



Lycée Ermesinde
Lycée public autonome à plein temps

Les rayons cosmiques et leurs interactions avec notre atmosphère



Auteur : Demoutiez Yannis

Classe : 2clB

Directeur : Andrea Grana

Jury : Nicolas Aschman, Pierre Obertin

Je déclare sur l'honneur que ce mémoire a été écrit de mes mains, sans aide extérieure non autorisée.

Signature de l'élève :

Mémoire soutenu et accepté le :

Andrea Grana:

Nicolas Aschman :

Pierre Obertin:

.....

.....

.....

1 Contenu

1	Contenu	3
2	Le but de ce travail	4
3	Introduction.....	5
4	Les rayons cosmiques	6
4.1	Qu'est-ce que c'est ?	6
5	Interactions entre les rayons cosmiques et l'atmosphère terrestre.....	7
5.1	La désintégration des rayons cosmiques	7
5.2	Les interactions dominantes	8
5.2.1	Rayonnement de freinage (Bremstrahlung).....	8
5.2.2	Ionisations	9
5.2.3	Créations de paires.....	9
5.2.4	Interactions nucléaires	9
5.3	L'atmosphère terrestre	10
5.3.1	Les différentes couches de l'atmosphère et leurs propriétés.....	10
5.3.2	Composition de l'atmosphère	12
5.3.3	Qu'est-ce qui influence la température dans l'atmosphère	13
5.4	Quels facteurs météorologiques influencent les rayons cosmiques.....	18
5.4.1	Les détecteurs	18
5.4.2	Blackett effet	19
5.4.3	Effet thermique	23
6	L'influence des rayons cosmiques sur notre atmosphère et notre climat.....	35
6.1	Corrélation entre le climat et les rayons cosmiques	35
6.1.1	Evolution de la recherche au fil du temps liant le réchauffement climatique au rayons cosmiques (de 1911 à 2003).....	35
6.1.2	Corrélations entre les nuages et les rayons cosmiques	37
6.1.3	Effet des rayons cosmiques sur les aérosols et les conséquences.....	38
7	Conclusion	43
8	Bibliographie.....	45

2 Le but de ce travail

Dans ce travail je compte analyser les interactions entre les rayons cosmiques et l'atmosphère, donc la manière avec laquelle l'atmosphère nous « protège » des rayons cosmiques mais aussi la manière dont les rayons cosmiques influence notre atmosphère et notre climat.

Dans ce travail j'intégrerais des travaux pratiques que je vais réaliser dans le cadre de l'entreprise d'astronomie. Ces travaux pratiques consisteront à mesurer le rayonnement secondaire afin de savoir les différentes influences que les paramètres atmosphériques ont sur les rayons cosmiques.

3 Introduction

Le rayonnement cosmique est le flux de particules élémentaires et de noyaux atomiques qui circulent dans l'espace à des vitesses voisines de celle de la lumière. Selon le cas, leur origine est à rechercher dans le Soleil et dans les processus stellaires à l'intérieur ou à l'extérieur de notre galaxie. Les rayons cosmiques parviennent de toutes les directions du ciel, ce qui ne signifie pas nécessairement que leurs sources sont à égale distance de la Terre. Probablement, les champs magnétiques de la galaxie les guident et les dispersent constamment, au point que toute trace de leur origine est perdue. Il semble que la composante permanente puise son origine dans la galaxie. Elle est constituée de particules très énergétiques éjectées par les énormes explosions de supernovas, étoiles très massives parvenues en fin de vie. Toutefois, il reste l'énigme du rayonnement cosmique de ultra-haute énergie. En ce qui concerne les sources, il faut que ce soient les objets les plus actifs et les plus énergétiques de l'Univers connu, tels que les sursauts gamma, les plus grandes radiogalaxies, analogues des quasars de l'Univers lointain, et/ou peut-être les magnetars (étoiles à neutrons les plus magnétisées). Ce type de particules peuvent atteindre des valeurs d'énergie jusqu'à l'ordre de 10^{20} eV, cela est plus ou moins la même énergie qu'une balle de tennis qui se déplace avec une vitesse d'environ 150 km/h.

Actuellement il y a un fort débat sur le climat mondial et il est très difficile de traiter cette thématique de manière objective, même dans la communauté scientifique. En effet, il y a des opinions et des études contrastantes par rapport à ce sujet. Est-ce qu'il y a vraiment un réchauffement global ? Si on peut confirmer cela, est-ce que c'est à cause de l'activité humaine ou c'est dû à des phénomènes naturels ? Il y a plein de questions qui nécessitent une réponse univoque et certaine. Dans les dernières années, le CERN s'est occupé d'enquêter sur ces sujets, par le projet CLOUD. Il n'y a pas encore de réponses exhaustives, mais il semble clair que l'évolution de notre climat est influencé, de manière significative, pas seulement par l'activité humaine mais aussi par des processus naturels (qui ne sont pas directement liés à l'activité humaine). Beaucoup de gens ignorent que le rayonnement cosmique fait partie de ces processus.

4 Les rayons cosmiques

4.1 Qu'est-ce que c'est ?

Les rayons cosmiques sont des particules chargées se déplaçant rapidement qui proviennent du milieu interstellaire. La plupart de ces particules sont des protons (85%), mais on retrouve également des particules alpha (noyaux d'hélium) (14%), des électrons (1%)¹ et toutes sortes d'autres noyaux d'atomes. Ces particules proviennent d'une multitude de sources, notre Soleil en fait partie, mais les rayons cosmiques provenant de celui-ci sont nettement moins énergétiques que ceux qui proviennent d'une supernova par exemple.

Les rayons cosmiques n'atteignent pas la Terre, ils se désintègrent en une multitude de gerbes de particules en traversant l'atmosphère terrestre. Les rayons ne peuvent donc qu'être mesurés indirectement à partir de la surface de la Terre. L'exposition augmente donc avec l'altitude, ce qui doit être pris en compte par les services aériens, mais surtout pour les astronautes. Malgré les dangers que les rayons cosmiques représentent pour l'être humain, et même pour tous les autres êtres vivants nous ne savons que très peu sur ces rayons. Pour certains des plus énergétiques, donc les plus dangereux nous ne connaissons même pas leurs origines.

Les rayons traversant l'espace venant directement de leurs sources sont nommés les rayons cosmiques primaires, en interagissant avec l'atmosphère les rayons primaires se désintègrent en une multitude de particules secondaires.

¹ Pourcentage provenant de <https://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/univers-rayon-cosmique-2446/>

5 Interactions entre les rayons cosmiques et l'atmosphère terrestre

5.1 La désintégration des rayons cosmiques

Dans ce chapitre je vais analyser la manière dont les rayons cosmiques se désintègrent quand ils atteignent notre atmosphère. Ceci me permettra de mieux comprendre comment différents facteurs comme la température, l'humidité, la pression, influencent cette désintégration.

Les rayons cosmiques traversent l'univers sans trop d'encombre mais en rencontrant notre atmosphère la densité des particules avec lesquelles les rayons cosmiques peuvent rentrer en collision augmente très rapidement et les rayons n'ont presque aucune chance de ne pas rentrer en collisions avec ces particules. Les rayons ne s'étant pas encore désintégrés se nomment rayonnement primaire et le rayonnement déjà désintégré se nomme rayonnement secondaire.

Comme déjà mentionné dans ce travail le rayonnement primaire est principalement composé de protons (85%), mais on retrouve également des particules alpha (noyaux d'hélium) (14%), des électrons (1%)² et toutes sortes d'autres noyaux d'atomes et de particules.

Quand les rayons cosmiques primaires, essentiellement des protons, entrent en collision avec les molécules de la haute atmosphère, ils créent une cascade de plus de 10 milliards de particules secondaires, appelée gerbe atmosphérique et qui peut s'étendre sur plus de 40 km² quand elle arrive au sol. Parmi ces particules subatomiques secondaires, la désagrégation des pions et des kaons produit des muons, qui représentent la plupart du rayonnement cosmique mesurable au niveau de la mer. Ils appartiennent

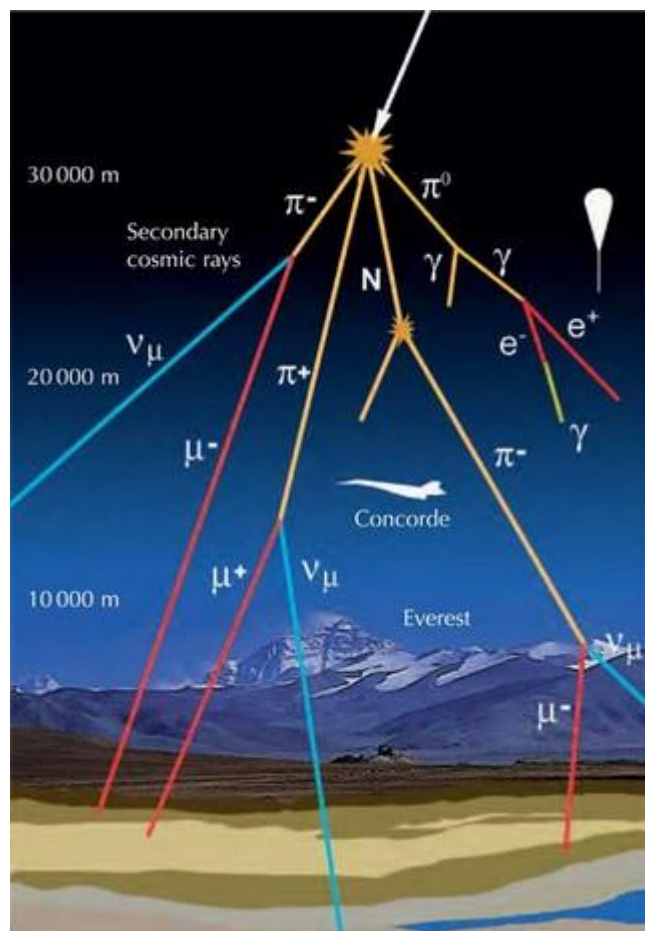


Figure 1

Illustration de la gerbe atmosphérique

² Pourcentage provenant de <https://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/univers-rayon-cosmique-2446/>

à la famille des leptons et ils ont les mêmes propriétés physiques que l'électron, mis à part sa masse, 207 fois plus grande ($105 \text{ MeV}/c^2$), et une durée de vie très faible ($2,2 \mu\text{s}$). Observons à présent les particules secondaires qui sont émises lors de l'interaction des différentes particules primaires avec les atomes de notre atmosphère :

❖ Protons et noyaux :

Les protons et noyaux, donc 99% des rayons cosmiques forment par interaction forte des mésons (essentiellement des pions : π^0 , π^+ , π^-). Les mésons sont la partie dite hadronique des gerbes. Les mésons ayant beaucoup d'énergie forment des mésons moins énergétiques à cause des collisions avec les molécules. Les mésons moins énergétiques se désintègrent :

- Les pions neutres forment eux presque immédiatement (10^{-16}s) deux photons. Ceux-ci contribuent la partie dite électromagnétique de la gerbe.
- Les pions positifs et négatifs se désintègrent pour leur part en muons et neutrinos par les réactions :
 - $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu$
 - $\pi^- \rightarrow \mu^- + \nu$

Les pions chargés ont de leur côté une durée de vie légèrement plus longue ($2,6 \cdot 10^{-8}$)

❖ Electrons, positrons et photons :

Les électrons et positrons perdent de l'énergie par le rayonnement de freinage, ils constituent la partie électromagnétique du rayonnement et peuvent aussi bien provenir du rayonnement primaire que secondaire. Les photons de leur côté formeront des paires électrons-positrons. La partie électromagnétique du rayonnement interagit avec l'azote dans notre atmosphère, celui-ci devient alors fluorescent. On remarque donc que les rayons cosmiques ionisent l'atmosphère.

5.2 Les interactions dominantes

Les rayons cosmiques et les particules secondaires sont surtout touchés par certaine interaction bien précise. Dans ce chapitre sont expliquées les interactions les plus importantes.

5.2.1 Rayonnement de freinage (Bremstrahlung)

Comme dit ci-dessus certaines particules perdent leur énergie par rayonnement de freinage en entrant dans notre atmosphère. Ce phénomène s'applique à toutes les particules porteuses de charges qui ont une vitesse proche de celle de la lumière. Les électrons et les positrons sont très

concernés par ce phénomène dû à leur faible masse. Pour les muons étant beaucoup plus massifs cet effet est négligeable.

