y}$$

(où E désigne l'espérance et σ l'écart type)

Nous avons calculé pour ces deux séries de données un coefficient de corrélation de 0,86 ce qui indique une forte corrélation.

Corrélation Kp max jour précédent et Nb de point (dessous) :			Variable aléatoire X	Variable aléatoire Y	Variable aléatoire XY	Variable aléatoire X²	Variable aléatoire Y²
07-sept	2	3	Données	2	3	6	4
08-sept	4	3		4	3	12	16
09-sept	2	3		2	3	6	4
10-sept	0	3		0	3	0	0
11-sept	2	5		2	5	10	4
12-sept	16	8		16	8	128	256
13-sept	2	4		2	4	8	4
14-sept	5	6		5	6	30	25
			Espérance	4,125	4,375	25	39,125
			Ecart-type	4,70206071845101	1,72753437013566		22,125
kp max jour précédent en fonction du nb de pts (dessous) d'un jour pour 8 jours			Coef de corrélation :		0,855982936618693		
			<p>Le coef de corrélation est situé entre -1 et 1 Un coef petit (proche de 0) indique une non corrélation Un coef proche de 1 indique une forte corrélation Un coef proche de -1 indique une forte corrélation négative</p>				

Tableur montrant le calcul du taux de corrélation entre les muons/ h et les Kp

Ces données sont cependant à prendre à la légère : il n'y a pas assez de jours pour nous permettre d'obtenir une conclusion fiable.

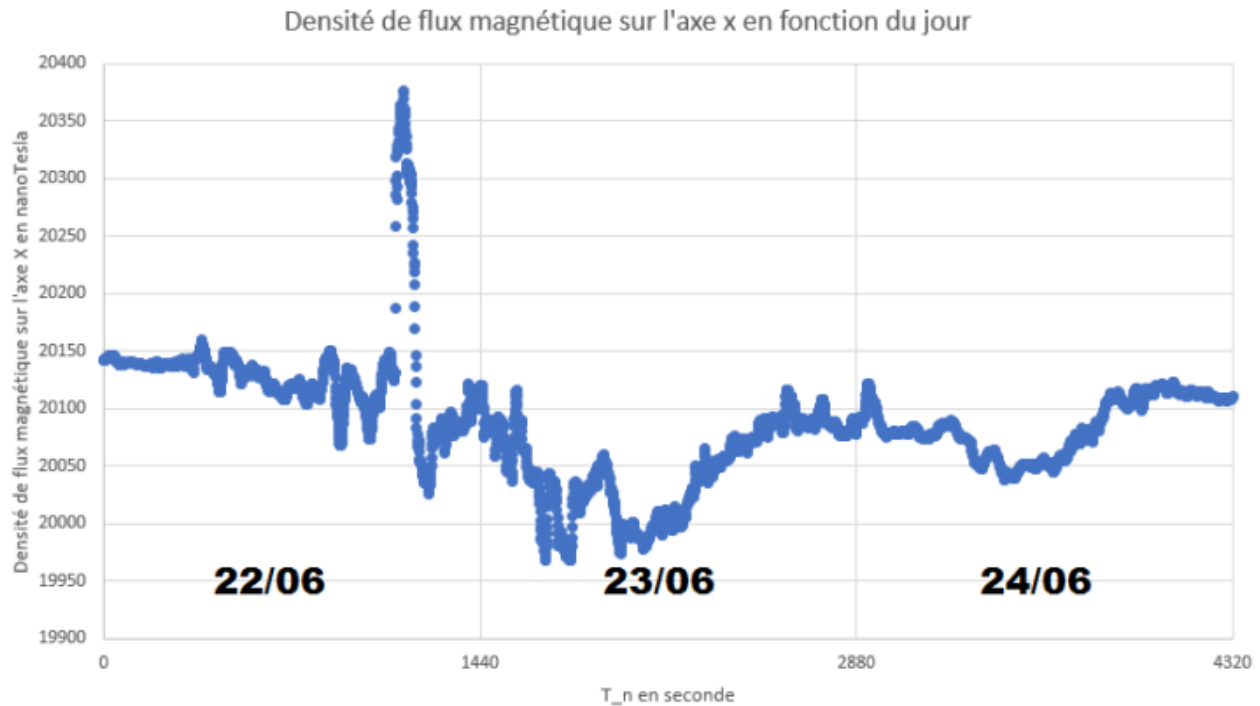
Pendant et après une aurore, il y aurait donc une chute du taux de rayon cosmique. Il est aussi intéressant de retrouver cette même forte activité des rayons cosmique avant l'aurore boréale.

