

UNIVERSITÉ NATIONALE DU VIETNAM À HANOI
ÉCOLE DES SCIENCES NATURELLES
FACULTÉ DE PHYSIQUE

Nguyễn Văn Hiệp

**RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUE
ET
RAYONS COSMIQUES**

MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES UNIVERSITAIRES
Spécialité: Physique nucléaire

Hanoï – 2010

UNIVERSITÉ NATIONALE DU VIETNAM À HANOI
ÉCOLE DES SCIENCES NATURELLES
FACULTÉ DE PHYSIQUE

Nguyễn Văn Hiệp

**RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUE
ET
RAYONS COSMIQUES**

MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES UNIVERSITAIRES
Spécialité: Physique nucléaire

Tuteur: Prof. Pierre Darriulat

Hanoï – 2010

REMERCIEMENTS

La rédaction de ce mémoire m'a permis de rencontrer des gens nouveaux, qui m'ont apporté beaucoup d'aide, d'encouragement et de soutien dans mes recherches et que je souhaite aujourd'hui remercier.

Mes remerciements les plus sincères et les plus profonds vont tous d'abord au professeur Pierre Darriulat, mon directeur de mémoire, qui est en grande partie à l'origine de mon intérêt et de ma passion pour la physique et sans qui ce mémoire n'aurait jamais vu le jour.

Je tiens à remercier particulièrement tous les membres du laboratoire VATLY: Pham Ngoc Dong, Nguyen Thi Thao, Pham Thi Tuyet Nhung, Pham Ngoc Diep, Doan Thi The, Do Thi Hoai, Pham Tuan Anh qui ont suivi mon travail de près et qui m'ont donné de nombreux conseils, ainsi que les autres équipes de l'Institut des Sciences et Technologies Nucléaires – où ce travail a été effectué – avec lesquelles j'ai eu plaisir à travailler.

Mes remerciements s'adressent également au professeur Pham Quoc Hung et à Dr Ha Thuy Long, responsable de la Filière francophone "Physique Corpusculaire et Applications" – AUF, pour leurs encouragements et leur aide indispensable concernant la rédaction de ce mémoire.

Je désire ensuite adresser des remerciements aux enseignants de l'École des Sciences Naturelles, en particulier ceux du Département de Physique Nucléaire, Faculté de Physique. Ils nous ont dispensé leur enseignement avec soin tout au long de nos études universitaires.

Enfin, je voudrais dire un grand merci à ma famille et à mes amis qui m'ont toujours exprimé leur confiance et qui m'ont beaucoup encouragé pendant toute la durée de ce travail.

Nguyễn Văn Hiệp

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION	1
1. RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUE	3
1.1 <i>Le réchauffement climatique</i>	4
1.2 <i>Gaz à effet de serre</i>	9
1.3 <i>Réchauffement climatique, activité solaire et rayons cosmiques</i>	12
1.4 <i>Conclusion</i>	18
2. LE SOLEIL	20
2.1 <i>Propriétés générales</i>	20
2.2 <i>Structure du Soleil</i>	21
2.2.1 <i>Le cœur</i>	22
2.2.2 <i>Zone radiative</i>	23
2.2.3 <i>Zone de convection</i>	24
2.2.4 <i>Photosphère</i>	25
2.2.5 <i>Atmosphère</i>	25
2.3 <i>Champ magnétique</i>	27
2.3.1 <i>Propriétés générales</i>	28
2.3.2 <i>Champ interplanétaire</i>	28
2.3.3 <i>Taches et cycle solaire</i>	29
2.3.4 <i>Anomalies</i>	30
2.4 <i>Evolution</i>	31
2.4.1 <i>Naissance du Soleil</i>	31
2.4.2 <i>Phase actuelle</i>	31
2.4.3 <i>Mort du Soleil</i>	32
3. RAYONS COSMIQUES	34
3.1 <i>L'histoire en bref</i>	34
3.2 <i>Spectre en énergie</i>	36
3.3 <i>Sources galactiques</i>	37
3.4 <i>Accélération dans les chocs</i>	41
3.5 <i>Les grandes gerbes</i>	43
4. FORMATION DES NUAGES	44
4.1 <i>Généralités</i>	44
4.2 <i>Mécanismes de formation</i>	46
4.2.1 <i>Mécanismes atmosphériques macroscopiques</i>	46
4.2.2 <i>Mécanismes microscopiques : généralités</i>	48
4.2.3 <i>Mécanismes microscopiques : aérosols, noyaux de condensation (CN et CCN)</i>	49
4.2.4 <i>Influence des rayons cosmiques</i>	51
5. CONCLUSIONS	53

INTRODUCTION

En 1997, Svensmark et Friis-Christensen [1] ont découvert que la couverture nuageuse globale de la planète était en étroite corrélation avec l'intensité du rayonnement cosmique galactique, laquelle est à son tour modulée par le cycle d'activité solaire dont l'abondance des taches solaires est une mesure. Bien que les nuages absorbent une partie de l'énergie solaire qu'ils reçoivent, ils en réfléchissent, dans la plupart des cas, une partie plus importante : une augmentation de la couverture nuageuse implique un refroidissement climatique, une diminution implique un réchauffement. La terre est en partie protégée du rayonnement cosmique par le champ magnétique qui règne à l'intérieur du système solaire, lequel est perturbé par le vent solaire dont l'intensité fluctue en fonction de l'activité solaire. Le vent solaire varie de façon périodique, en phase avec l'abondance des taches solaires, avec un maximum tous les onze ans. Lorsqu'il atteint ce maximum, le champ magnétique augmente et le flux de rayons cosmiques atteignant la terre diminue. Telle est la corrélation qui est observée, avec une amplitude de quelques pourcent sur une période d'activité solaire.

Bien que l'effet soit faible, il peut jouer un rôle important dans le bilan énergétique de la planète et être responsable d'une part importante du réchauffement climatique observé depuis de nombreuses décennies. En effet, l'intensité du vent solaire et le champ magnétique qu'il transporte ont plus que doublé au cours du siècle dernier [2]. La raison de cette variation à long terme est inconnue. L'augmentation du champ magnétique est telle qu'au cours de cette même période l'intensité des rayons cosmiques qui atteignent la terre a diminué d'environ 15%. Des mesures d'abondance d'isotopes légers dans les glaces du Groenland confirment cette diminution. Il semblerait donc qu'une part importante du réchauffement climatique puisse être due à une diminution du rayonnement cosmique. Une estimation grossière de l'effet montre qu'il est en effet comparable à celui qu'on attribue généralement aujourd'hui à l'effet de serre associé à la combustion accrue de combustibles fossiles au cours de l'ère industrielle.

Le mécanisme responsable du lien entre l'intensité du rayonnement cosmique et la couverture nuageuse est mal compris et fait aujourd'hui l'objet d'études en laboratoire [3]. Seuls les rayons cosmiques galactiques ont suffisamment d'énergie pour atteindre la région basse de l'atmosphère terrestre où les nuages se forment. A ces altitudes, les rayons cosmiques constituent la source dominante d'ionisation et produisent des radicaux libres. Il semblerait [4 à 8] que ces ions puissent s'agréger en amas formant des particules d'aérosol susceptibles de servir de noyau de condensation pour la formation de nuages. Il est nécessaire de mieux comprendre ces mécanismes pour pouvoir affirmer que les rayons cosmiques jouent un rôle important, voire dominant, dans le réchauffement climatique. En effet, un grand nombre de phénomènes sont corrélés avec l'activité solaire et deux d'entre eux pris au hasard, bien qu'étant en étroite corrélation, n'ont aucune raison d'être en relation causale.

Le mémoire est organisé de la façon suivante. Une première partie résume l'essentiel de nos connaissances concernant le réchauffement climatique. Elle est suivie d'une brève description du Soleil et de son activité, tant périodique qu'à long terme. La troisième partie est une introduction élémentaire à la physique des rayons cosmiques et la quatrième partie présente quelques uns des mécanismes invoqués dans la formation des nuages. Une brève conclusion clôt la dissertation.

1. RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUE

Le réchauffement climatique est un souci majeur à l'échelle de la planète à cause des conséquences catastrophiques qu'il est susceptible d'engendrer sur l'agriculture et les populations du littoral marin. L'ère industrielle s'est accompagnée d'une montée brusque de l'émission des gaz à effet de serre et la concentration du gaz carbonique dans l'atmosphère a augmenté de quelque 30%. Cette augmentation est généralement considérée comme étant la cause du réchauffement climatique observé au cours de cette même période [8]. Sa contribution au bilan énergétique terrestre (Figure 1.1), intégrée de 1750 à aujourd'hui, est de l'ordre de $+1.5 \text{ W/m}^2$, soit 0.4% du rayonnement solaire direct moyenné sur l'ensemble de la planète, 342 W/m^2 (c'est-à-dire un quart du rayonnement total de 1366 W/m^2). En tenant compte des autres gaz à effet de serre on atteint $+2.45 \text{ W/m}^2$; les aérosols contribuent directement -0.5 W/m^2 et indirectement, par leur influence sur la couverture nuageuse, -0.75 W/m^2 ; soit un total de $+1.2 \text{ W/m}^2$ pour les contributions d'origine humaine, évaluation entachée d'une très grande incertitude.

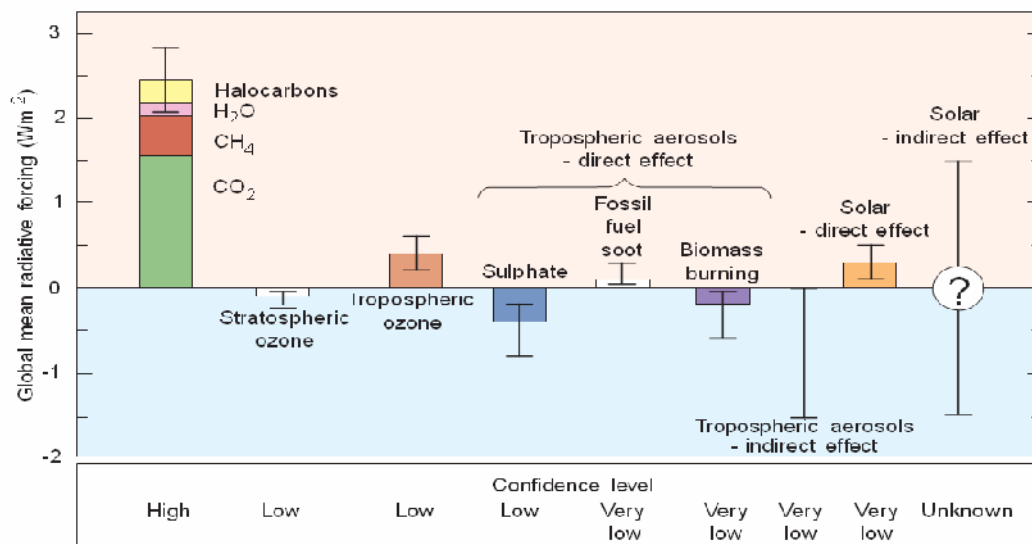


Figure 1.1: Contributions au reschauffement climatique moyennée sur la période 1850–1992 estimées par l'IPCC [8]. L'avant-dernière colonne correspond à la contribution directe du Soleil, la dernière colonne est une estimation de l'incertitude attachée à sa contribution indirecte par l'intermédiaire du rayonnement cosmique.

Les modèles climatiques sur lesquels reposent les évaluations du réchauffement climatique dû à l'augmentation de l'émission de gaz à effet de serre se sont sensiblement améliorés au cours des dernières années mais restent néanmoins sujets à d'importantes incertitudes dues, en particulier, à d'importants effets de feedback

difficiles à contrôler. Il est donc impossible, aujourd'hui, d'affirmer que le réchauffement climatique soit d'origine anthropique. C'est néanmoins dans ce climat d'incertitude scientifique que des décisions politiques majeures ont été prises à l'échelle de la planète à l'occasion de conférences internationales (Rio de Janeiro 1992, Kyoto 1997, Copenhagen 2010). Ces décisions ont des conséquences importantes sur l'économie des pays industrialisés comme sur celle des pays en voie de développement.

Il va de soi que de telles décisions doivent être prises sur la base d'évidences scientifiques plus solides que celles dont on dispose aujourd'hui : il s'agit là d'un domaine de recherche dont l'urgence est évidente. De nombreux scientifiques ont émis des critiques et des réserves particulièrement sévères sur les conclusions présentées par l'IPCC (United Nations Intergovernmental Panel on Climate Change) dans leurs rapports successifs et largement véhiculées par les médias. Ce n'est pas la place ici d'alimenter cette controverse.

1.1 Le réchauffement climatique

Augmentation de la température de la surface terrestre

La température moyenne au voisinage de la surface terrestre est une des mesures les plus couramment utilisées du réchauffement climatique. Son augmentation entre 1906 et 2005 est de 0.74 ± 0.18 °C. Dans la seconde moitié de cette période, le taux d'augmentation est double de la moyenne : 0.13 ± 0.03 °C par décennie au lieu de 0.07 ± 0.02 °C par décennie. Les températures moyennes de la basse troposphère, mesurées par satellite, ont augmenté de 0.13 à 0.22 °C par décennie depuis 1979.

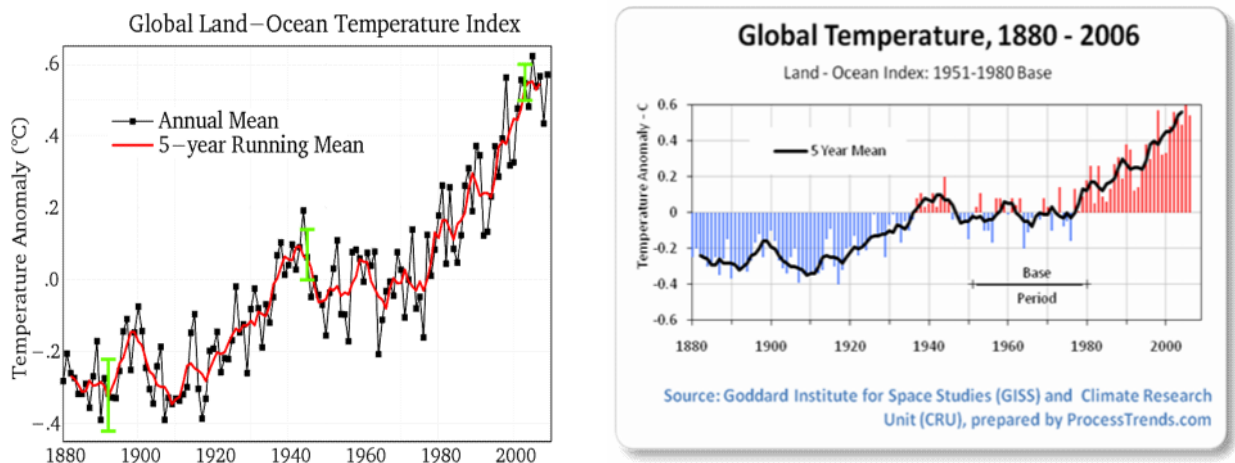


Figure 1.2: Variation de température de la surface terrestre par rapport à la période 1950-1980.

Les commentaires portant sur des périodes trop brèves, surtout lorsqu'il s'agit des années les plus proches, font l'objet de nombreuses controverses et mieux vaut les éviter. C'est ainsi qu'en 1998 El Niño était anormalement fort et, par conséquent, largement responsable des hautes températures observées.

Les changements de température concernent l'ensemble de la planète. Depuis 1979 la température augmente deux fois plus vite sur terre que sur mer, sans doute à cause de la différence de capacité calorifique et du fait que les océans s'évaporent plus quand leur température augmente. L'inertie thermique des océans fait qu'en réponse à une perturbation externe le climat prend beaucoup de temps à se stabiliser. La température augmente plus vite dans l'hémisphère nord que dans l'hémisphère sud: il compte plus de terres et une plus grande couverture de neiges et de glaces (qui réfléchissent le rayonnement solaire). Les gaz à effet de serre, bien qu'émis plus abondamment au nord qu'au sud, sont rapidement mélangés dans l'atmosphère et le réchauffement qu'ils causent est uniforme sur l'ensemble de la planète.

Le réchauffement observé au cours du dernier siècle est certes important mais n'a rien d'exceptionnel. Bien qu'avant le XIX^{ème} siècle on n'ait pas disposé de mesures aussi directes et précises qu'aujourd'hui, les évidences en faveur de changements importants de température sont nombreuses et concordantes. C'est ainsi que l'étude des sédiments déposés au fond de l'Atlantique Nord au cours des trois derniers millénaires (Figure 1.3) montre des variations de température de plusieurs degrés, en accord avec les évaluations faites à partir d'autres phénomènes et avec les changements d'activité solaire (voir plus bas).