Le rayonnement de freinage est dû au champ électrique créé par les atomes composant notre atmosphère. Lorsque des particules chargées traversent ce champ elles interagissent avec celui-ci et sont ralenties et déviées. Lorsqu'une particule est ralentie ou que sa trajectoire varie elle émet un rayonnement, dans notre cas ce rayonnement est composé de photons dont le spectre d'énergie est quasiment continu. Ce photon peut alors se désintégrer de nouveau en une paire électron-positrons.

5.2.2 Ionisations

Lorsque l'énergie cinétique est trop faible pour initier les processus radiatifs, les muons interagissent par diffusion élastique avec les électrons du cortège, leur cédant une petite quantité d'énergie, néanmoins suffisante pour les délier du noyau.

La matière, le long du parcours du muon, se retrouve ionisée. La quantité d'énergie transmise par ionisation est caractérisée par la formule de Bethe-Bloch³.

5.2.3 Créations de paires

Cet effet consiste en la création de paires électrons/positrons et s'applique surtout aux muons ayant plus de 1 TeV. La création de cette paire se fait par l'échange d'un photon virtuel avec un noyau de l'atmosphère. La paire contribue alors à la cascade électromagnétique.

5.2.4 Interactions nucléaires

Il s'agit de la contribution la plus modeste. C'est une interaction rare sur les noyaux du milieu via un photon virtuel, mais lorsqu'elle se produit, la perte d'énergie est importante. Si bien qu'aux alentours de 1 TeV, elle contribue à hauteur d'environ 10% à la perte d'énergie totale dans la roche.

Les neutrons aussi contribuent (au niveau de la mer) avec leur faible énergie, ils dérivent de l'évaporation des noyaux très excités.

De l'autre côté, les neutrons avec haute énergie, dérivent par la collision (ou échange de charge électrique) avec les protons.

En effet, quand une astroparticule se déplace à travers la Terre, la plupart du temps elle interagit avec les atomes/molécules dans l'atmosphère. L'intensité peut varier aussi à cause des divers phénomènes atmosphériques.

³ Formule décrivant la perte d'énergie de particules chargées rapides

5.3 L'atmosphère terrestre

Pour commencer il est important de connaître la structure et les propriétés de notre atmosphère pour mieux comprendre les interactions de celle-ci avec les rayons cosmiques.

Ce qu'on appelle atmosphère est le mélange de gaz qui enveloppe la Terre, elle est composée d'azote (78,09%), de dioxygène (20,95%), d'Argon (0,93%), de dioxyde de carbone (0,035%) et de nombreux autres gaz⁴. La concentration de ces gaz est relativement constante dans notre atmosphère. Le seul gaz dont la concentration est très variable et qui joue un rôle important dans notre atmosphère est la vapeur d'eau. Une autre particularité de l'eau dans l'atmosphère est qu'elle peut aussi bien s'y trouver sous forme gazeuse que sous forme liquide ou solide.

5.3.1 Les différentes couches de l'atmosphère et leurs propriétés

Notre atmosphère a une épaisseur fluctuante qui varie de 350km à 800km. Notre atmosphère a des propriétés très différentes en fonction de la hauteur où on se trouve.

La première couche s'appelle troposphère, c'est la couche où nous vivons, elle s'étend jusqu'à une dizaine de kilomètres de hauteur. Sa limite nommée tropopause varie en fonction de la latitude, de 8 km au pôle en hiver à 16 km au niveau de l'équateur. La température a une décroissance moyenne en fonction de la hauteur, cette décroissance est d'environ 0,65°C par 100m. La troposphère est la couche où se passe la plupart des phénomènes météorologiques, car c'est celle-ci qui contient une grande partie de l'eau qui est dans l'atmosphère et constitue environ 75%⁵ de la masse de l'atmosphère. La troposphère contient également du gaz carbonique (CO₂) qui est répandu de manière uniforme dans la troposphère et la stratosphère. Le gaz carbonique a une durée de vie assez longue (plusieurs siècles), ce qui est dû au fait qu'il ne réagit que peu avec les autres gaz. Malgré sa mauvaise réputation il est l'un des gaz le plus étroitement liée à la vie sur Terre, car il permet la croissance des plantes. Il doit sa mauvaise réputation à l'effet de serre qu'il provoque et au fait qu'une grande partie de ce gaz est dû à l'activité humaine. Dans la troposphère se retrouve également la plupart des aérosols qui résident dans celle-ci pendant environ 1 semaine et sont généralement ramenés au sol dû à des précipitations. Les aérosols ne sont pas toujours répandus de manière égale à cause de l'activité humaine mais le fait qu'il y ait de nombreux mouvements (verticaux et horizontaux) fait que les aérosols sont très mobiles et peuvent être transportés très rapidement.

⁴ Pourcentage provenant de <http://education.meteofrance.fr/dossiers-thematiques/le-fonctionnement-de-l-atmosphere/la-composition-de-l-atmosphere/la-structure-de-latmosphere> b

⁵ Pourcentage provenant de <https://www.emse.fr/~bouchardon/enseignement/processus-naturels/up1/web/la-terre-est-ronde/terre-ronde-geodynamique-0502-atmosphere-troposphere-effet-de-serre.htm>

La deuxième couche est nommée la stratosphère, cette couche s'étend jusqu'à environ 50km au-dessus de la surface de la Terre. La température de la stratosphère est croissante avec la hauteur. Au début elle ne croit que lentement mais avec l'altitude cette croissance devient plus nette. La température moyenne de la stratosphère est de 0°C.

La troisième couche est la mésosphère, celle-ci s'étend jusqu'à 80km au-dessus de la surface de la Terre, la température y chute de nouveau brusquement. Les températures à la mésopause sont comprises entre -50°C et -120°C et on a une pression de 1hPa.

La quatrième couche de notre atmosphère est la thermosphère, la température y augmente rapidement, la température à ces hauteurs n'a plus vraiment de sens car les particules de gaz s'y font très rares. Elle s'étend de 85 km à 600km au-dessus de la surface terrestre.

Au-dessus de la thermosphère on retrouve l'ionosphère terrestre, celle-ci est caractérisée par la présence de particules chargées qui sont provoqués par le vent solaire.

Les variations de température dans les différentes couches sont dues aux mélanges de gaz qui les composent. Ces différents mélanges ont des capacités différentes d'absorber des rayonnements ce qui fait qu'elles chauffent plus ou moins.

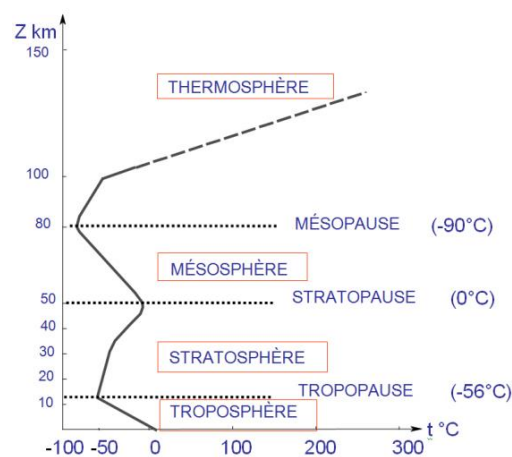


Figure 2

Graphique représentant l'évolution de la température en fonction de la hauteur dans l'atmosphère terrestre

5.3.2 Composition de l'atmosphère

En haute atmosphère (Mésopause à thermosphère) la composition de l'atmosphère est environ constante. Par contre plus bas la composition est relativement variable. Les aérosols, la vapeur d'eau et le dioxyde de carbone ont des taux très variables.

5.3.2.1 Composition air sec

La composition de l'atmosphère varie beaucoup en fonction de la hauteur, la vapeur d'eau par exemple se retrouve surtout dans la troposphère, alors que l'ozone se retrouve pour sa part principalement dans la stratosphère. Par contre il est plus difficile de déterminer la répartition des gaz émis par l'activité humaine ou des phénomènes naturels. Leur répartition dépend alors surtout de leur durée de vie. Le méthane ayant une durée de vie assez longue (une dizaine d'année) est assez bien réparti dans la troposphère mais sa répartition dans la stratosphère varie beaucoup. Le CO₂ pour sa part est assez bien réparti. Les gaz ayant une durée de vie plus courte se retrouvent au voisinage de leur origine.

Composé	Formule chimique	Quantité en %
Azote	N ₂	78,8
Oxygène	O ₂	20,95
Argon	Ar	0,93
Neon	Ne	1,8*10 ⁻³
Helium	He	5*10 ⁻⁴
Hydrogène	H ₂	6*10 ⁻⁴
Xenon	Xe	9*10 ⁻⁶

5.3.2.2 Autres composés de l'air

Composé	Formule chimique	Quantité en %
Vapeur d'eau	H ₂ O	0 à 4
Dioxyde de carbone	CO ₂	0,036
Méthane	CH ₄	1,7*10 ⁻⁴
Monoxyde d'azote	N ₂ O	3*10 ⁻⁷
Ozone	O ₃	4*10 ⁻⁶
Poussière		10 ⁻⁶
Chlorofluorocarbone		10 ⁻⁸

5.3.3 Qu'est-ce qui influence la température dans l'atmosphère

Pour savoir quels influences les rayons cosmiques ont sur notre climat, il faut d'abord savoir ce qui influence notre climat, quels facteurs de l'atmosphère fait qu'il fait plus chaud, plus froid, ...

En plus de ça, il faut savoir si les rayons cosmiques peuvent influencer ces facteurs. Le taux de gaz à effet de serre émis dans l'atmosphère par l'humain ne peut par exemple pas être influencé par les rayons cosmiques, bien qu'ils aient un rôle majeur ce ne sont pas les seuls à avoir une influence sur notre climat, contrairement à ce que les gens ont l'air de penser.

5.3.3.1 Les aérosols

Les aérosols sont des petites particules qui sont en suspension dans l'atmosphère. Leur taille est très variable, de 0.002 μm à environ 100 μm de diamètre⁶. On différencie deux types d'aérosols, les aérosols primaire et secondaire. Les aérosols primaires qui proviennent de la surface terrestre et ont été mis en suspension par le vent et les aérosols secondaires provenant de réaction chimique avec les molécules d'air. Les aérosols secondaires se forment généralement à partir de gaz qui s'assemblent pour former un agrégat. De nombreux gaz n'ont pas les bonnes propriétés pour ceci mais le H_2SO_4 est l'un des principaux gaz permettant la nucléation dans notre atmosphère.

Les aérosols ont une durée de vie d'environ 15 jours et on les retrouve dans la basse troposphère (0-5km), sauf dans le cas d'éruption volcanique où on les retrouve dans la stratosphère.

5.3.3.1.1 Effet direct des aérosols

Les aérosols ont eux-mêmes un effet sur le climat. Ceci est dû au fait qu'ils diffusent le rayonnement. Cette diffusion est basse pour les grandes longueurs d'ondes des rayons réfléchi par la surface terrestre, par contre les rayonnements solaires sont affectés par cet effet.

Les aérosols peuvent également absorber les rayonnements. Ces absorptions et diffusions dépendent bien sûr de la composition chimique, de la masse, de la surface exposée, ...

Leur efficacité de diffusion dépend surtout de leur surface exposée au soleil. Ce qui a pour conséquence que la diffusion est plus grande quand il y a beaucoup de petit aérosols, qu'un grand, pour une même masse d'aérosols. Ce sont donc les particules secondaires qui font le plus d'ombres sur terre vu qu'elles sont les plus petites.

Par contre il est extrêmement difficile de savoir exactement combien cet effet influence vraiment notre climat, car pas tous les aérosols sont sphériques, et leur forme est essentielle pour le calcul.

⁶ Chiffres provenant de <https://www.futura-sciences.com/planete/dossiers/climatologie-tant-incertitudes-previsions-climatiques-638/page/3/>

On peut donc conclure qu'on ne peut qu'estimer l'influence de cet effet sur la température.

5.3.3.1.2 Effets semi directs des aérosols

Les aérosols ne diffusent pas parfaitement les rayons, ils en absorbent donc une partie. S'ils se trouvent au-dessus d'une surface qui absorbe beaucoup les rayons, ils ont un effet réfléchissant, par contre s'ils se trouvent au-dessus d'une surface qui réfléchit beaucoup la lumière leur effet est faible ou bien même négatif.

Les aérosols qui absorbent le plus de rayonnement sont ceux qui contiennent beaucoup de suie, ce qui est le cas lors de combustion incomplète. Il faut savoir que ces combustions sont généralement causées par les humains.