III) Les variations du champ magnétique terrestre et différentes aurores

Ici, les variations du champ magnétique terrestre sont mesurées en fonction du temps sur trois axes spatiaux: x, y et z. Nous avons voulu étudier ces variations au cas où des corrélations similaires à ce que nous avons observé auparavant venaient à apparaître.

Dans un premier temps, nous étudions l'aurore du 23 juin 2015, que nous avons analysée précédemment grâce aux détecteurs de Double Chooz et plus secondairement Mexico. Pour l'étude du champ magnétique, les données de différents détecteurs sont répertoriés sur le site d'Intermagnet. Il a alors fallu faire un choix, et le nôtre s'est porté sur le détecteur de Dourbes, en Belgique, à vingt kilomètres de Givet, car il est proche de Double Chooz et en conséquence il devient plus facile de comparer les données.

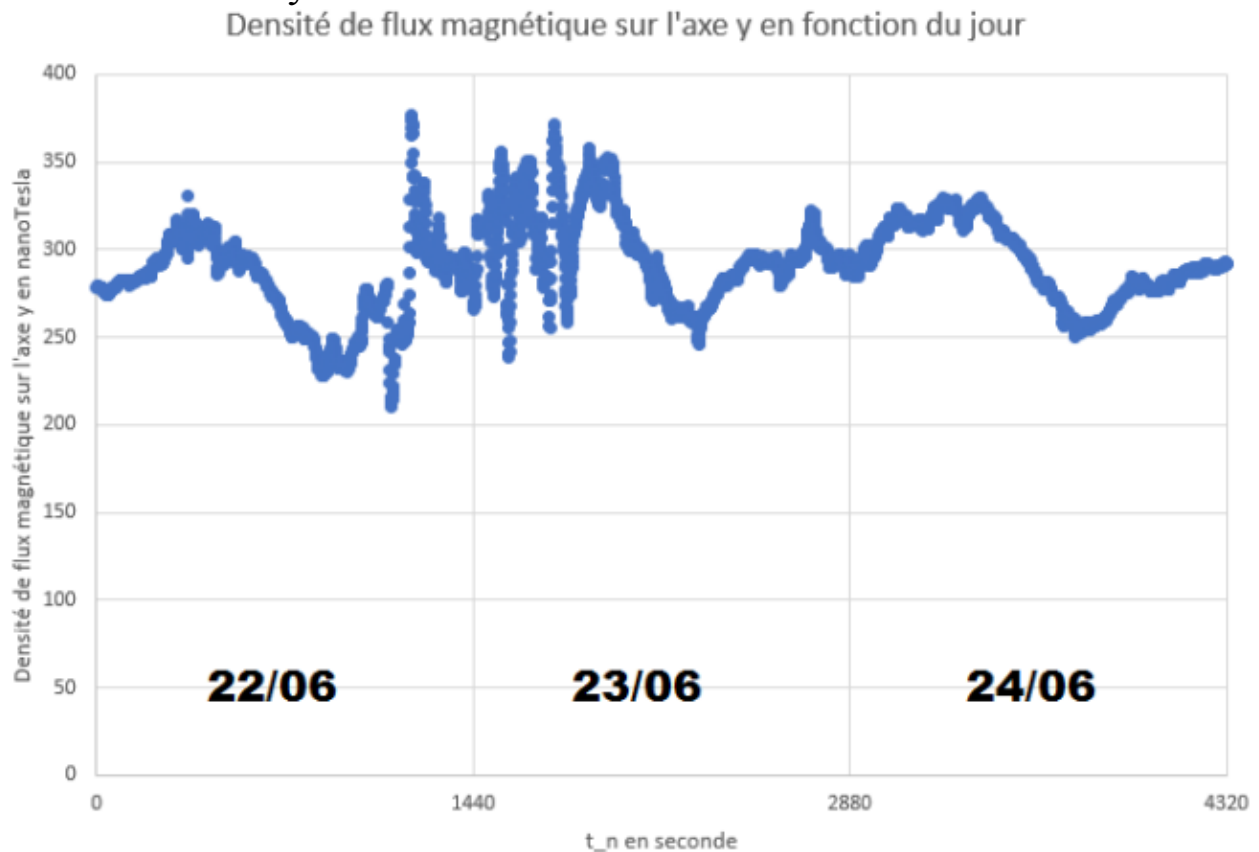
Les données de l'axe x sont les suivantes:



Graphique représentant la densité de flux magnétique en fonction du temps du 22 au 24 juin 2015

Nous voyons ici un pic remarquable sur la date du 22 juin au soir, avant l'aurore, cela correspond aux sursauts d'intensité constatés plus tôt sur les données Double Chooz et Mexico. De plus, on constate le jour de l'aurore une baisse d'intensité qui se rétablit en deux jours environ: cela correspond.