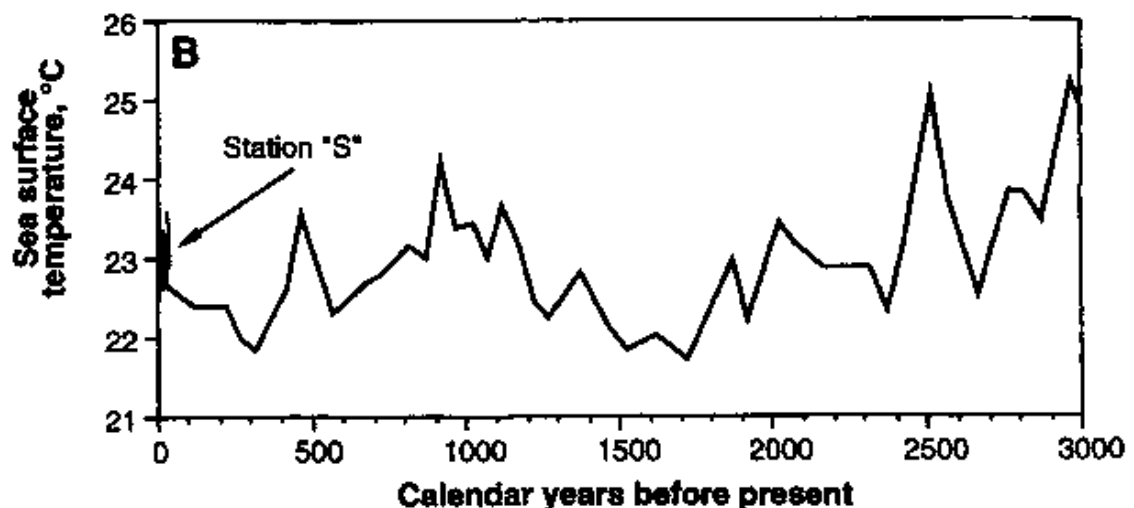


Figure 1.3: Variations de la température au cours des trois mille dernières années déduite de l'étude de sédiments déposés au fond de l'Atlantique Nord.

Augmentation du niveau des océans

L'augmentation de la température de la surface terrestre a pour conséquence une augmentation parallèle du niveau des océans, tant par dilatation de leur volume qu'à cause de la fonte des glaciers. Au cours du dernier siècle, leur niveau a augmenté d'environ 17 cm. Les conséquences sont nombreuses, en particulier en ce qui concerne les populations côtières de littoraux de basse altitude. Aussi serait-il important de disposer de prédictions fiables, ce qui n'est pas le cas aujourd'hui.

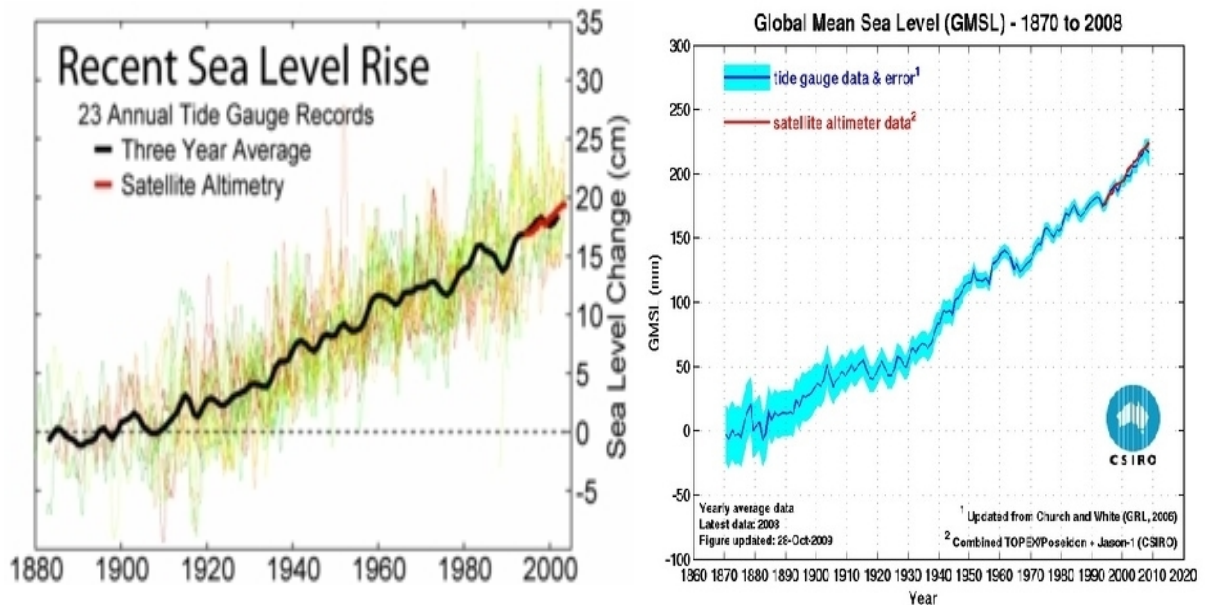


Figure 1.4: Augmentation du niveau des océans au cours du dernier siècle.

En effet, l'évaporation accrue des océans et l'accumulation de glaces sur l'Antarctique pourraient fort bien compenser l'augmentation due à la dilatation et à la fonte des glaciers et on ne saurait exclure qu'une influence tectonique importante soit la cause de l'augmentation actuelle du niveau des océans; il est d'ailleurs intéressant de remarquer que les fluctuations du niveau des océans sont anticorrélées à celles de la température (Figure 1.5 gauche).

Enfin, il convient de rappeler qu'à la suite de la dernière glaciation le niveau des mers a considérablement augmenté (Figure 1.5 droite).

Diminution de la couverture glaciaire

Les couvertures glaciaires du Groenland et de l'Antarctique sont en train de diminuer comme l'ont montré des mesures effectuées depuis 2002. Il en est de même de la couverture glaciaire de l'Océan Glacial Arctique, étudiée par mesures satellitaires

et par observation sous-marine directe, qui diminue considérablement tant en surface qu'en épaisseur (Figures 1.6 et 1.7).

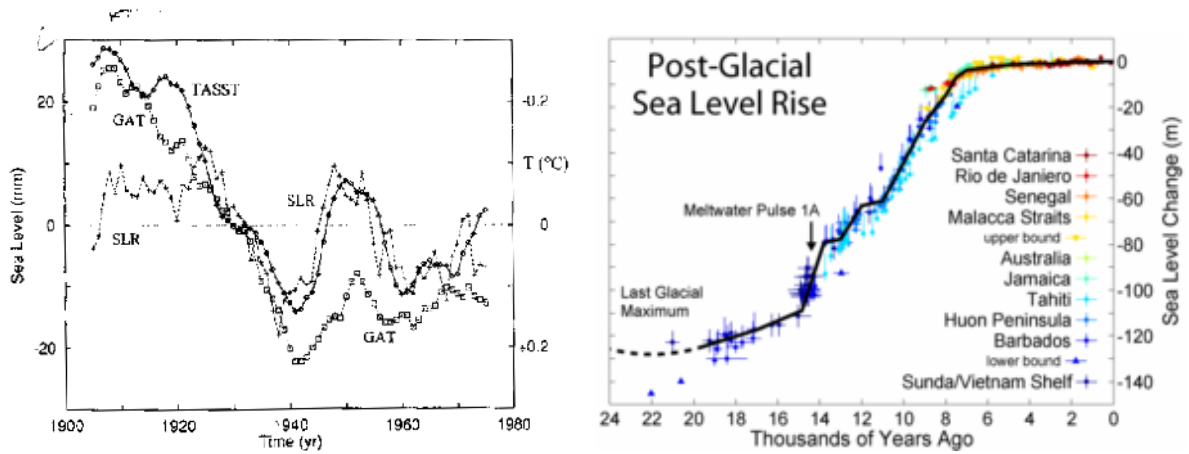


Figure 1.5: A gauche : Températures moyennes globales (GAT) et températures moyennes maritimes tropicales (TASST) (échelle de droite inversée) sont comparées à l'augmentation du niveau des océans (SLR, échelle de gauche) sur la période 1900-1980. A droite : Augmentation du niveau des mers sur vingt-deux millénaires (depuis la dernière glaciation).



Figure 1.6: Illustrations de la fonte des glaces au Nord. La photographie de gauche montre l'écoulement de l'eau de fonte des glaces du Groenland.