Mais le fait que les aérosols absorbent les rayonnements a encore une autre conséquence qui est bien plus puissante. Cette conséquence est que la couche de l'atmosphère où ces aérosols sont présents se réchauffe ce qui provoque la disparition des nuages ou limite leur extension. Les nuages reflètent beaucoup les rayonnements et sans eux la température augmente.

L'augmentation de la température due à cet effet est actuellement impossible à estimer et ne peut que très difficilement être tenue en compte dans les simulations et les prévisions à cause des nombreuses conditions qu'il faudrait connaître.

5.3.3.1.3 Effets indirects des aérosols

Les noyaux de condensation autour desquelles de l'eau se condense pour former des nuages sont effectivement des aérosols. Les nuages ont un albédo très élevé ce qui fait qu'ils reflètent beaucoup les rayonnements et ne les absorbent que très peu. Ils ont donc un effet sur la température.

L'efficacité des aérosols en tant que noyau de condensation dépend de leur composition chimique. Mais on sait que pour un maximum d'effet il vaut mieux avoir plus de petits aérosols que d'avoir quelque gros pour un même volume. Ceci est dû au fait que la réflexion dépend de la surface exposée au rayonnement et deux petites sphères ont une plus grande surface qu'une grande de même volume.

On peut observer que sur Terre dans les régions où se trouvent beaucoup d'aérosols ils sont plus petits que là où il y en a peu. On peut observer ça dans le cas des nuages des régions plus continentales et celles des régions maritimes ou dans le cas de l'hémisphère sud et de l'hémisphère nord qui est nettement plus polluée.

Par contre il est très difficile de quantifier cet effet mais ce qui est sûr c'est qu'il s'agit d'un forçage négatif.

5.3.3.2 Les Nuages

On sait depuis longtemps que les nuages ont une influence sur notre climat, et malgré le fait qu'on soit confronté avec eux presque tous les jours on ne sait pas encore tout sur ceux-ci. L'influence des nuages sur notre climat n'est toujours pas tout à fait connue, mais on sait déjà beaucoup plus qu'il y a 10 ans, grâce à plusieurs satellites qui tournent autour de la Terre depuis plusieurs années.

Les nuages peuvent effectivement avoir plusieurs effets en fonction de leurs types, ils peuvent aussi bien absorber les rayons du soleil que les refléter. En plus, ils ont également un effet sur les rayons infrarouges que la Terre émet. Ces actions que les différentes sortes de nuages peuvent avoir s'appellent rétroactions.

5.3.3.2.1 Formation de nuages

Pour comprendre le lien entre les nuages et les rayons cosmiques il faut commencer par voir comment se forment les nuages. La plupart des nuages se forment dans la troposphère, mais certains se forment également dans la stratosphère ou dans la mésosphère.

Comme vous le savez, les nuages sont composés d'eau, cette eau qui était déjà précédemment présente dans l'air mais invisible pour l'œil humain, forme soudainement un nuage visible.

Ce phénomène est dû à la condensation, ou congélation de la vapeur d'eau à une certaine altitude. Cette condensation, ou congélation, a lieu car la masse d'air, qui contient de la vapeur d'eau gagne en altitude et refroidit. En refroidissant la masse d'air ne peut plus contenir autant de vapeur d'eau, elle est alors sursaturée. C'est à ce moment-là que la vapeur d'eau se condense sur les noyaux de condensations. Ces noyaux de condensation sont des fines particules solides ou liquides, en suspension dans

l'atmosphère, autour desquelles la vapeur d'eau condensé s'accumule mais il peut également s'agir de polluants

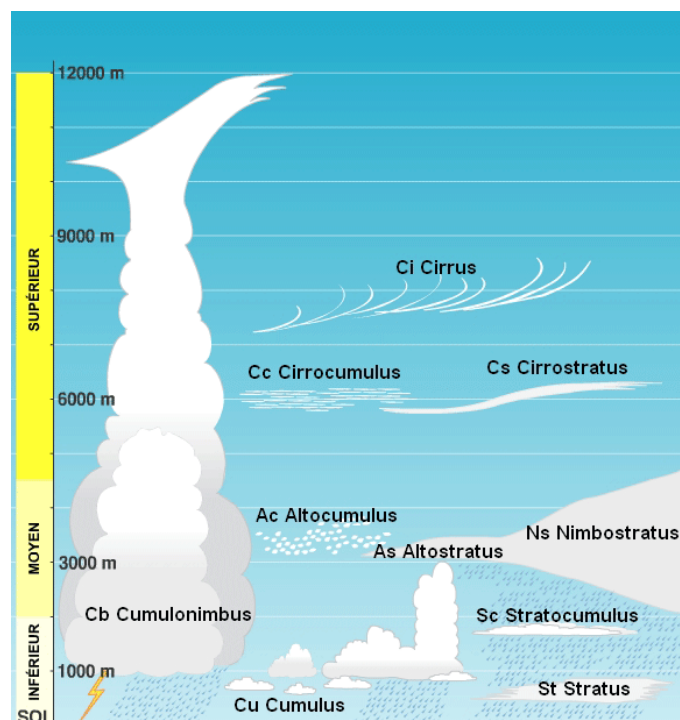


Figure 3

Schéma illustrant les nuages présents aux différentes hauteurs dans l'atmosphère

atmosphériques. Une fois que ce noyau est couvert d'assez de molécules il devient visible et tombe sous forme de pluie.

5.3.3.2.2 Les rétroactions des différents nuages

Les nuages ont deux rétroactions, le fait que les nuages diffusent une grande partie du rayonnement solaire, la deuxième est le fait que les nuages isolent la surface de la terre, la surface de la Terre et la couche inférieure de son atmosphère refroidit donc moins. Les deux effets pourraient se compenser, mais ce n'est pas le cas car les deux effets sont dus à différents types de nuages, en plus l'ampleur de l'effet albédo dépend également de l'albédo de la surface de la Terre, car si de toute manière la terre reflète une grande partie du rayonnement (par exemple quand il y a de la neige), les nuages reflètent le rayonnement qui serait de toute manière reflété par la surface terrestre elle-même.

Quand on parle des rétroactions des différents nuages on parle de deux types de nuages, les nuages hauts et les nuages bas.

5.3.3.2.2.1 Rétroactions des nuages bas et moyens

Les nuages bas sont les nuages se trouvant jusqu'à 2 à 3 kilomètres d'altitude, ce sont surtout des stratus et cumulus. Les nuages bas représentent actuellement environ 40% des nuages dans notre atmosphère. Ces nuages reflètent les rayonnements du soleil vers l'espace sans qu'ils arrivent à la surface de la Terre et soient absorbés par celle-ci. Cet effet est appelé effet parasol, il est très important car il permet de réguler la température sur Terre. Les prévisions climatiques dépendent en grande partie de comment les nuages bas vont évoluer. S'ils diminuent la Terre risque de se réchauffer alors que s'ils augmentent il y a des chances que la température n'augmente que de peu. L'effet des nuages dépend également du nombre d'aérosols qu'ils contiennent (concentration), ce qui influence également leur durée de vie. Effectivement si la concentration d'aérosols est plus élevée dans un nuage il reflète plus.



Figure 4

Photo de cumulus



Figure 5

Photo de stratocumulus

5.3.3.2.2 *Rétroactions des nuages hauts*

Les nuages hauts (comme les cirrus par exemple) à l'inverse des nuages bas sont assez transparents aux rayons solaires. Ils ont par contre un important effet de serre. Ils sont composés de petits cristaux de glace et leurs températures peuvent être relativement basse (-60°C à -70°C) ce qui les différencie des nuages bas et est partiellement responsable pour leur effet de serre. Le fait qu'ils soient très mince et peu opaques fait qu'ils n'ont quasiment aucun effet sur les rayons du soleil entrant dans notre atmosphère.



Figure 4

Photo d'un cirrus

5.4 Quels facteurs météorologiques influencent les rayons cosmiques

Dans le cadre de l'entreprise d'Astronomie j'ai pu faire des recherches avec le détecteur AMD5 et AMD13 que je vais présenter dans ce chapitre. Dans ce chapitre je vais également présenter les résultats de plusieurs recherches et expériences en lien avec les rayons cosmiques et leurs interactions avec l'atmosphère.

5.4.1 Les détecteurs

5.4.1.1 Projet ADA

Le projet ADA (Astroparticle Detectors Array) est un projet qui consiste à concevoir un réseau de détecteurs qui s'étend sur tout le territoire Italien, au sud de la Suisse et au centre de Luxembourg. Ces détecteurs permettent de mesurer le flux de muons créé par les rayons cosmiques. En plus de permettre d'accumuler de nombreuses données et de potentiellement mesurer des rayons cosmiques à très haute énergie et d'autres phénomènes astronomiques particuliers les détecteurs sont très simples à utiliser et donc accessible a un grand public. Ainsi ces détecteurs sont accessibles et utilisés par de nombreuses écoles car ceux-ci permettent de se rapprocher de l'astrophysique et de la physique des particules de manière équilibrée entre la pratique et la théorie.

5.4.1.2 AMD5

L'AMD5 est un télescope à particules cosmiques qui a été conçu spécialement pour être utilisé dans des infrastructures non professionnelles mais quand même intéressées dans le domaine de l'astrophysique et la physique des particules.

Ce détecteur est principalement composé de deux tubes détecteurs Geiger-Müller, d'un système d'amplification du signal et d'un système de comptage des impulsions. Ces deux tubes sont des cylindres remplis d'un mélange de gaz (néon, argon et brome), ils font 10,8 cm de longueur et ont 1 cm de diamètre. Les deux tubes sont disposés sur la même verticale et sont espacé de 6 cm. Pour ne pas mesurer les muons cosmiques des expositions telluriques (radioactivité) et du bruit électrique et seulement prendre en compte les muons provenant d'une désintégration d'un rayon cosmique, seul les particules ayant assez d'énergie pour traverser les deux GMT sont comptabilisées. Cette méthode s'appelle la méthode de coïncidence. Bien sûr une particule ne peut pas traverser les deux GMT en même temps on a donc pas tout à fait la notion de simultanéité mais presque. Le détecteur AMD5 est configuré de manière à ce qu'on puisse utiliser deux fenêtres temporelles, une de 60ms et une de 190µs.

Cette méthode permet d'éliminer efficacement le bruit électrique et le bruit de fond de la radioactivité environnante car la probabilité que deux particules ionisent les deux GMT en même temps est très faible et seule une particule cosmique à assez d'énergie pour ioniser les deux tubes.

Ce genre de détecteur scalaire a pour inconvénient qu'on ne peut pas discerner la direction d'incidence de la particule qui induit un signal électrique. Au-delà de déterminer la direction d'origine de la particule

5.4.1.3 AMD13

L'AMD13 est un télescope à particules cosmiques, portable, qui a été conçu spécialement pour être utilisé dans les recherches « outdoor ». Il est constitué de deux tubes détecteurs Geiger-Müller, d'un système d'amplification du signal, d'un système de comptage des impulsions et d'une batterie avec une autonomie d'environ 5 heures. Ces deux tubes sont des cylindres remplis d'un mélange de gaz (néon, argon et brome), ils font 22 cm de longueur et ont 2 cm de diamètre. Le détecteur AMD13 est configuré de manière à ce qu'on puisse utiliser deux fenêtres temporelles, une de 2 ms et une de 0.2 ms. Cela signifie qu'il est particulièrement efficace dans des endroits où il y a une forte exposition tellurique (par exemple, grottes ou mines).