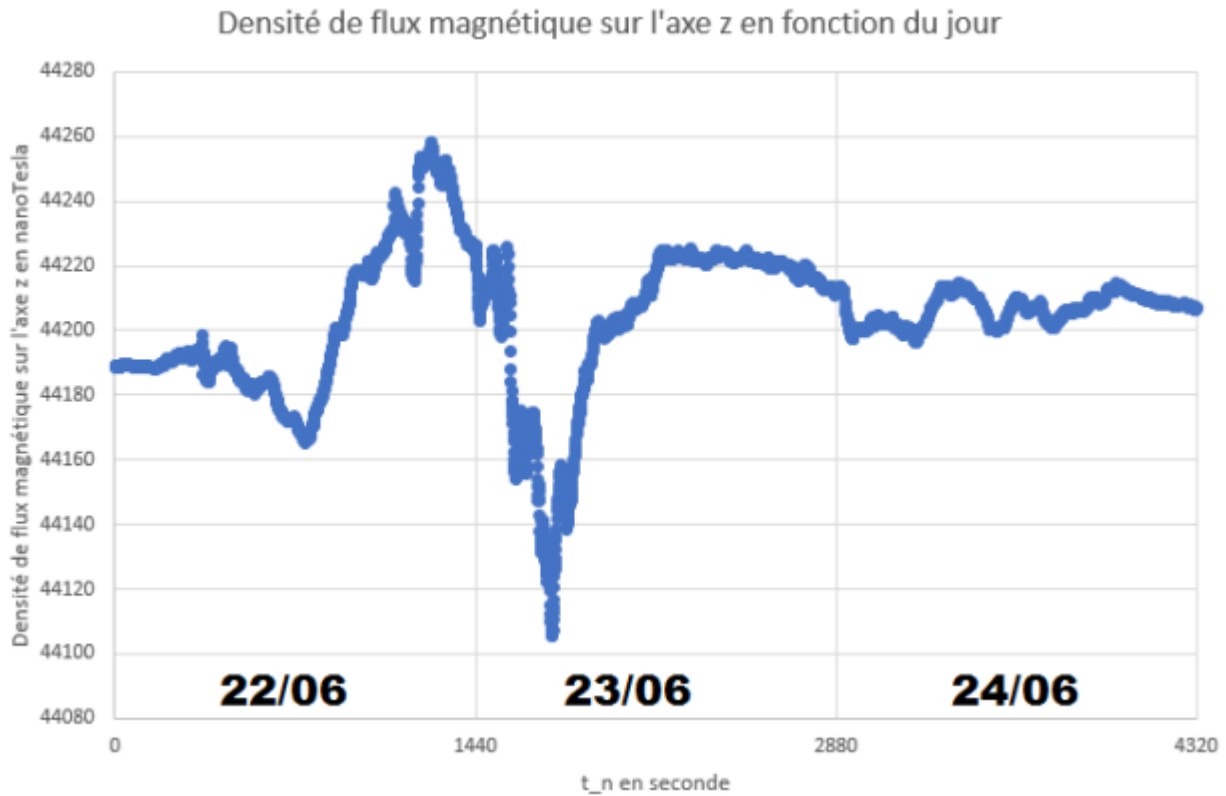
Maintenant l'axe y:



Graphique représentant la densité de flux magnétique sur l'axe y pour la période du 22 juin au 24 juin

Ici, nous remarquons une chose assez similaire mais un peu moins marquée; le pic d'intensité est remarqué vers le même moment, et la baisse d'intensité est présente mais un peu atténuée; cela aussi concorde. L'agitation est assez forte, les remontées et les diminutions sont ici fréquentes et rapides. On voit ainsi ici que quelque chose d'inhabituel se produit.