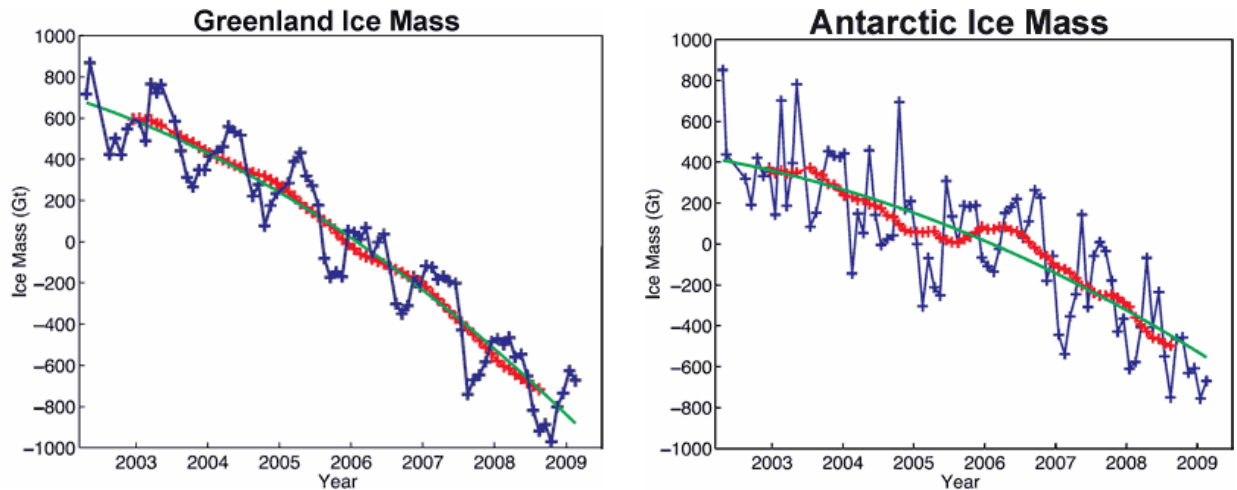


Figure 1.7 : Décroissance de la masse glaciaire au cours de la dernière décennie au Groenland (à gauche) et dans l'Antarctique (à droite). Les croix bleues sont les données brutes, les croix rouges sont moyennées sur treize mois et la ligne verte est la fonction du second degré donnant la meilleure description des données.



Figure 1.8: Le glacier du Rhône (Suisse) de 1859 à 2001 (en haut) et le glacier de Plasterze (Autriche) de 1875 à 2003.

Enfin, partout sur la planète, les glaciers raccourcissent que ce soit dans les Alpes, l'Himalaya, les Andes, les Montagnes Rocheuses, l'Alaska ou l'Afrique. Alors que les glaciers s'étaient allongés et épaissis entre 1550 et 1850, ils s'amincissent de quelque 30 cm par an depuis le milieu du XX^{ème} siècle (Figures 1.8 et 1.9).

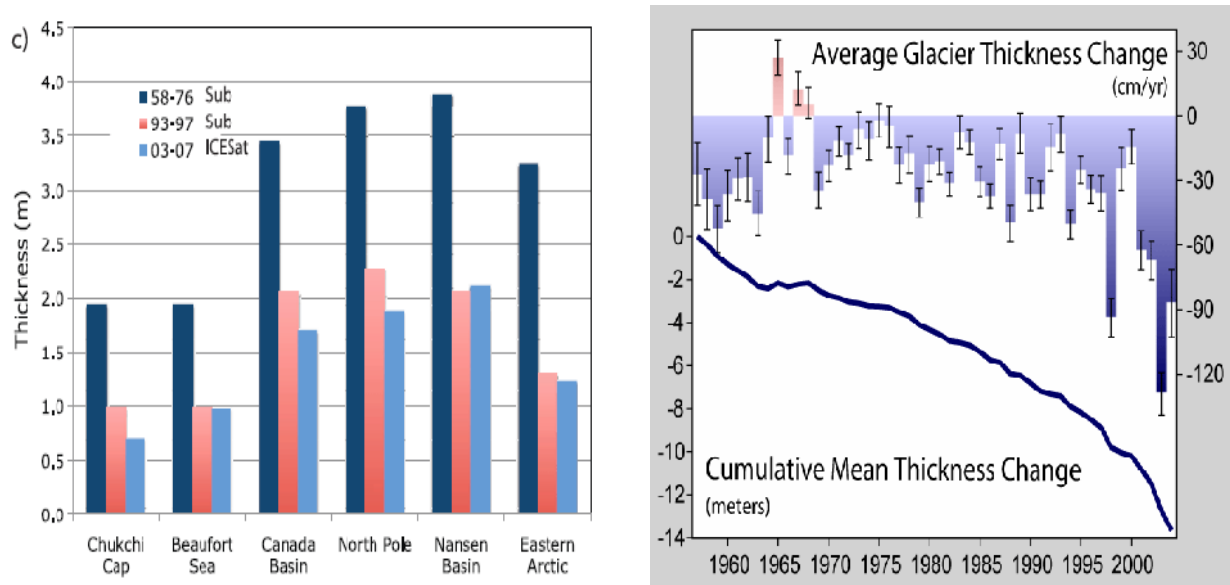


Figure 1.9 : A droite: trois séries successives de mesures de l'épaisseur de la couverture glaciaire nordique de 1958 à 2007 ; à gauche : Décroissance de l'épaisseur de la couverture glaciaire nordique (échelle de gauche) et taux annuel de décroissance (échelle de droite). Les mesures incluent des mesures satellitaires et sous-marines.

1.2 Gaz à effet de serre

L'effet de serre

Les gaz à effet de serre sont des gaz contenus dans l'atmosphère terrestre qui émettent et absorbent de façon sensible dans l'infrarouge (Figure 1.10). Ils contribuent fortement à l'élévation de la température de la surface terrestre car ils sont transparents au rayonnement solaire incident et absorbent le rayonnement infrarouge réémis par la Terre.

Les plus importants sont la vapeur d'eau, le gaz carbonique, le méthane et l'ozone. Leurs contributions à l'effet de serre sont respectivement de $54 \pm 18\%$, $18 \pm 8\%$, $6 \pm 3\%$ et $5 \pm 2\%$.

La vapeur d'eau joue un rôle essentiel dans l'équilibre thermique de la planète. Récemment, depuis 1990, sa concentration dans la stratosphère a subi des variations

importantes qui ont sans doute contribué de façon sensible aux variations de température mesurées dans la même période.

L'activité humaine, depuis la révolution industrielle à la fin du XVIII^{ème} siècle, a causé une augmentation importante (Figures 1.11 et 1.12 gauche) de la concentration de gaz à effet de serre dans l'atmosphère, et particulièrement du gaz carbonique produit par la combustion de combustibles fossiles, charbon et pétrole. Les concentrations de gaz carbonique et de méthane ont augmenté de 36 et 148% respectivement depuis 1750. Au cours des vingt dernières années, on estime que la combustion de fossiles en est responsable au niveau de trois quarts, la déforestation étant responsable du quart restant.

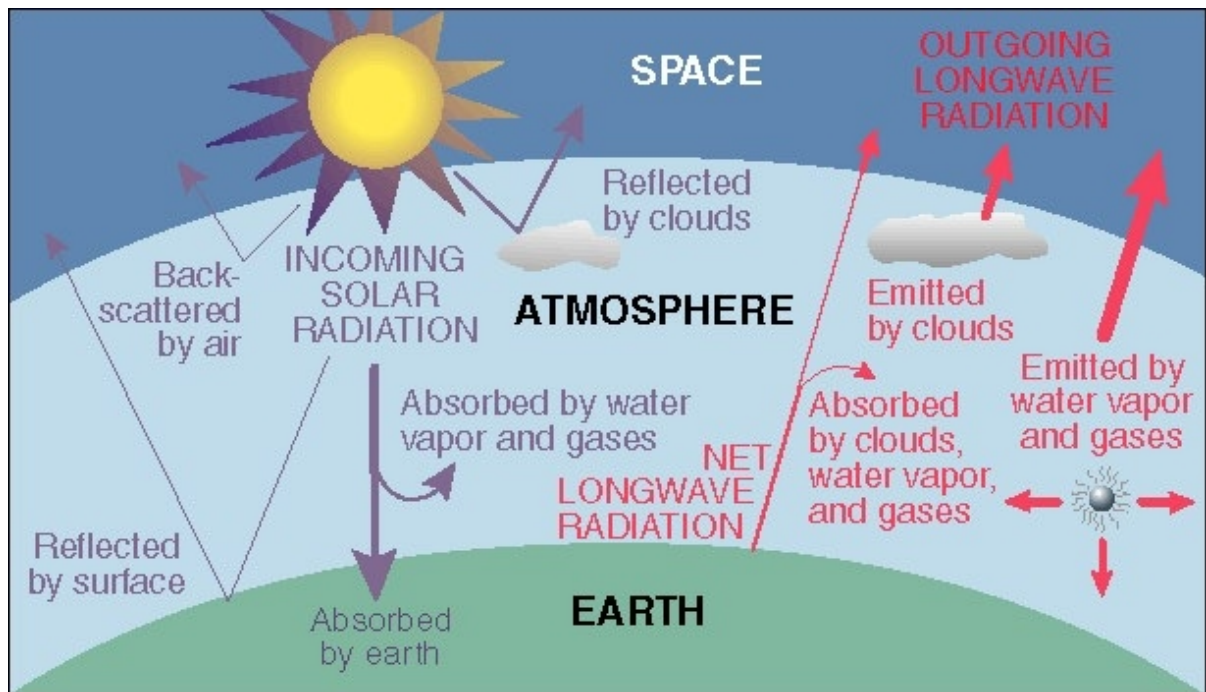


Figure 1.10: Description schématique de l'effet de serre

Les données historiques disponibles (glaces) montrent des concentrations moindres sur les derniers 650'000 ans, ce qu'on considère comme évidence de l'origine anthropique de l'augmentation (Figure 1.12 droite).