5.4.2 Blackett effet

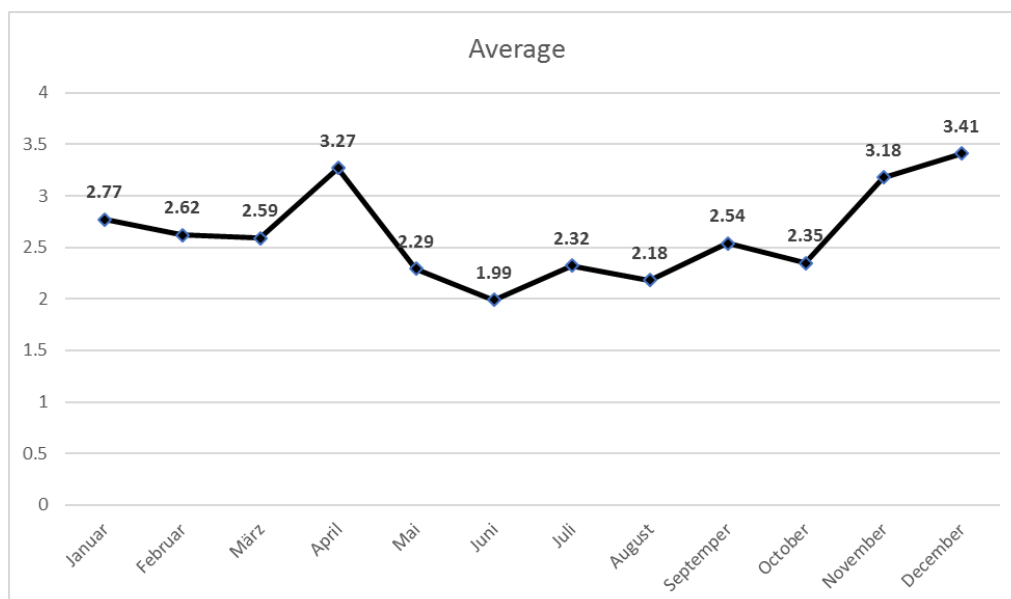
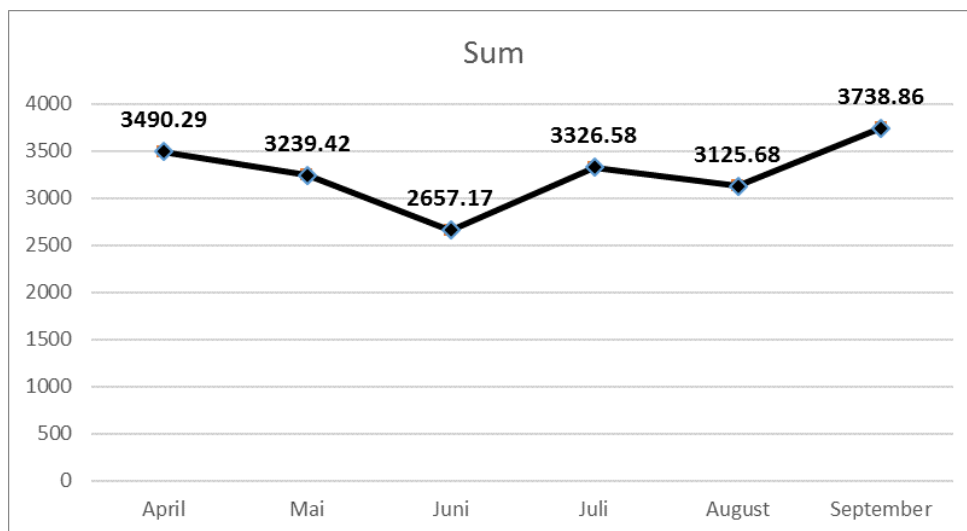
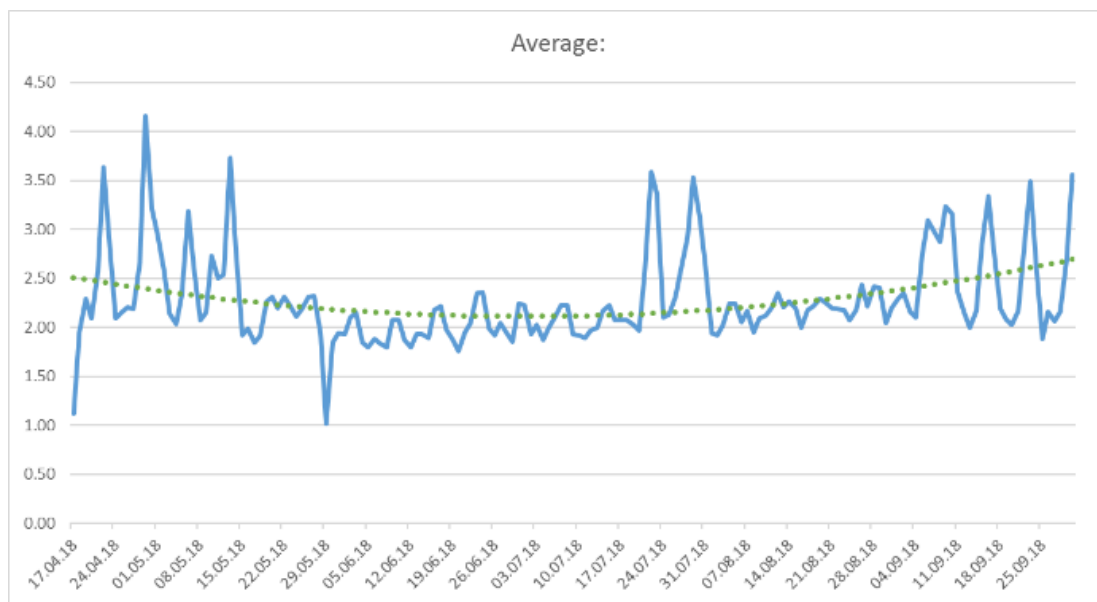
5.4.2.1 Introduction

Quand les rayons cosmiques primaires, essentiellement des protons, entrent en collision avec les molécules de la haute atmosphère, ils créent une cascade de plus de 10 milliards de particules secondaires, appelée gerbe atmosphérique et qui peut s'étendre sur plus de 40 km² quand elle arrive au sol. Parmi ces particules subatomiques secondaires, on trouve des protons, neutrons, pions, kaons, photons, électrons et positrons. Par la désagrégation des pions et des kaons, ils se produisent des muons, qui représentent la plupart du rayonnement cosmique mesurable au niveau de la mer. Ils appartiennent à la famille des leptons et ils ont les mêmes propriétés physiques que l'électron, mis à part sa masse, 207 fois plus grande (105 MeV/c²), et une durée de vie très faible (2,2 μ s). Cependant, les muons ont une grande énergie, ainsi l'effet de dilatation temporelle décrite par la relativité restreinte, leur permet d'atteindre la surface de la Terre.

L'ionisation se produit lorsque l'énergie cinétique d'un muon n'est pas assez élevée pour déclencher des processus radioactifs. Alors les muons interagissent avec les électrons des atomes environnants, perdant une énergie minimale, mais suffisante pour libérer un électron de son noyau. En raison de ce processus, la matière le long de la trajectoire du muon est ionisée et le muon perd de l'énergie de manière continue. L'effet de la température sur les muons est définitivement causé par leur

interaction avec les noyaux atomiques présents dans l'atmosphère. L'effet de la température influence les processus de création et de désintégration des muons dans l'atmosphère. Généralement, l'effet de la température est décrit en deux parties : positive et négative. L'effet positif est lié à l'influence de la température sur la désintégration des pions, principale source de muons dans le processus en cascade de rayons cosmiques. Plus la température est élevée, plus l'absorption du pion atmosphérique est faible, ce qui implique un taux de génération de muons supérieur. À son tour, l'effet négatif est associé aux modifications du trajet moyen du muon dans l'atmosphère. On s'attend à ce que la plupart des muons soient générés à une altitude supérieure en été en raison de l'expansion de l'atmosphère se produisant pendant cette période. Ainsi, ils ont un chemin plus long à franchir avant d'atteindre le sol, ce qui permet à un plus grand nombre d'entre eux de se désintégrer, ce qui entraîne une diminution de leur intensité à la surface. Étant donné que les muons à basse énergie ont une probabilité plus élevée de décroissance, un léger changement dans leurs trajectoires liées à l'effet de la température peut être facilement constaté lorsque nous surveillons leur intensité au sol. Par ailleurs, de petites modifications du trajet des muons à haute énergie ne sont pas simples à observer en raison de leur probabilité de décroissance plus faible. Patrick Blackett, physicien expérimental britannique connu pour ses travaux sur les chambres à nuages et les rayons cosmiques, a compris que la dépendance à la pression atmosphérique (et donc, comme déjà mentionné, à la température) est déterminante. Il a constaté que les muons se forment lorsque la pression atmosphérique a une valeur d'environ 100 mbar, ce qui peut être défini comme une couche atmosphérique dont la hauteur est déterminée par la température. Tout cela nous amène à conclure que le flux de muons à la surface de la Terre diminue de manière significative en été, car la couche de 100 mbar se trouve à une altitude plus élevée, ce qui allonge le trajet des muons qui arrivent. Avec cela, nous allons essayer de prouver cet effet avec des mesures effectuées en continu pendant les mois d'été.

5.4.2.2 Mesures :



5.4.2.3 Conclusion et résultat de l'étude

Dans le premier graphique, la ligne bleue indique la moyenne des muons entrants par minute entre le 17 avril et le 30 septembre. La ligne pointillée en orange est une approximation polynomiale du second ordre des moyennes quotidiennes. Comme prévu par l'effet Blackett, la valeur des moyennes journalières chute au cours des mois de juin, juillet et août. Même si des pics inhabituels se sont produits à la fin du mois de juillet, la ligne de tendance montre clairement que l'effet Blackett est en réalité un événement réel.

Dans le deuxième graphique, la moyenne des sommes quotidiennes est indiquée par mois. Ici aussi, vous pouvez voir une diminution des muons détectés pendant les mois d'été, avant de remonter à l'automne, comme le prévoit l'effet Blackett.

Le dernier graphique montre la moyenne des moyennes quotidiennes par mois pendant toute l'année 2018. Une fois encore, vous pouvez voir que les moyennes baissent pendant les mois d'été. Ces données ne peuvent pas être considérées comme parfaitement exactes du fait que nous avons effectué diverses expériences tout au long de l'année. Cependant, le graphique vous donne un bon aperçu des muons mesurés.

5.4.3 Effet thermique

5.4.3.1 Introduction

Les interactions avec les molécules de l'air, dans les couches de la basse stratosphère et troposphère, sont assez complexes et pas complètement décryptées. En effet, il y a plusieurs facteurs qui peuvent influencer l'intensité du flux de muons. Parmi ces facteurs il y a certains paramètres atmosphériques comme la température et la pression qui jouent un rôle important dans les processus de désagrégation des pions et des muons. Selon leur variation, la masse volumique de l'air peut changer, ainsi l'intensité du flux de muons aussi. Une hausse en masse volumique veut dire une majeure probabilité d'interaction avec les molécules de l'atmosphère et ça implique une perte d'énergie plus importante. Par exemple, la pression atmosphérique est inversement corrélée à l'intensité du flux des muons. La corrélation avec la température montre une tendance similaire, en manière particulière avec les muons à basse énergie (< 10 GeV).

Cette dépendance concerne surtout la masse volumique de la basse stratosphère, qui est indirectement liée aux variations saisonnières de température. En effet, les pions, principales sources des muons cosmiques, se désagrègent en stratosphère à la hauteur où la pression atteint une valeur entre 100 et 250 hPa. Si la température de l'air augmente, l'atmosphère s'étend et les pions se désagrègent plus en hauteur. Pour les muons ça veut dire parcourir une distance importante, ainsi la probabilité de désagrégation augmente aussi.

Cependant, plusieurs études ont confirmé une relation non négligeable entre le flux de muons et les variations, en masse volumique, de la troposphère. Dans ce cas, les fluctuations de certains paramètres sont plus fréquentes et à court terme.

Le but de cette étude est d'analyser la relation entre l'intensité du flux de muons et les variations significatives de température mesurés au long d'une journée. Nous avons focalisé notre attention sur le flux de muons mesuré dans les heures chaudes et froides d'une même journée durant laquelle on a constaté une amplitude thermique d'au moins 15°C. Pour mieux étudier le phénomène nous avons utilisé comme référence des journées avec des conditions météorologiques stables dans la même période. Les conditions météorologiques lors desquels nous avons fait ces mesures sont assez exceptionnelles et rares. Il faut tenir compte que le Luxembourg n'a pas un climat parfaitement défini : il oscille entre le climat océanique de la zone atlantique (écarts saisonniers faibles, hivers doux et pluvieux) et le climat continental des plaines de l'Europe orientale (écarts saisonniers marqués, hivers rudes et étés pluvieux). L'influence océanique amène des précipitations en toute saison et l'influence continentale amène un froid piquant et sec l'hiver. De mai à la mi-octobre, le climat est tempéré. Alors que juillet et août sont les mois les plus chauds, mai et juin les plus

ensoleillés. En septembre et octobre, le Luxembourg connaît souvent son propre « été indien ». Par conséquent, les mois qui présentent souvent des journées à grande amplitude thermique sont avril et septembre, idéales pour notre étude. Durant le mois d'avril on passe lentement du climat océanique au climat tempéré. Ce processus amène à avoir parfois des nuits très froides et des jours très ensoleillés avec de températures qui peuvent parfois dépasser les 20°C. Le mois de septembre est le début de ce que souvent résulte être l'été indien de Luxembourg, ça veut dire une période de temps ensoleillé et radouci, après les premières gelées de l'automne entrant, surtout dans la deuxième partie du mois. En effet, c'est dans ces deux mois que nous avons pu observer des différences de température de plus de 20°C en seulement 24 heures. Pourtant lors la même semaine nous avons également analysé des journées lors desquels les variations de température étaient de moins de 5°C. On s'attendait à avoir une variation significative dans l'intensité du flux de muons mesuré durant les phases « chaudes » et « froides » des journées à grande variation thermique.