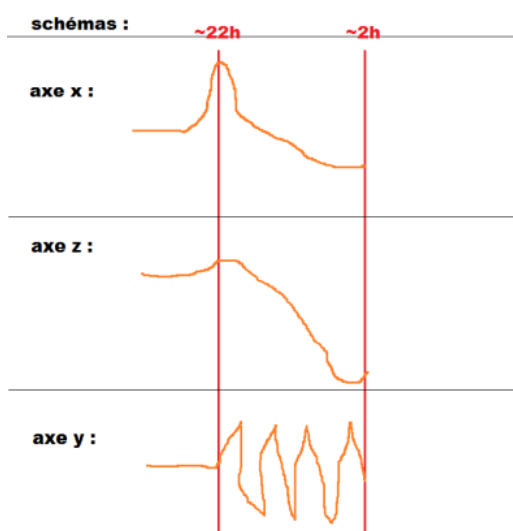
Maintenant l'axe z:



Graphique montrant la densité de flux magnétique sur l'axe z du 22 juin au 24 juin

On remarque ainsi que de 22h à 2h du matin dans la nuit du 22 au 23, on remarque une baisse agitée par sursauts que précède un sursaut d'intensité important. Par la suite, cela se rétablit. Ainsi, ces grandes agitations qui surviennent au même moment sont fortement similaires, une fois de plus, aux agitations de formes précises observées sur toutes les données étudiées plus tôt.

Pour résumer la forme que prennent ces courbes, voici un schéma (pas à l'échelle):



On voit donc ici un schéma similaire pour les axes x et z, et l'évidence d'une agitation pour l'axe y.

L'entièreté de ces éléments nous amène donc à penser que les fluctuations du champ magnétique, les aurores et la variation du nombre de muons arrivant sur Terre sont trois phénomènes corrélés et liés.

CONCLUSION

Lors de ce projet, nous avons trouvé des schémas fréquents très intéressants lors de et avant l'apparition d'aurores boréales, que nous avons exposé dans ce mémoire : ainsi, le détecteur de muons de l'expérience Double Chooz, à laquelle nous nous sommes intéressés de près, montre pour deux dates en mars et juin 2015 que le nombre de muons connaît un pic important pendant les jours avant l'aurore, ensuite, pendant l'aurore et après, une chute importante et brutale est remarquée, avant de se rétablir en deux ou trois voire quatre jours. Ensuite, nos recherches nous ont conduit vers le détecteur de rayons cosmiques de Mexico, où nous avons observé le même schéma sur les mêmes dates et sur quelques autres qui nous ont permis d'augmenter notre certitude vis-à-vis de l'occurrence de ce que nous avons remarqué. Enfin, nous nous sommes orientés vers les variations du champ magnétique terrestre pour une des dates concernées, ce qui nous a permis d'apercevoir les mêmes schémas.

Ainsi, nous pensons que le rayonnement cosmique et ses muons interviennent dans l'apparition des aurores boréales et modifient le champ magnétique. Ou l'inverse.

Nous avons tiré de ce projet une expérience très bénéfique qui nous a montré en partie ce que pouvait être les métiers de la recherche, à savoir un métier de passion et passionnant constitué de cheminements longs vers le savoir, faits d'impasses et de sentiers logiques. Nous avons aussi vu qu'une recherche est un processus imprévisible qui peut nous orienter parfois vers autre chose que ce que l'on cherche, qui parfois est fait de longs travaux peu fructueux et d'avancées rapides, mais qui est toujours captivant dans son essence même.

Ainsi, dans l'idée de continuer ce que nous avons commencé à entreprendre ici, nous analysons actuellement les données de Double Chooz pour d'autres dates, et les données du détecteur de rayons cosmiques de Dourbes pour essayer d'y trouver, ou pas, les schémas que nous décrivons ici.

Nos remerciements vont à :

- Alessandra Tonazzo pour les données et pour ses conseils avisés
- Olivier Sauvanet pour son encadrement et son aide précieuse
- Claire Huet pour son encadrement et son avis intéressant sur ce dossier
- Jean-Paul Bruffa pour nous avoir accompagné par visioconférence depuis Avignon
- Le directeur du centre géophysique de Dourbes
- Les Olympiades pour nous avoir accueilli.

-Hervé de Kerret, directeur de recherches au CNRS, responsable de l'expérience Double Chooz, qui a eu l'idée de mettre à notre disposition les données de l'expérience et qui est venu de nombreuses fois dans notre lycée et qui malheureusement nous a quittés en décembre 2017.

Sources :

<http://doublechooz.in2p3.fr/Public/French/welcome.php>

<https://www.ladepeche.fr/article/2003/10/31/191792-tempete-solaire-sur-la-terre.html> (1)

<https://www.youtube.com/watch?v=H5a-2o5Tt7g> (2)

<http://www.cosmicrays.unam.mx/aboutorc.html> (3)

<http://www.cosmicrays.unam.mx/> (4)

<http://www.spaceweather.com/glossary/kp.html> (5)