Si l'origine anthropique de l'augmentation de la concentration de gaz à effet de serre dans l'atmosphère terrestre au cours de l'ère industrielle ne fait aucun doute, il n'en est pas de même de son influence sur le réchauffement climatique. Comme on le verra plus bas, la corrélation entre l'augmentation de température et l'activité solaire est meilleure que celle entre l'augmentation de température et celle de la concentration de gaz carbonique dans l'atmosphère. Une autre raison de douter de l'origine anthropique du réchauffement climatique se trouve dans une comparaison entre

température et concentration en gaz carbonique basée sur les données disponibles dans les glaces de l'Antarctique (Figure 1.13). La température est estimée à partir de la concentration en ^{40}Ar et la concentration en gaz carbonique mesurée directement dans les bulles d'air emprisonnées dans la glace. Pour obtenir une bonne concordance entre les deux quantités autour des variations brusques observées il y a 240'000 ans à l'occasion de la fin de la période de glaciation, il est nécessaire d'avancer, et non retarder, la courbe du CO_2 de 800 ± 200 années. L'augmentation de la concentration en CO_2 ne peut donc pas être la cause de ce réchauffement particulier puisqu'elle suit, et non précède, l'augmentation de température.

Global Trends in Major Greenhouse Gases to 1/2003

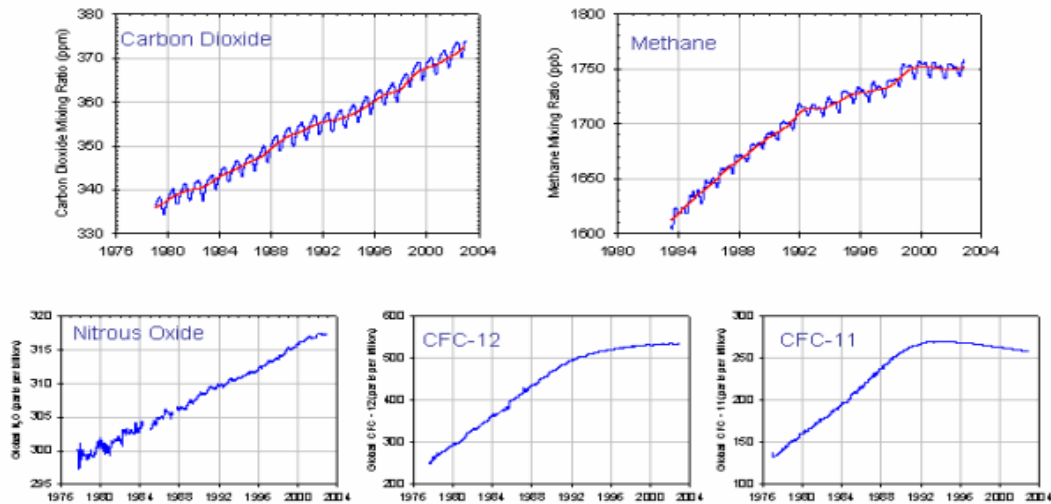


Figure 1.11: Augmentation des concentrations dans l'atmosphère des principaux gaz à effet de serre de 1976 à 2003.

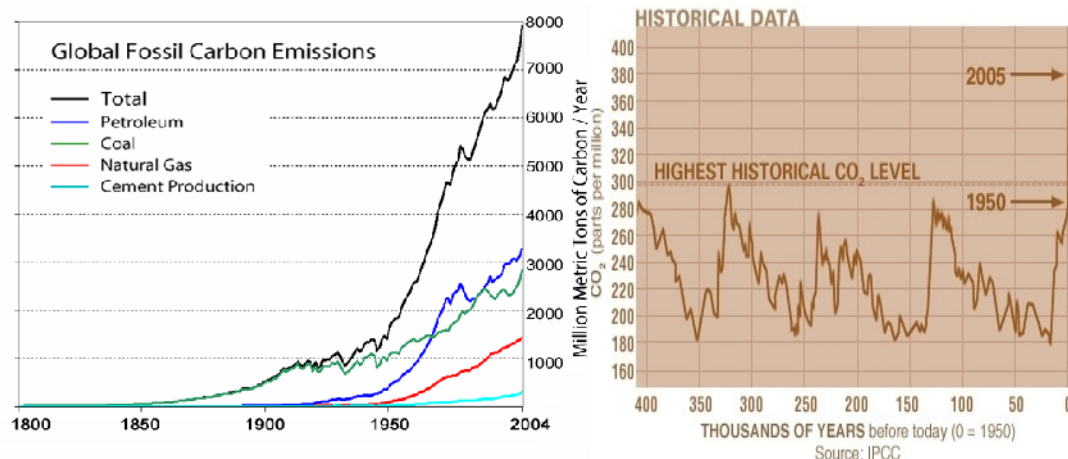


Figure 1.12 : A gauche, augmentation de la concentration des gaz à effet de serre depuis 1800. A droite, données historiques sur les 400 derniers millénaires mesurant la concentration en gaz carbonique.

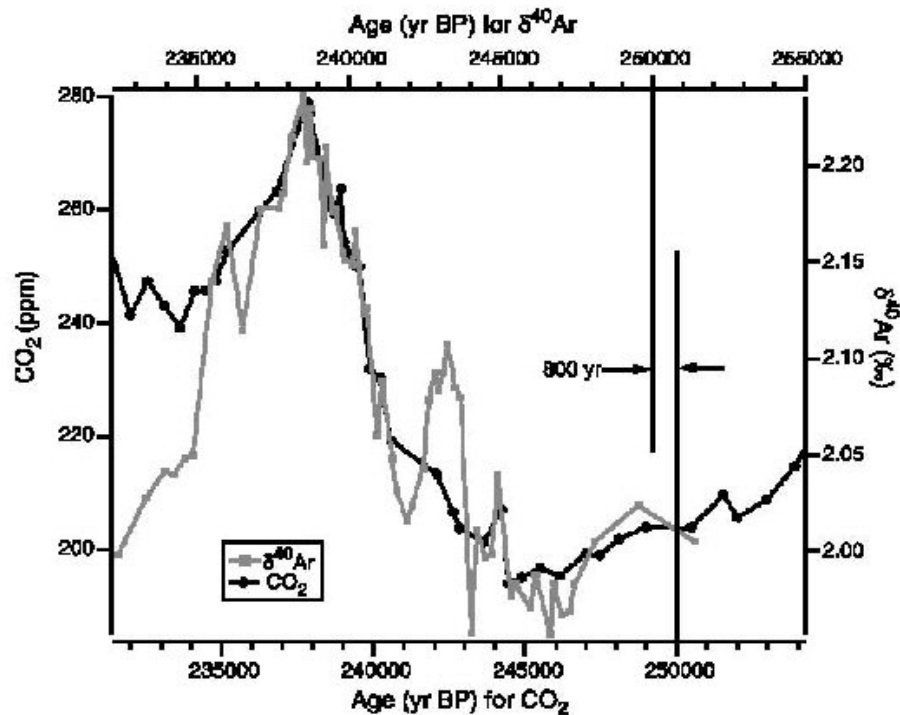


Figure 1.13: Comparaison entre température et concentration en gaz carbonique basée sur les données disponibles dans les glaces de l'Antarctique. Les données CO_2 ont été avancées (et non retardées) de 800 ans pour obtenir un bon accord.

1.3 Réchauffement climatique, activité solaire et rayons cosmiques

Corrélation entre activité solaire et température

Nombreuses sont les observations qui suggèrent l'existence d'une forte corrélation entre la température de la surface terrestre, l'activité solaire et les rayons cosmiques galactiques.

William Herschel fut le premier à suggérer une corrélation entre le nombre de taches solaires et la température en étudiant les variations du prix du blé en Angleterre. On sait d'autre part que la petite période glaciaire (Figure 1.14), qui couvre le XVII^{ème} siècle, coïncide avec le minimum de Maunder pendant lequel le Soleil était pratiquement dénué de taches (Figure 1.15).