5.4.3.2 Mesures :

Nous avons choisi la fenêtre temporelle entre 00h00 et 06h00 pour les heures froides et celle entre 12h00 et 18h00 pour les heures chaudes. Durant le mois d'avril on avait individué les dates suivantes en tant que journées à grand amplitude thermique : 18.04.18.

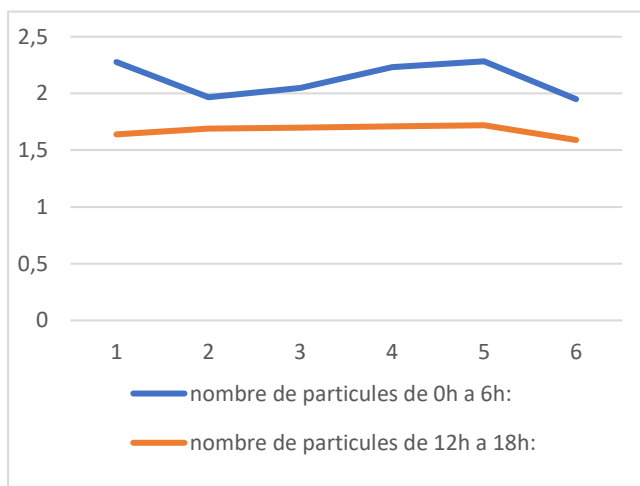
Pour comparer les données on a choisi les dates suivantes comme journées à très faible amplitude thermique : 13.05.18 et 30.04.2018

5.4.3.2.1 Mesures lors de jours à température constante :

Septembre : • 13.09.18

Heures	temperature	average/min
0	15,3	2,275862
1	14,8	1,966667
2	14,5	2,05
3	14,4	2,233333
4	14,2	2,283333
5	14,1	1,95
6	14,2	1,85
7	14,4	2,383333
8	14,7	2,166667
9	15,2	2,166667
10	15,6	1,881356
11	15,7	2,283333
12	16,4	1,766667
13	16,9	1,87
14	17	1,966667
15	17,1	1,866667
16	17,2	1,7
17	15,9	2,135593
18	15,3	1,9
19	14,9	1,65
20	14,8	1,915254
21	14,7	1,883333
22	14,5	1,733333
23	14	2,116667

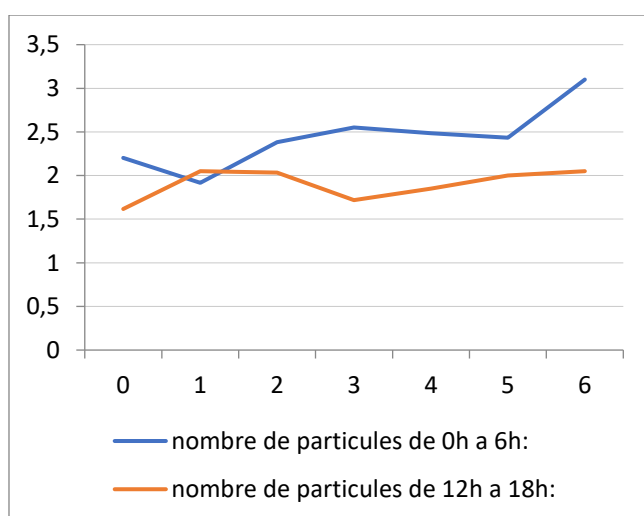
nombre de particules de 0h à 6h:	761
nombre de particules de 12h à 18h:	790
différence entre les deux:	29



- 21.09.18

Heures	temperature	average/min
0	11,3	2,20339
1	11,1	1,916667
2	11,2	2,383333
3	11,4	2,55
4	12,9	2,483333
5	15,7	2,433333
6	16,4	3,1
7	18,3	2,65
8	18,5	2
9	18,1	2,4
10	17	2,474576
11	15,1	1,8
12	11,5	1,616667
13	13	2,05
14	15	2,032787
15	16,2	1,716667
16	15,8	1,85
17	15,1	2
18	14,2	2,05
19	12,8	1,783333
20	11	2
21	10,5	2,433333
22	10,7	2,05
23	9,6	2,066667

nombre de particules de 0h à 6h:	834
nombre de particules de 12h à 18h:	798
différence entre les deux:	36

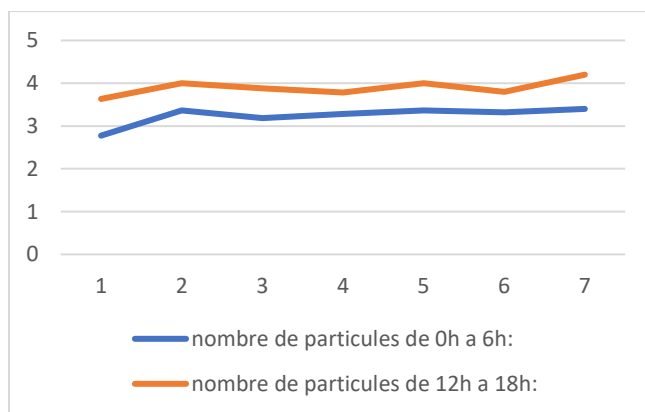


Avril & Mai :

- 13.05.18

heure	temperature	average/min
0	13,9	2,775862
1	14,2	3,366667
2	13,4	3,183333
3	13	3,283333
4	12,9	3,366667
5	12,9	3,316667
6	13	3,4
7	12,7	3,766667
8	12,2	3,483333
9	12,2	3,616667
10	13,1	3,694915
11	12,7	3,616667
12	12,4	3,633333
13	12,7	4,00
14	13,3	3,883333
15	13,1	3,783333
16	12,3	4
17	12,3	3,79661
18	12,3	4,2
19	12,3	4,45
20	12,1	4,220339
21	12,3	3,9
22	12,4	4,6
23	12,4	4,166667

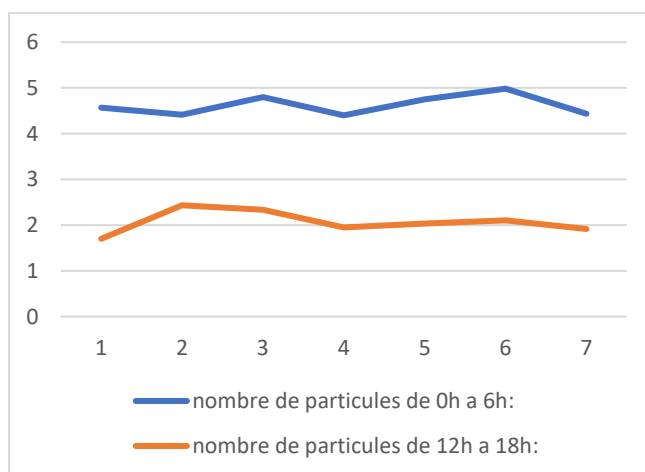
nombre de particules de 0h à 6h:	1152
nombre de particules de 12h à 18h:	1385
différence entre les deux	233



- 30.04.18

heure	temperature	average/min
0	12,5	4,568966
1	11,9	4,416667
2	11,4	4,8
3	10,9	4,4
4	10	4,75
5	9,5	4,983333
6	9,3	4,433333
7	9,1	4,883333
8	9,3	4,6
9	10,3	4,2
10	10,4	2,983051
11	10,6	2,6
12	11,1	1,7
13	9,3	2,43
14	9,4	2,333333
15	9,8	1,95
16	9,3	2,033333
17	8,9	2,101695
18	7,6	1,916667
19	6,5	2,083333
20	6,4	1,881356
21	6	2,25
22	5,5	2
23	5,1	2,733333

nombre de particules de 0h à 6h:	1666
nombre de particules de 12h à 18h:	754
différence entre les deux	912

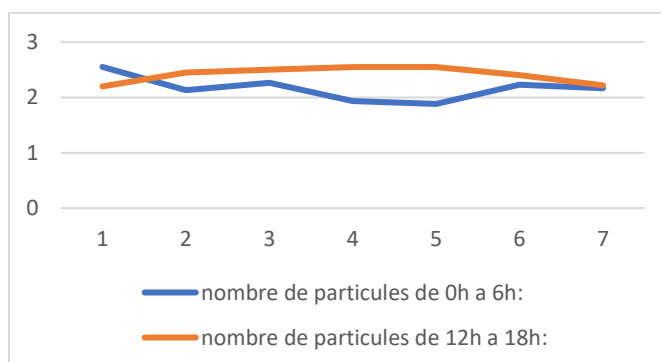


5.4.3.2.2 Mesures lors des jours à température variable :

- 02.09.18

heure	temperature	average/min
0	7,5	2,551724138
1	6,7	2,133333333
2	6,1	2,266666667
3	5,5	1,933333333
4	5,1	1,883333333
5	4,6	2,233333333
6	4,5	2,166666667
7	6,5	2,5
8	12,2	2,333333333
9	16,9	2,383333333
10	18,4	2,355932203
11	19,7	2,183333333
12	19,9	2,2
13	19,9	2,45
14	19,5	2,5
15	19,6	2,55
16	19,3	2,55
17	18,8	2,406779661
18	18,5	2,216666667
19	17,9	2,783333333
20	17,1	2,355932203
21	16,5	2,516666667
22	15,6	2,266666667
23	15,4	2,683333333

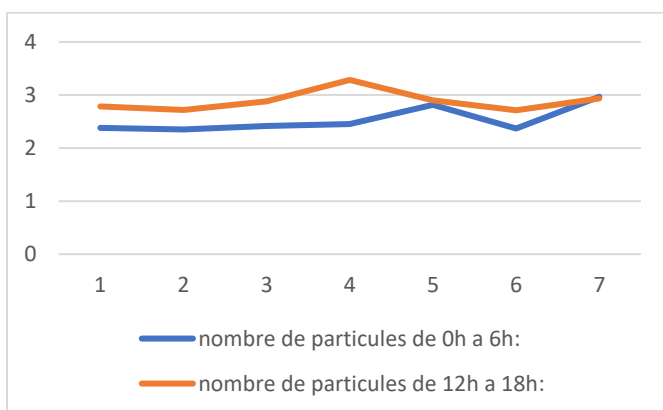
nombre de particules de 0h à 6h:	775
nombre de particules de 12h à 18h:	1012
différence entre les deux:	237



- 05.09.18

heure	temperature	average/min
0	12,8	2,379310345
1	12,3	2,35
2	12	2,416666667
3	12,3	2,45
4	12,6	2,816666667
5	12,9	2,366666667
6	13,3	2,966666667
7	14,1	2,833333333
8	15,9	2,45
9	18,8	2,45
10	21,9	2,661016949
11	24,8	2,6
12	25,8	2,783333333
13	26,1	2,72
14	26,3	2,883333333
15	27,3	3,283333333
16	25,3	2,9
17	23,5	2,711864407
18	21,8	2,933333333
19	19,7	2,916666667
20	18,6	3,050847458
21	17,7	3,05
22	17,2	2,783333333
23	16,7	3,083333333

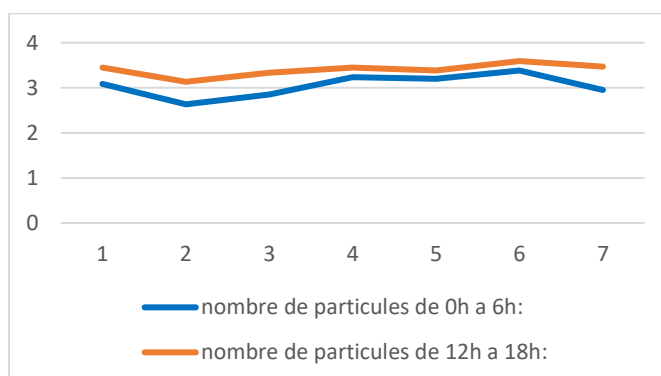
nombre de particules de 0h à 6h:	882
nombre de particules de 12h à 18h:	1215
différence entre les deux:	333