La preuve quantitative d'une corrélation positive entre l'activité solaire et la température terrestre fut donnée par Friis-Christensen et Lassen en 1991. Ils utilisèrent

la longueur des cycles solaires (7 à 17 ans) comme mesure de son activité. Les cycles courts correspondent à une activité magnétique intense. L'accord avec les variations de la température continentale de l'hémisphère nord entre 1861 et 1989 est excellent (Figure 1.16). C'est précisément dans cette période, au cours de laquelle la température s'est élevée de quelque 0.6°C , que la concentration de gaz carbonique dans l'atmosphère terrestre, d'origine anthropique, a augmenté fortement.



Figure 1.14: La Tamise gelée en 1677.

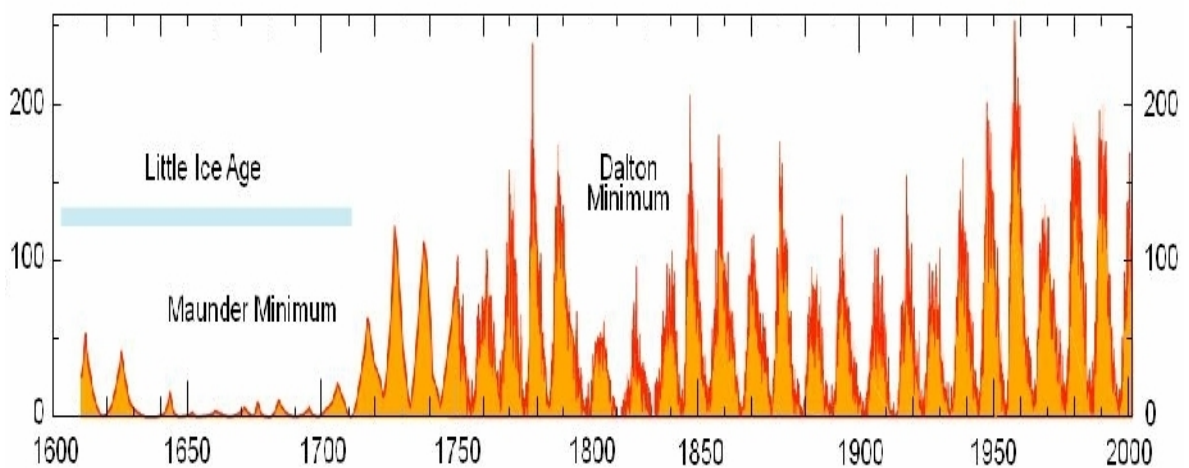


Figure 1.15: Variation du nombre de taches solaires de 1610 à 2001. Les minima de Maunder et Dalton sont associés à des périodes de grand froid.

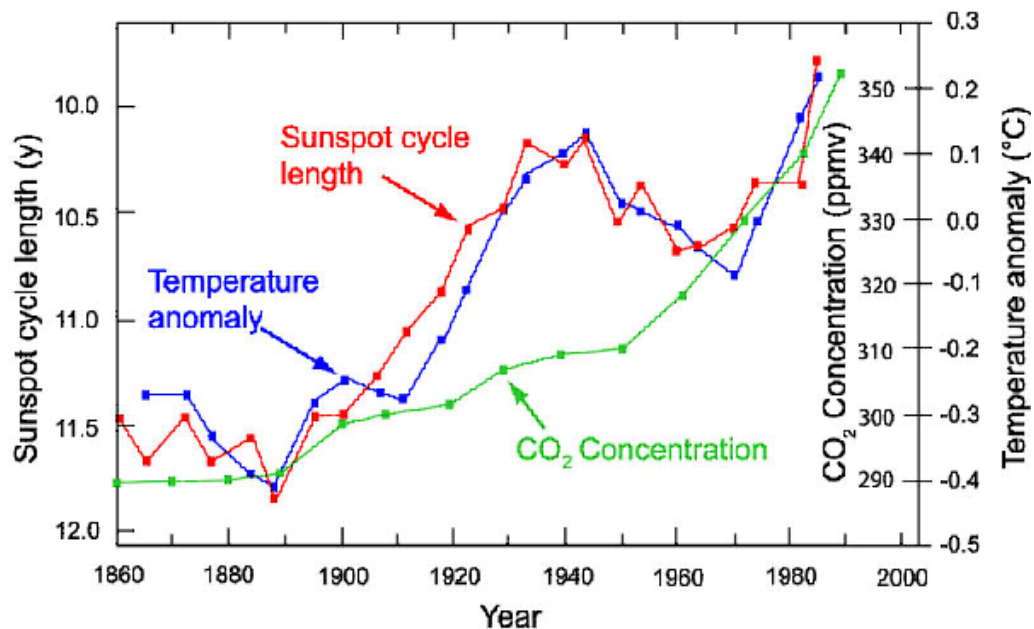


Figure 1.16: Variation de la longueur des cycles solaires (échelle de gauche inversée), de la température terrestre et de la concentration en CO_2 (échelle de droite) dans l'hémisphère nord de 1861 à 1989.

Le résultat de Friis-Christensen et Lassen semble suggérer que le réchauffement climatique observé depuis le début du siècle dernier serait, au moins partiellement, d'origine solaire et que l'augmentation de concentration de CO_2 , d'origine anthropique, qui couvre la même période serait une pure coïncidence. Mais une telle conclusion semble improbable puisque le flux de rayonnement solaire atteignant la Terre ne varie que de 0.1% entre maxima et minima d'activité solaire; en effet, la diminution de luminosité à l'intérieur des taches solaires est presque totalement compensée par une augmentation de luminosité au bord des taches.

Ce n'est qu'en 1997 qu'un article de H. Svensmark et E. Friis-Christensen proposa une interprétation raisonnable: ce serait par l'intermédiaire des rayons cosmiques galactiques que le Soleil influencerait sur le climat terrestre. Le flux de rayons cosmiques atteignant la Terre est en effet modulé par les variations du champ magnétique interplanétaire, lui même modulé par le vent solaire dont l'intensité dépend fortement de l'activité solaire. Dans la mesure où les rayons cosmiques galactiques contribuent de façon non négligeable à la formation des nuages, le climat, qui dépend de la couverture nuageuse, serait donc indirectement corrélé à l'activité solaire. Plus d'activité implique moins de rayons cosmiques, donc moins de nuages, donc des températures plus élevées en accord avec les observations.

Les nuages couvrent en moyenne sur une année 65% de la surface du globe et sont responsables d'un refroidissement d'environ 30 Wm^{-2} , si bien que des variations à long terme de seulement quelques pour cent pourraient avoir une influence notable sur le climat.

Des données du International Satellite Cloud Climatology Project et de l'Observatoire de rayons cosmiques de Huancayo montrent une corrélation remarquable entre la présence de nuages bas (moins de 3 km) et le flux de rayons cosmiques (Figure 1.17). Pour expliquer une influence préférentielle sur les nuages de basse altitude, on invoque le fait qu'à haute altitude l'atmosphère est de toutes façons saturée de rayons cosmiques et les variations de flux n'y auraient pas d'effet.

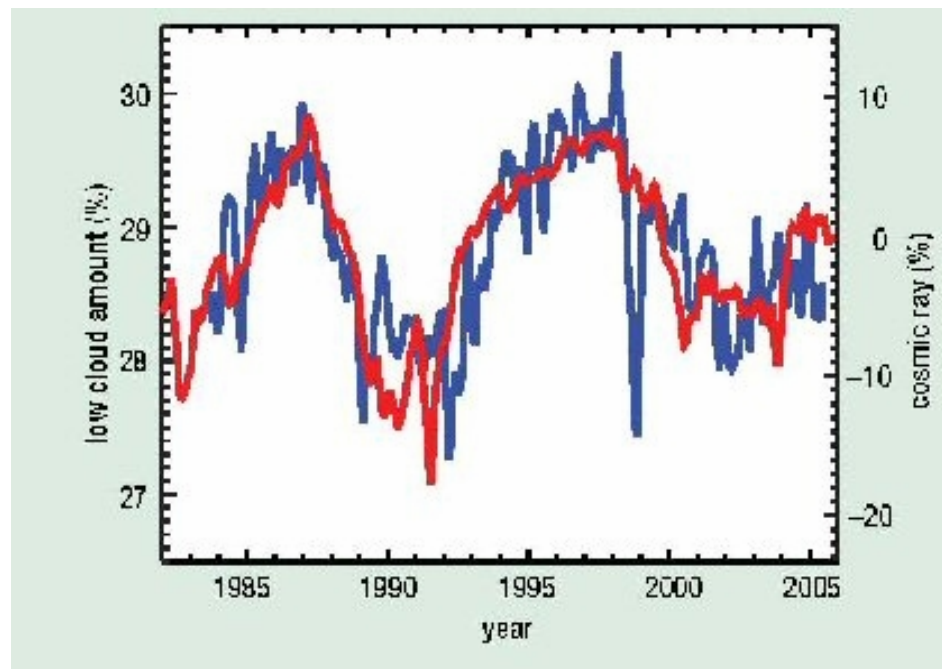


Figure 1.17: Rayons cosmiques et nuages bas. La ligne bleue indique la variation de la couverture nuageuse globale mesurée par satellite. La ligne rouge indique la variation mensuelle du flux de rayons cosmiques mesuré par la station de Huancayo.

Quant à l'influence de l'activité solaire sur le flux de rayons cosmiques, c'est un fait bien connu et bien compris : c'est le champ magnétique transporté par le vent solaire qui modifie le champ interplanétaire et par conséquent l'énergie limite que doit posséder un rayon cosmique pour atteindre la Terre : un minimum d'activité solaire est associé à un maximum de température (Figure 1.18).

Une corrélation similaire est observée entre la température troposphérique globale mesurée par radiosonde et le flux de rayons cosmiques (Figure 1.19).

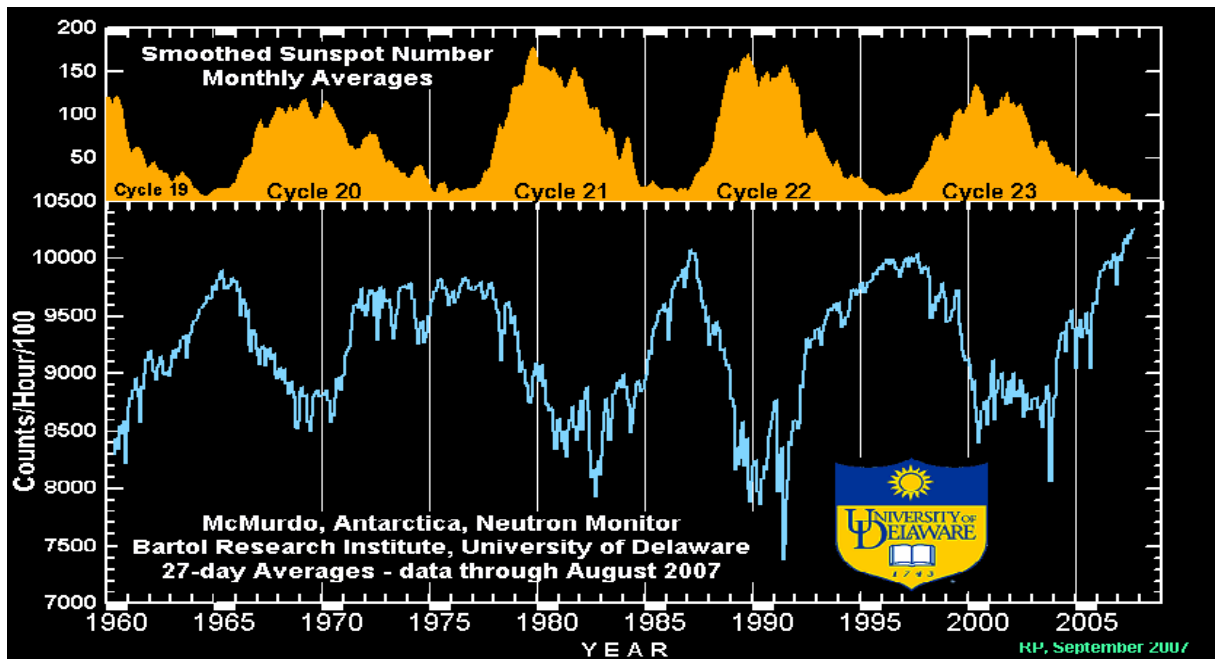


Figure 1.18: Variation du nombre de taches solaires et du flux de rayons cosmiques entre 1960 et 2007.

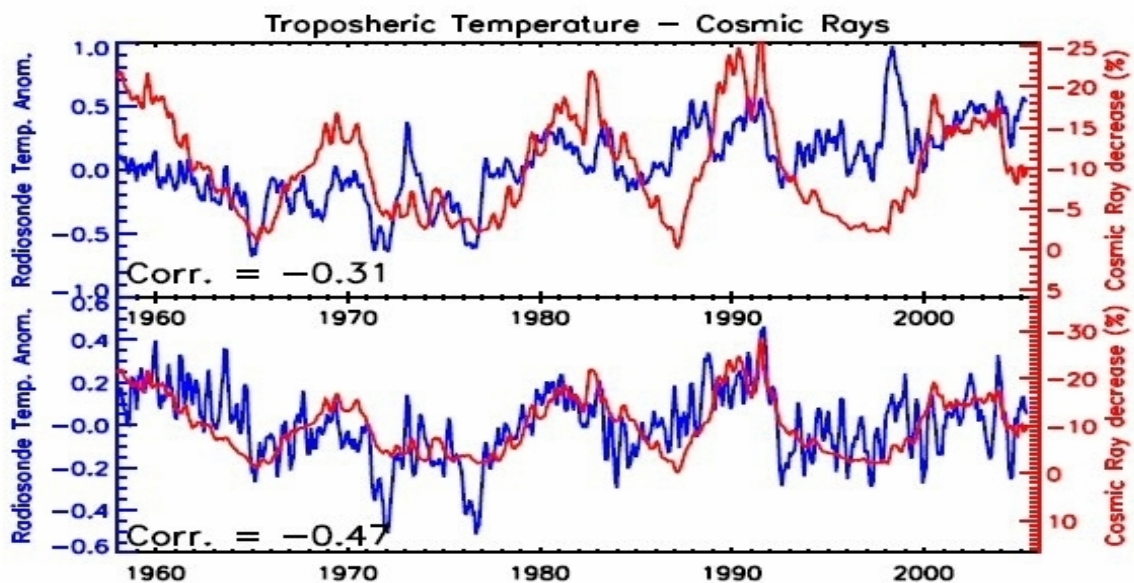


Figure 1.19: Comparaison entre la température troposphérique (bleu) et le flux cosmique (rouge). Le panneau du bas est corrigé pour des effets tels que El Niño et les aérosols volcaniques.

La corrélation entre flux cosmique et température se retrouve sur des périodes de centaines de millions d'années. N. Shaviv et J. Veizer l'ont étudiée sur 520 millions d'années en se basant sur les informations contenues dans des coquillages marins. Le Soleil traverse les bras de la Voie Lactée tous les 140 millions d'années: la proximité de nombreuses enveloppes de supernovae, sites d'accélération des rayons cosmiques, cause alors une augmentation du flux cosmique dix fois plus importante que celle induite par le cycle solaire tous les onze ans. Les quatre traversées des bras de la Galaxie sont en effet associées (Figure 1.20) à une augmentation du flux cosmique et une diminution de la température.

Malgré les observations de Svensmark et Friis-Christensen, on n'a pas encore su établir de façon convaincante un lien direct entre rayons cosmiques et formation des nuages. Une expérience sur accélérateur cherchant à le faire est actuellement en opération au CERN. Plusieurs critiques peuvent être faites aux arguments présentés plus haut : les données satellitaires réunissent plusieurs ensembles de données dont l'intercalibration est délicate, elles sont limitées aux océans et excluent les régions polaires, elles correspondent essentiellement à des observations diurnes.