- 16.09.18

heure	temperature	average/min
0	7	3,086207
1	6,3	2,633333
2	5,8	2,85
3	5,1	3,233333
4	4,7	3,2
5	4,4	3,383333
6	3,9	2,95
7	5,2	3,133333
8	10,4	3,05
9	14,4	3,45
10	17,9	3,508475
11	20,3	3,75
12	21,7	3,45
13	22,6	3,13
14	23,3	3,333333
15	23,5	3,45
16	23,4	3,383333
17	22,4	3,59322
18	19,6	3,466667
19	15,8	3,616667
20	13,5	3,762712
21	11,6	3,166667
22	10,1	3,783333
23	8,8	3,8

nombre de particules de 0h à 6h:	1097
nombre de particules de 12h à 18h:	1428
différence entre les deux:	331

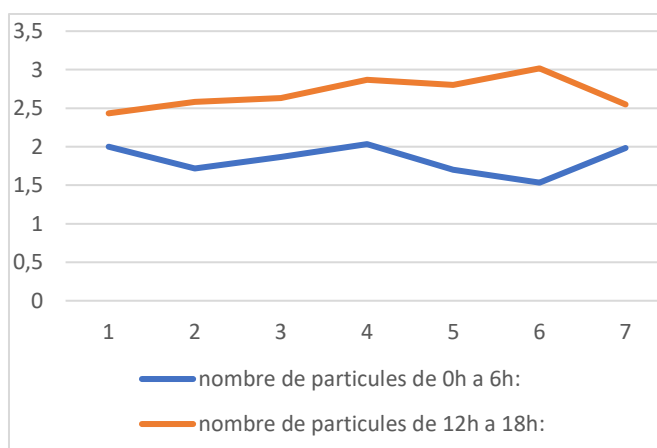


Avril & Mai :

- 18.04.18

heure	temperature	average/min
0	6,60	2
1	5,80	1,716667
2	5,10	1,866667
3	4,60	2,033333
4	4,00	1,7
5	3,70	1,533333
6	4,00	1,983333
7	6,10	2,016667
8	10,90	2,183333
9	15,80	2
10	20,20	2,59322
11	22,90	2,233333
12	23,90	2,433333
13	24,70	2,58
14	25,50	2,633333
15	26,00	2,866667
16	26,00	2,8
17	25,50	3,016949
18	23,90	2,55
19	18,90	2,733333
20	14,90	2,983051
21	12,80	3,016667
22	11,20	3,05
23	10,00	3,233333

nombre de particules de 0h a 6h:	647
nombre de particules de 12h a 18h:	1137
différence entre les deux:	490



5.4.3.2.3 Conclusion et résultats de l'étude

Nous avons tenu compte de deux valeurs importantes pour notre enquête, pour chaque phase (froide et chaude) : la moyenne de muons mesurée par minute et la somme totale de particules mesurés dans les six heures. On peut observer que lors de journées à faible amplitude thermique : la moyenne de muons entre 0 et 6 heure est de 2,13 muons par minute pour le 13.09.2018 et de 2,33 muons par minute pour le 21.09.2018 et la moyenne de muons par minute entre 12- et 18 heures est de 1,88 pour le 13.09.2018 ainsi que pour le 21.09.2018. La moyenne de muons par minute est donc plus élevée de 0 à 6 heures que de 12 à 18 heures. Effectivement nous avons de 0 à 6 heure 834 particules contre 798 particules de 12 à 18 heures pour le 21.09.2018 et de 761 contre 790 le 13.09.2018.

Lors des journées à amplitude thermique élevée : la moyenne de muons entre 0 et 6 heure est de 2,17 muons par minute pour le 02.09.2018, de 2,46 muons par minute pour le 05.09.2018 et de 3,06 pour le 16.09.2018 et la moyenne de muons par minute entre 12- et 18 heures est de 2,44 pour le 02.09.2018, de 2,88 pour le 05.09.2018 et de 3.39 pour le 16.09.2018. La moyenne de muons par minute est donc plus basse de 0 à 6 heures que de 12 à 18 heures. Effectivement nous avons de 0 à 6 heures 775 particules contre 1012 particules de 12 à 18 heures le 02.09.2018, de 882 contre 1215 pour le 05.09.2018 et de 1097 contre 1428 particules pour le 16.09.2018.

Par rapport au mois de septembre, les dates choisies pour les journées à grande amplitude thermique étaient les suivantes : 18.04.18. Pour les journées à basse amplitude thermique nous avons choisi les dates suivantes : 13.05.18 et 30.04.2018.

On peut observer que lors des jours où la température présentait des faibles fluctuations, la moyenne de muons captés par minute, dans la phase froide, ne variait pas beaucoup par rapport à celle mesurée durant la phase chaude. La somme totale dans les six heures, pour chaque phase, confirme cette tendance 834 particules de 0 à 6 heure contre 798 particules de 12 à 18 heures donc une différence de 36 pour le 13.09.2018 et de 761 contre 790 donc une différence de 29 le 21.09.2018.

Par contre lors des jours où la température était fortement variable, on peut clairement remarquer que la différence des moyennes de muons mesurées est élevée nous avons de 0 à 6 heure 775 particules contre 1012 particules de 12 à 18 heures donc une différence de 237 le 02.09.2018, pour le 05.09.2018 882 contre 1215 donc une différence de 333 et pour le 16.09.2018 1097 contre 1428 particules donc une différence de 331.

La comparaison entre les sommes totales de muons mesurés par phase, confirme la variation significative de l'intensité du flux de muons dans l'arc de 24 heures. En effet, il y avait en moyenne une différence de 300 muons entre les heures froides et les heures chaudes. Lors des heures froides nous avons une moyenne (somme totale muons) autour de la valeur 918, alors que lors des heures chaudes nous avons en moyenne 1218 muons.

Cela confirme notre hypothèse que malgré l'intensité du flux de muons dépende surtout des variations saisonnières de la basse stratosphère (Blackett effect), des variations remarquables de certains paramètres dans la troposphère, notamment la température, peuvent provoquer des variations dans le flux non négligeable. En effet, si la masse volumique change de manière rapide et de façon remarquable, les muons peuvent subir une plus grande perte d'énergie et donc moins de particules atteignent la surface de la Terre. Cela est confirmé aussi par une autre de nos études effectuées durant le mois de février 2018, conduite sur une période de 10 jours.

On peut par contre remarquer que le 30 septembre 2018, la variation de température était de faible amplitude, mais la variation de flux est très élevée. En recherchant nous n'avons pas su démontrer à quoi ceci est dû car l'activité solaire n'a pas fort varié lors de cette journée. On voit donc que quand la température n'est pas très variable la variation de flux peut quand même être significative.

6 L'influence des rayons cosmiques sur notre atmosphère et notre climat

6.1 Corrélation entre le climat et les rayons cosmiques

Le sujet du lien entre le climat et les rayons cosmiques est très controversé depuis une trentaine d'années. A ce jour il n'est toujours pas prouvé si le climat est en liaison avec les rayons cosmiques ou pas.

6.1.1 Evolution de la recherche au fil du temps liant le réchauffement climatique au rayons cosmiques (de 1911 à 2003)

Dans ce tableau ci-dessous on voit l'évolution des recherches faites au sujet des rayons cosmiques. On peut notamment observer que les rayons cosmiques ont seulement été observés pour la première fois en 1900, ce qui est relativement tard pour une première découverte et que à ce moment-là la technologie ne permettait pas de faire des études poussées sur la question de la provenance et de la composition de ces rayonnements.

1900	La première observation permettant la découverte des rayons cosmique a été fait par Charles Thomson Rees. Ce physicien a remarqué que l'atmosphère est ionisée en permanence et en a conclu que ça devrait être des rayons naturels de la Terre.
1911	Déjà en 1911 le physicien écossais Charles Wilson créé la première chambre à brouillard. La création de cette chambre n'a pas de lien direct avec l'étude du lien entre les nuages et les rayons cosmiques par contre elle a permis de nombreuses études sur les rayons cosmiques, ce qui explique son utilisation jusque dans les année 1950.
1912-1913	En 1912 le physicien Victor Franz Hess vol à bord d'un ballon et remarque qu'à partir d'un kilomètre d'altitude sont électroscope mesure une charge électrique qui augmente en fonction de l'altitude. Son ballon ne pouvant monter qu'à 5 km il doit limiter ses mesures à cette altitude. Il en conclut que le rayonnement ionisant doit avoir une origine cosmique. En 1913 Werner Kolhörster reprend ses expériences et étend les mesures jusqu'à 9300 mètres.
1928-1996	Grâce à la découverte des compteurs Geiger-Müller (1928) on peut commencer à faire des analyses plus poussées de ce rayonnement ionisant et en découvrir plus précisément la nature.

	<p>En un premier temps de nombreux ballons capable de mesurer différents paramètres de l'atmosphère, notamment les rayons cosmiques, ont été envoyés dans la haute atmosphère. Mais pour l'instant il est impossible de directement mesurer les rayons cosmiques. Il faudra attendre les années 1950 pour pouvoir faire les premières observations directes de rayons cosmiques. Au fil du temps on découvrira de quoi les rayonnements cosmiques sont composés.</p>
1997	<p>En 1997 deux chercheurs Danois Henrik Svensmark et Eigil Friis-Christensen popularisent une théorie qui lie les rayons cosmiques et le réchauffement climatique. Le climat varierait donc surtout en fonction de l'activité et des vents solaires.</p> <p>Ils s'appuient sur les recherches des physiciens Robert E. Dickinson et Edward P. Ney qui pour leur part avaient déjà fait de nombreuses recherches dans ce domaine en 1975.</p>
2000	<p>Enric PALLE BAGO et John BUTLER, de l'Armagh Observatory en Irlande, ont indiqué une corrélation maximale entre le flux de rayons cosmiques et les nuages bas (en dessous de 3,2 km dans les zones intertropicales) pendant la période de 1983 à 2001.</p>
2001	<p>En 2001 ces corrélations nous ont forcé à nous pencher vers la formation de nuages et surtout le lien entre l'ionisation de l'atmosphère et les aérosols. De nombreuses études ont donc étudié différents facteurs contribuant à la formation de nuages et leur évolution en présence de rayons cosmiques. Il y a notamment une étude menée par deux chercheurs de l'université de NewYork, Fangqun Yu et Richard Turco, qui rassemble des données sur les précipitations, les molécules responsables de la formation des aérosols, la température, le flux d'électrons, le flux de protons. Ils ont conclu de cette étude qu'une augmentation de 25% des flux d'ionisations augmente le taux d'aérosols (de vapeurs d'eau et acide sulfurique) de 4%. Ce qui implique que la mise en place de la formation de nuages est bien plus facile.</p>
2003	<p>Henrik Svensmark et Eigil Friis-Christensen prolongent la courbe de couverture nuageuse jusqu'à 2001. Cette fois ci avec moins de succès. Effectivement la corrélation est très controversée, car les données de 1994 à 1995 ont dû être modifiées car le satellite était apparemment mal calibré. Cette modification a semé le doute et beaucoup de scientifiques ont jugé que cette étude a perdu une partie de sa crédibilité.</p>

6.1.2 Corrélations entre les nuages et les rayons cosmiques

Venons-en à présent à la corrélation entre les rayons cosmiques et les nuages. Cette corrélation a été, et est toujours très discutée, à tel point qu'il n'est toujours pas très clair si oui ou non il existe une telle corrélation.

En 1991 un article émettant une corrélation entre les 11 ans du cycle solaire et la température globale est publié. Par la suite Henrik Svensmark et Friis-Christensen publient un document montrant une corrélation entre l'intensité du rayonnement cosmique et la couverture nuageuse totale.

En 2000 Henrik Svensmark et Nigel Marsh émettent l'hypothèse que la corrélation serait plutôt avec les nuages bas et non pas avec la couverture nuageuse totale. Ceci est dû au fait que on retrouve plus d'acide sulfurique (H_2SO_4) à la hauteur des nuages bas. Selon l'hypothèse de Svensmark à ce moment-là on peut estimer le forçage radiatif en été du au rayons cosmiques de 1 à 2 W/m^2 .

C'est à partir de là que les doutes apparaissent, de 1984 à 1991 la corrélation à bien l'air d'être présente avec un peu de retard, par contre à partir de 1994 la tendance inverse, c'est-à-dire que lorsque les rayons cosmiques augmentent la couverture nuageuse à basse altitude diminue. D'après Svensmark et son collègue Nigel Marsh ceci serait dû à la mauvaise calibration du satellite et il en profite pour prolonger leur tendance jusqu'en 2001.

La question qui se pose donc est si le satellite était effectivement mal calibré et la correction tout à fait justifiée, ou si la corrélation entre les rayons cosmiques et la couverture nuageuse n'existe vraiment pas. Les données météorologiques utilisées dans l'étude sont celles de l'ISCCP. Cette compilation de données provenant d'une multitude de satellites (cinq satellites géostationnaires et deux satellites à orbite polaire) faisant des observations dans le domaine visible et infrarouge. Effectivement à la fin de l'année 1994 un des deux satellites polaires n'était plus disponible, par contre il faut savoir que les deux satellites polaires servent de référence pour calibrer les autres satellites. Ce qui explique qu'une modification des données soit nécessaire. En plus il est possible que d'autres modifications soient nécessaires dû à d'autres problèmes au niveau des observations des satellites. Ci-dessous on voit les deux tableaux indiquant la couverture nuageuse, à gauche sans correction des données et à droite avec corrections. On remarque une différence significative entre les deux tableaux.

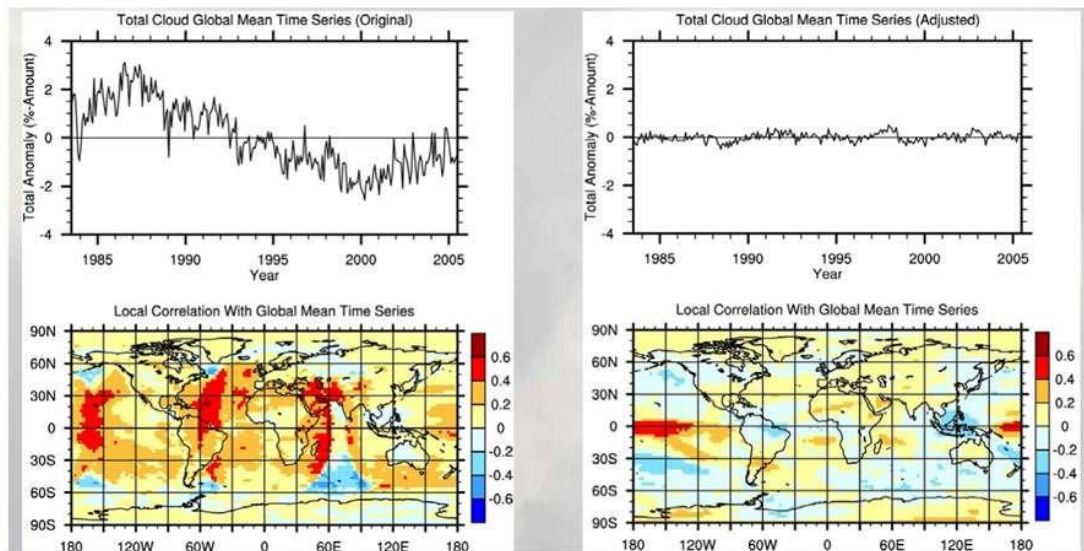


Figure 5

Graphique illustrant la comparaison entre les données concernant la couverture nuageuse de 1983 à 2005 modifiée (à droite) et non-modifiée (à gauche)

De plus les variations de la couverture nuageuse entre 1984 et 1991 se laissent très bien expliquer par l'effet El Nino.

Il est donc difficile de dire si oui ou non il y avait une corrélation entre la couverture nuageuse et les rayons cosmiques lors de toutes ces années. Par contre il est sûr que le manque de données présente une très grande faille pour ce genre d'études et les rend très difficile à faire.

6.1.3 Effet des rayons cosmiques sur les aérosols et les conséquences

Au fil du temps de nombreuses thèses plausibles ont été publiées pour prouver qu'il y a un lien entre les rayons cosmiques et le climat. La thèse la plus plausible et actuelle est celle créant un lien entre les rayons cosmiques, les aérosols, les noyaux de condensation et donc les nuages.

Les rayons cosmiques ont sûrement des effets sur les aérosols qui sont présent dans notre atmosphère. Les complications interviennent lorsqu'il s'agit de déterminer ces effets et surtout leurs conséquences. Aux alentours des années 1990 une corrélation a été observée

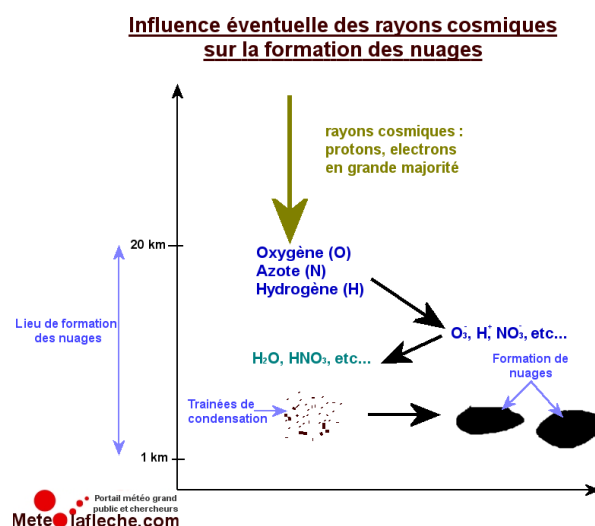


Figure 6

Schéma illustrant l'effet des rayons cosmiques sur les molécules d'air et les conséquences possible sur les nuages

entre les rayons cosmiques et la couverture nuageuse, plus précisément les nuages bas. Cette corrélation a beaucoup été contredite dû au fait qu'on avait que très peu de données et que d'après certains scientifiques ces données seraient erronées du a de mauvais calibration des capteurs.

Les rayons cosmiques créent selon certaines théories de nouveau aérosols qui pourraient agir comme noyaux de condensations dans notre atmosphère. Ce qui a pour conséquences qu'il y a de nombreux aérosols qui atteignent la bonne taille pour former des nuages avant de retomber. Cet effet pourrait augmenter la couverture nuageuse de manière significative.

Lorsque les rayons cosmiques interagissent avec un noyau de l'atmosphère ils créent des ions. La plupart des atomes touchés sont ceux d'oxygènes ou d'azote de la troposphère. Lors de ces interactions et spallations de nouveaux éléments sont créés dans l'atmosphère ces éléments sont appelés « cosmonucléides ». Cette théorie est admise, par contre ce qui est encore fort discuté est le fait que les ions comme O_3^- , H^+ , NO_3^- et de nombreux autres faisant partie de ces cosmonucléides qui ont une taille de seulement 1 nm pourrait se recombinaison avec d'autres ions ou même des aérosols déjà présents dans l'atmosphère auparavant pour créer de nouveaux aérosols. Ceci aurait pour conséquence qu'ils puissent servir de noyaux de condensation et ainsi favoriser la formation de nuages que de très peu car il faudrait beaucoup d'ions pour ne créer qu'un noyau de condensation. Pour ceci ils doivent mesurer environ entre 50nm et 100nm. On peut dire que cette première éventualité serait négligeable car il n'y aurait que très peu de noyaux de condensations qui seraient créés. Par contre s'ils grandissent par condensation de vapeurs (généralement de l'acide sulfurique et d'autres matières organiques à faible volatilité) et

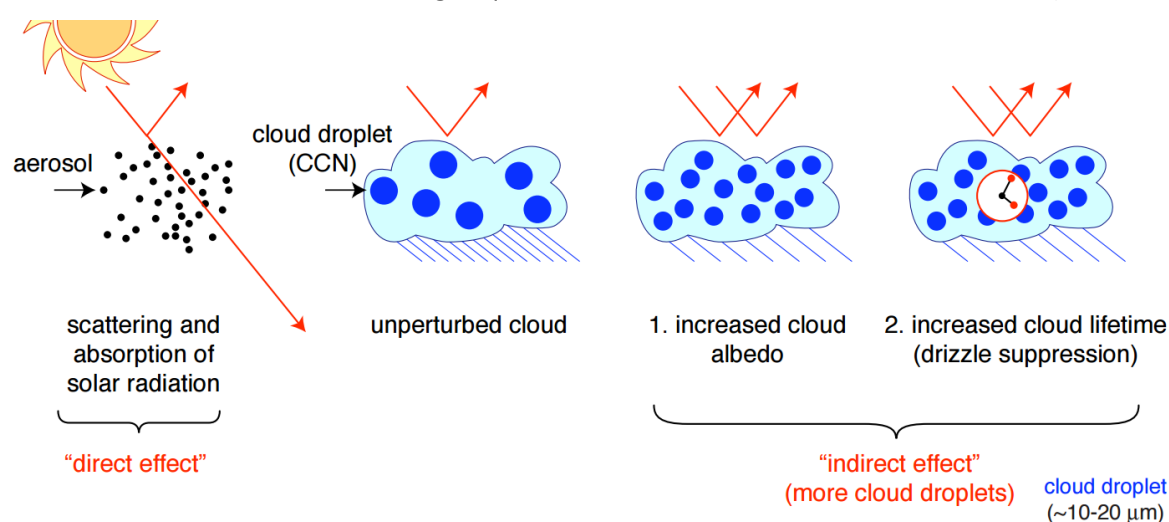


Figure 7

Schéma illustrant l'effet de la variation de gouttes d'eau dans sur les nuages

agissent ensuite comme noyaux de condensation alors leur effet peut prendre une très grande ampleur, car le nombre d'aérosols pouvant servir de noyaux de condensation serait grand ils pourraient donc conduire à de nombreux nuages en plus. Ces nuages étant relativement bas et ayant un albédo élevé pourrait avoir un effet de refroidissement.

6.1.3.1 Situation actuelle des recherches

6.1.3.1.1 CLOUD

A ce jour nous n'avons toujours pas de réponse si oui ou non les rayons cosmiques ont une influence significative sur le climat terrestre. L'étude principale étudiant la question est le CLOUD (Cosmics Leaving Outdoor Droplets), ayant lieu au CERN et est dirigé par le physicien Jasper Kirkby. Cette étude a été créée pour tester de manière systématique le lien entre les rayons cosmiques et le climat, plus spécifiquement la connexion entre les ions créés par les rayons cosmiques, la nucléation d'aérosols et les noyaux de condensation. Le début des opérations a commencé en novembre 2009.

6.1.3.1.1.1 Instrument de mesure de CLOUD

Pour ce faire CLOUD utilise une chambre à brouillard de 26m³ alimentée par le synchrotron à protons du CERN pour simuler les rayons cosmiques. Dans cette chambre la température et la pression peuvent être contrôlées ainsi que l'humidité de l'air. Le fait que la chambre à brouillard soit alimentée par le synchrotron à protons permet de simuler les rayons cosmiques à différentes altitudes et latitudes. De plus cette chambre est munie d'un champ électrique permettant de contrôler la dérive des ions et des aérosols chargés. Un grand avantage de CLOUD est que grâce à tout l'équipement à disposition les expériences peuvent être faites dans des conditions quasiment idéales, ce qui est très important pour les études dans le domaine, car le moindre contaminant peut avoir un effet dramatique sur les résultats de l'expérience.

6.1.3.1.1.2 Résultats

Bien sûr l'expérience CLOUD n'est pas terminée, mais des premiers résultats ont déjà été publiés depuis longtemps. En un premier temps CLOUD s'est concentré sur la nucléation des aérosols et la manière dont ils grandissent.

En premier l'étude a analysé comment des aérosols apparaissent et leur interaction avec les différents gaz se trouvant dans l'atmosphère. On a notamment découvert que les amines stabilisent mieux les groupements d'acide sulfurique que l'ammoniac. Ce genre de découvertes permettent de mieux comprendre la formation d'aérosols lors de l'industrialisation et de comprendre le changement climatique dans le passé et non pas seulement de comprendre les changements

actuels. Cloud a également découvert que des vapeurs organiques très oxydées améliorent la nucléations d'acide sulfurique et pourraient même nucléé des particules par eux-mêmes.

Toutes ces découvertes permettent également bien-sûr de mieux comprendre la manière dont les ions formés par les rayons cosmiques pourraient grandir et devenir des noyaux de condensations.

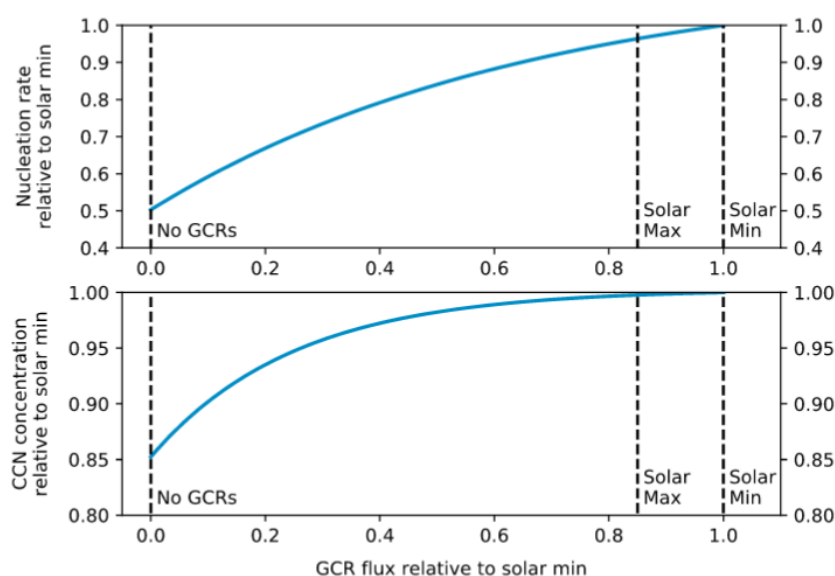


Figure 10

Graphique illustrant l'évolution des aérosols secondaires (graphique du dessus) et des noyaux de condensations (graphique du dessous) en fonction du taux de rayons cosmiques.

Voici ci-dessus deux graphiques montrant des résultats de l'expérience CLOUD, le graphique du dessus illustrant le taux de nucléation en fonction du taux de rayons cosmiques. On voit que lors du maximum solaire on a moins de taux de nucléation (ce qui paraît logique car on a moins de rayons cosmiques) que lors du minimum solaire.

Sur le deuxième graphique on peut observer la concentration de noyaux de condensation (CCN -> Cloud Condensation Nuclei) en fonction du taux de rayons cosmiques. Sur ce graphique par contre on observe également que la concentration est plus élevée au minimum solaire, mais elle est déjà très élevée au maximum. La différence entre le maximum et le minimum solaire n'est donc pas très grande. D'après l'étude on a donc une réduction des noyaux de condensation de 10-20% à l'altitude des nuages bas. Un changement significatif bien-sûr mais inférieur à celui du taux de nucléation. Ce phénomène est dû au fait que de nombreux aérosols atteignent la taille d'un noyau de condensation même sans la présence d'ions. De plus les ions n'ont aucun effet sur les noyaux de condensation d'origine primaire.

Si on observe à présent la différence entre le maximum et le minimum solaire, ce qui signifie un changement de 10-20% d'ion dans une grande partie de la troposphère, la différence de noyaux de condensations est de 0,2-0-3% à la hauteur des nuages bas. Cette différence est trop petite pour expliquer la variation de couverture nuageuse qui est de 2% entre le maximum et le minimum solaire.

La conclusion actuelle est que l'hypothèse que les ions créés par les rayons cosmiques ont un effet sur la couverture nuageuse est trop faible pour avoir un impact significatif sur le climat. Ce qui ne veut pas dire que les rayons cosmiques n'ont pas d'autres effets sur le climat, les rayons cosmiques pourraient encore avoir d'autres effets sur les nuages que celui des aérosols, d'autres études ont notamment suggéré que les rayons cosmiques pourraient influencer la congélation de l'eau liquide dans les nuages dû au fait qu'il crée une charge dans et au-dessus des nuages ou que les rayons cosmiques pourraient influencer le taux de matériaux condensables permettant l'agrandissement des aérosols secondaires. C'est mécanismes relativement compliqués à démontrer ou à observer n'ont pas encore été approuvés ou désapprouvés.

7 Conclusion

« Les rayons cosmiques interagissent-ils avec notre atmosphère et quelles sont ces interactions et leurs conséquences ? »

Pour les scientifiques les rayons cosmiques sont toujours partiellement un mystère, ce qui est probablement dû au fait qu'ils ont des origines lointaines et que leur découverte n'a qu'eue lieu il y a un peu plus de 100 ans.

De plus la question de savoir si les rayons cosmiques ont un lien avec le climat ne s'est que posée pendant les années 90. Depuis lors de nombreuses hypothèses ont été émises pour expliquer une corrélation entre les rayons cosmiques et les nuages, qui n'est même pas encore sûr dû au manque de données. Le manque de données qui rend les recherches et les preuves des hypothèses bien plus compliquées à faire et ralentit fortement l'évolution dans le domaine.

Néanmoins pendant les dernières années de nombreux progrès ont été faites au niveau des recherches et des conclusions ont pu en être tirées, notamment grâce à l'expérience CLOUD cité dans ce travail.

De plus je peux conclure de ce mémoire que les rayons cosmiques ont sûrement une influence sur notre climat. La question qui se pose est quelle ampleur cette influence a sur le réchauffement climatique. L'effet de l'augmentation des aérosols et ainsi des noyaux de condensation que j'ai expliqués dans ce travail et qui a eu le plus de répercussions connues à ce jour, a déjà été testé en laboratoire et actuellement les résultats prouvent qu'il n'a pas une très grande influence. Néanmoins c'est juste un des nombreux effets des rayons cosmiques qui pourraient influencer le climat. De plus, pour répondre à la question de ce mémoire il faut connaître et comprendre les interactions entre les rayons cosmiques et l'atmosphère, mais il faut également prendre en compte ce qui influence la désagrégation des rayons cosmiques dans notre atmosphère ce que j'ai testé dans ma partie pratique de ce mémoire. Les différents facteurs comme par exemple la hauteur à laquelle la désintégration se produit a une grande influence sur les effets de ce phénomène.

Dans un premier temps je trouve qu'il faudrait essayer de trouver une corrélation entre les nuages et les rayonnements cosmiques, mais également avec le changement climatique aussi bien global que local. Car si une telle corrélation existe on peut être quasiment sûr que les rayons cosmiques ont un effet sur le climat et il ne restera plus qu'à trouver l'origine de cet effet. D'après moi il ne faut donc surtout pas arrêter ce genre de mesures mêmes si des études prouvent que les différentes hypothèses sont négligeables ou même fausses. Car de nouvelles hypothèses pourraient naître et

bénéficier des données collectées pour leur validation ce qui permettra d'accélérer et d'améliorer le processus.

Ce mémoire m'a également, grâce à la partie pratique, permis de me rapprocher et avoir mes premières expériences dans le domaine de la recherche. Ce qui est assez important car ça me permet de voir si oui ou non ce domaine me plait et si j'aurai envie de m'investir dans ce genre de recherches.

8 Bibliographie

<https://www.theverge.com/2017/9/21/16335164/pierre-auger-observatory-cosmic-ray-galaxies-air-shower-particles>

Les rayons cosmiques qu'est-ce que c'est :

<https://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/univers-rayon-cosmique-2446/>

<http://www.laradioactivite.com/site/pages/expositionauxrayonscosmiques.htm>

La désintégration des rayons cosmiques :

<https://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/univers-rayon-cosmique-2446/>

http://cosmic.lbl.gov/SKliewer/Cosmic_Rays/Atmosphere.htm

https://www.google.lu/url?sa=t&source=web&rct=j&url=http://www.sciencesalecole.org/wp-content/uploads/2016/06/rayons_cosmiques.pdf&ved=2ahUKEwjvzsfw7angAhWLMewKHWHAYEQFjAAegQIAhAB&usg=AOvVaw3RIuBBVP44qBUkmJPcplX8

<http://www.laradioactivite.com/site/pages/Bremsstrahlung.htm>

https://fr.m.wikipedia.org/wiki/Rayonnement_continu_de_freinage

<http://www.vaucanson.org/php5/Accueil/index.php/comment-detecter-les-muons>

L'atmosphère terrestre :

http://www.meteo45.com/couches_atmospheriques.html

<http://education.meteofrance.fr/dossiers-thematiques/le-fonctionnement-de-l-atmosphere/la-composition-de-l-atmosphere/la-structure-de-latmosphere>

<https://www.emse.fr/~bouchardon/enseignement/processus-naturels/up1/web/la-terre-est-ronde/terre-ronde-geodynamique-0502-atmosphere-troposphere-effet-de-serre.htm>

<http://www.aeronomie.be/fr/themes/systemeterre/tropo1.pdf>

Quels facteurs influencent notre climat et peuvent être influencés par les rayons cosmiques

Les aérosols :

<https://www.futura-sciences.com/planete/dossiers/climatologie-tant-incertitudes-previsions-climatiques-638/page/3/>

Les nuages :

<https://reseauactionclimat.org/diminution-nuages-bas-aerosols-amplification-rechauffement/>

Formation des nuages

http://meteocentre.com/intermet/eau/formation_nuage.htm

<https://www.futura-sciences.com/planete/definitions/meteorologie-noyau-condensation-6745/>

Les rétroactions des différents nuages

<https://www.futura-sciences.com/planete/dossiers/climatologie-tant-incertitudes-previsions-climatiques-638/page/4/>

<https://reseauactionclimat.org/diminution-nuages-bas-aerosols-amplification-rechauffement/>

https://www.notre-planete.info/terre/climatologie_meteo/nuages.php

Quels facteurs météorologiques influencent les rayons cosmiques :

1. Communication de presse CNRS, « L’observatoire Pierre Auger remonte aux sources des rayons cosmiques d’énergie extrême », (08.11.2007) ; archives.cnrs.fr/presse/article/1219
2. Antonio Lacalamita, « Misura del rate giornaliero dei muoni nei raggi cosmici secondari in laboratorio » (2017) ; Università degli Studi di Bari « Aldo Moro »
3. Alessandro De Angelis, Mário João Martins Pimenta; “Introduction to Particle and Astroparticle Physics”, Springer
4. Rosa Amoruso, « Andamento del flusso dei muoni atmosferici in funzione della quantità di materia attraversata » (2015) ; Università Sapienza di Roma
5. A. Duperieb, “On the positive temperature effect of the upper atmosphere and the process of meson production” (1951); Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics, Volume 1, Issues 5-6, 296
6. P. M. S. Blackett, “On the Instability of the Barytron and the Temperature Effect of Cosmic Rays”, 1938; Physical Review Journals Archive, 54, 973
7. Arcani, Domenico Liguori, Pasquale Barone ; « ADA (ASTROPARTICLE DETECTOR ARRAY) AN EDUCATIONAL PROJECT ON ULTRA HIGH ENERGY COSMIC RAYS » (Septembre 2015) ; Research Gate.
8. www.astroparticelle.it
9. Marco Arcani; AMD5 & ASTRORAD (Handbook 2015); Astroparticelle
10. Jean-Michel Friedt; “LE TÉLESCOPE À PARTICULES COSMIQUES; PRINCIPE DE LA MESURE PAR COÏNCIDENCE” (2014); DIAMOND EDITIONS
11. Marco Arcani ; « Astroparticelle : In Viaggio tra i Raggi Cosmici » (2013) ; Simple

L'influence des rayons cosmiques sur notre atmosphère et notre climat

<http://www.meteolafleche.com/Soleil/rayons-cosmiques-climat.html>

https://fr.wikipedia.org/wiki/Chambre_%C3%A0_brouillard

https://en.m.wikipedia.org/wiki/Henrik_Svensmark

<http://www.skyfall.fr/2008/09/21/rayons-cosmiques-et-climat/>

http://teacherlink.ed.usu.edu/tlnasa/reference/imaginedvd/files/imagine/docs/sats_n_data/cosmic_missions.html

https://en.wikipedia.org/wiki/CLOUD_experiment

<https://www.universalis.fr/encyclopedie/rayonnement-cosmique-rayons-cosmiques/1-la-decouverte-des-rayons-cosmiques/>

https://indico.cern.ch/event/52576/attachments/970791/1379192/cern_colloquium_kirkby.pdf

<https://www.futura-sciences.com/planete/dossiers/climatologie-rechauffement-role-uv-nuages-rayons-cosmiques-1253/page/7/>

Roschni Dave, 20.04.2017, Journal of Scientific Approach « On relationship between Galactic Cosmic Rays and Cloud cover », IP INSCRIBE PUBLICATIONS

J. R. Pierce, 02.08.2017, Journal of Geophysical Research : Atmospheres « Cosmic rays, aerosols, clouds, and climate : Recent findings from the CLOUD eperiment », AGU PUBLICATIONS