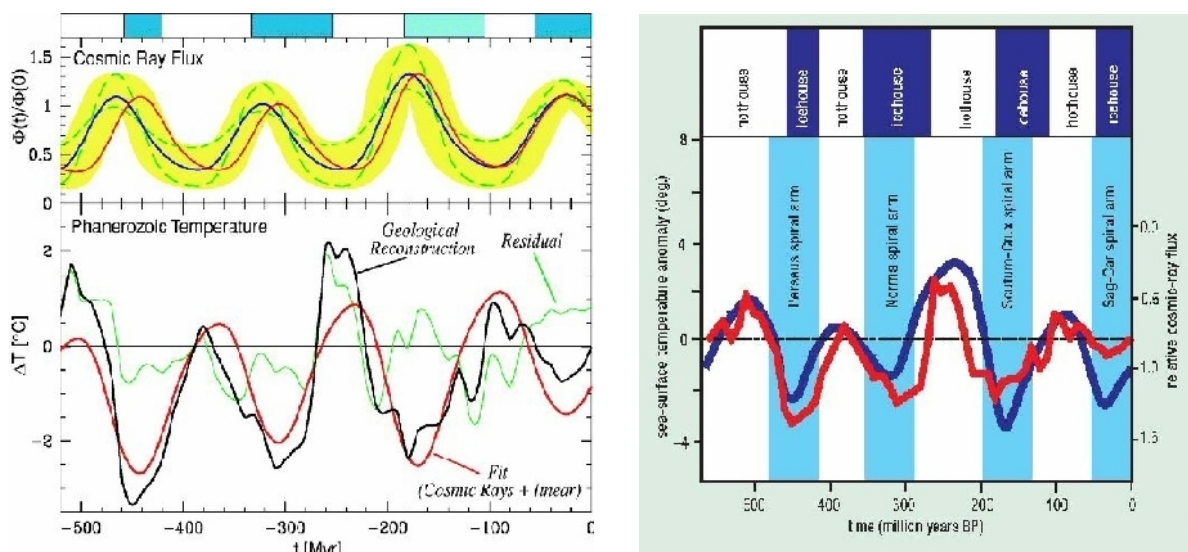


Figure 1.20: Variation du flux de rayons cosmiques de la température tropicale sur les derniers 520 millions d'années. Les courbes en haut à gauche donnent le flux cosmique (CRF) mesuré par datation sur des météorites. Les courbes du bas à gauche donne la température mesurée par analyse de coquillages calciques (courbe noire). Les variations obtenues sont reproduites à droite où l'on a indiqué les périodes de croisement avec les bras de la Voie Lactée.

L'observation d'une corrélation, pour forte soit-elle, ne prouve pas une relation de cause à effet. D'autres effets, jusqu'ici peu explorés pourraient jouer un rôle

comme, par exemple, le rayonnement solaire dans l'ultra-violet. L'augmentation des variations de production de nuage avec l'altitude, bien que cohérente avec le modèle des rayons cosmiques, pourrait être plus simplement due à des variations de température avec la latitude, de circulation atmosphérique, d'aérosols, etc... La plus grande prudence est donc de rigueur.

1.4 Conclusion

La Terre a connu au cours du XX^{ème} siècle un réchauffement de trois quarts de degrés. Bien que de tels réchauffements se soient déjà produits par le passé, l'importance de certaines de ses conséquences (immersion de littoraux de basse altitude, déficit d'eau douce dû à la récession des glaciers) justifie qu'on attache la plus grande importance à la compréhension des mécanismes qui en sont la cause afin de prédire son évolution future, d'apprendre à s'en accommoder et, dans la mesure où l'on en est capable, de la modifier.

Pendant cette même période, qui coïncide avec l'ère d'industrialisation née à la fin du XIX^{ème} siècle, la concentration de gaz à effet de serre dans l'atmosphère terrestre, résultat de la combustion de combustibles fossiles et de la déforestation, a fortement augmenté (près de 40% dans le cas du gaz carbonique). Aussi est-il tentant d'attribuer une relation causale entre ces deux observations et de penser que le réchauffement climatique observé puisse être le résultat de l'augmentation, d'origine anthropique, de la concentration de gaz carbonique dans l'atmosphère terrestre.

Cette conclusion est cependant loin d'être prouvée car une autre explication, celle-ci indépendante de l'activité humaine, est plausible : le réchauffement climatique serait dû à l'augmentation d'activité solaire pendant le siècle dernier. En effet, on a depuis longtemps remarqué qu'il existait une forte corrélation entre l'activité solaire et le climat, les périodes de faible activité, comme le minimum de Maunder, étant associées à des températures particulièrement basses. De fait, la corrélation observée au cours du XX^{ème} siècle entre température et activité solaire est plus forte et plus nette que celle observée entre température et concentration de gaz carbonique dans l'atmosphère.

On voit mal comment les très faibles changements que connaît la luminosité solaire pendant un cycle solaire pourrait avoir la moindre influence sur le climat. Mais une action indirecte, par l'intermédiaire des rayons cosmiques, semble plausible. L'activité solaire implique une augmentation du vent solaire, donc du champ magnétique interplanétaire, donc une diminution du flux de rayons cosmiques galactiques susceptibles d'atteindre la Terre, donc une diminution de la couverture nuageuse (dans la mesure où l'ionisation due aux rayons cosmiques contribue de façon notable à la formation de nuages), donc enfin une élévation de la température.

Trop d'incertitudes sont attachées à ces mécanismes pour pouvoir affirmer

aujourd'hui que les rayons cosmiques jouent un rôle essentiel dans le réchauffement climatique observé au XX^{ème} siècle, mais au moins autant d'incertitudes sont attachées à une interprétation anthropique faisant de l'effet de serre induit par l'augmentation de la concentration de gaz carbonique dans l'atmosphère la cause principale de ce réchauffement. S'il est bon que les hommes aient enfin pris conscience de la fragilité de l'équilibre qui permet leur survie et de l'importance qu'il faut attacher à sa préservation, on peut regretter que la politisation et la médiatisation attachées à ces questions en empêchent une analyse sereine et rationnelle et conduisent à des conclusions trop hâtives et peut-être erronées.

2. LE SOLEIL

2.1 Propriétés générales

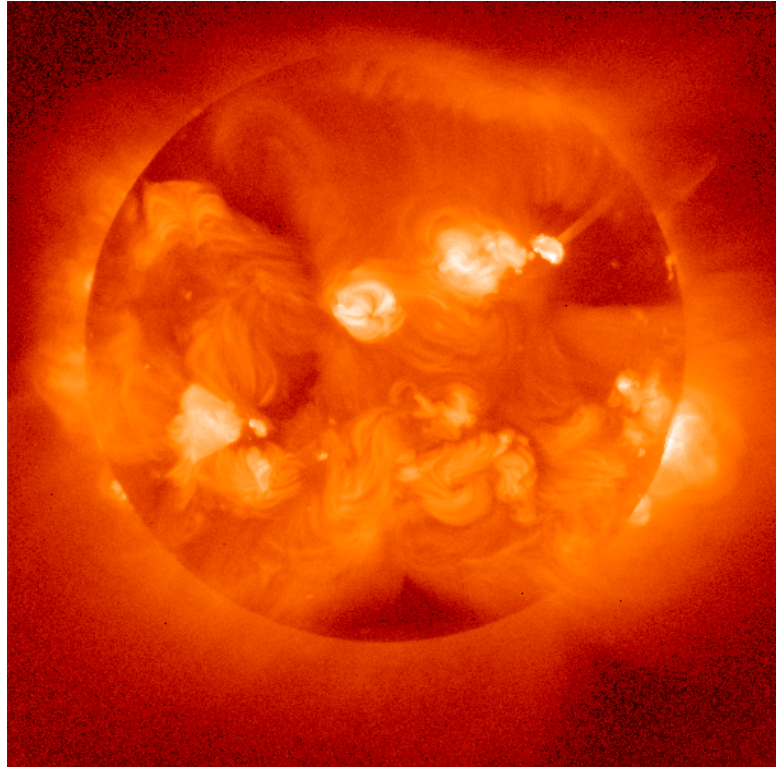


Figure 2.1: Le soleil vu en rayon X

Le Soleil, au centre du système solaire, est né voici quelque cinq milliards d'années de l'effondrement gravitationnel d'un nuage moléculaire. Il est situé à 8.3 minutes de lumière (par définition une unité astronomique) de la Terre. C'est une étoile de la séquence principale avec une température de surface de ~ 5.8 kK. L'énergie qu'il rayonne alimente la vie sur terre par photosynthèse et gouverne le climat et le temps.

Le Soleil produit son énergie par fusion des protons en particules α . Il y a plus de 10^{11} étoiles du même type dans la Voie Lactée. Il est fait d'hydrogène ($\sim 74\%$ en masse), d'hélium ($\sim 24\%$ en masse), et de traces d'autres éléments. Son spectre contient des raies d'atomes métalliques, ionisés ou non, et quelques raies de l'hydrogène d'intensité faible. La couronne solaire diffuse continûment à haute température dans l'espace sous la forme du vent solaire, un flux supersonique de particules chargées qui atteint quelques centaines d'unités astronomiques (AU). Il se déplace sur une orbite circulaire autour du centre de la Voie Lactée à un rayon de quelques 25,000 années lumières et à une vitesse de 250 km dans la direction du Cygne (un tour complet en près de 250 millions d'années). Le Soleil continuera à brûler son

hydrogène pendant encore cinq autres milliards d'années, après quoi il deviendra une géante rouge avant que son cœur ne s'effondre en naine blanche et que son enveloppe ne donne une nébuleuse.

2.2 Structure du Soleil

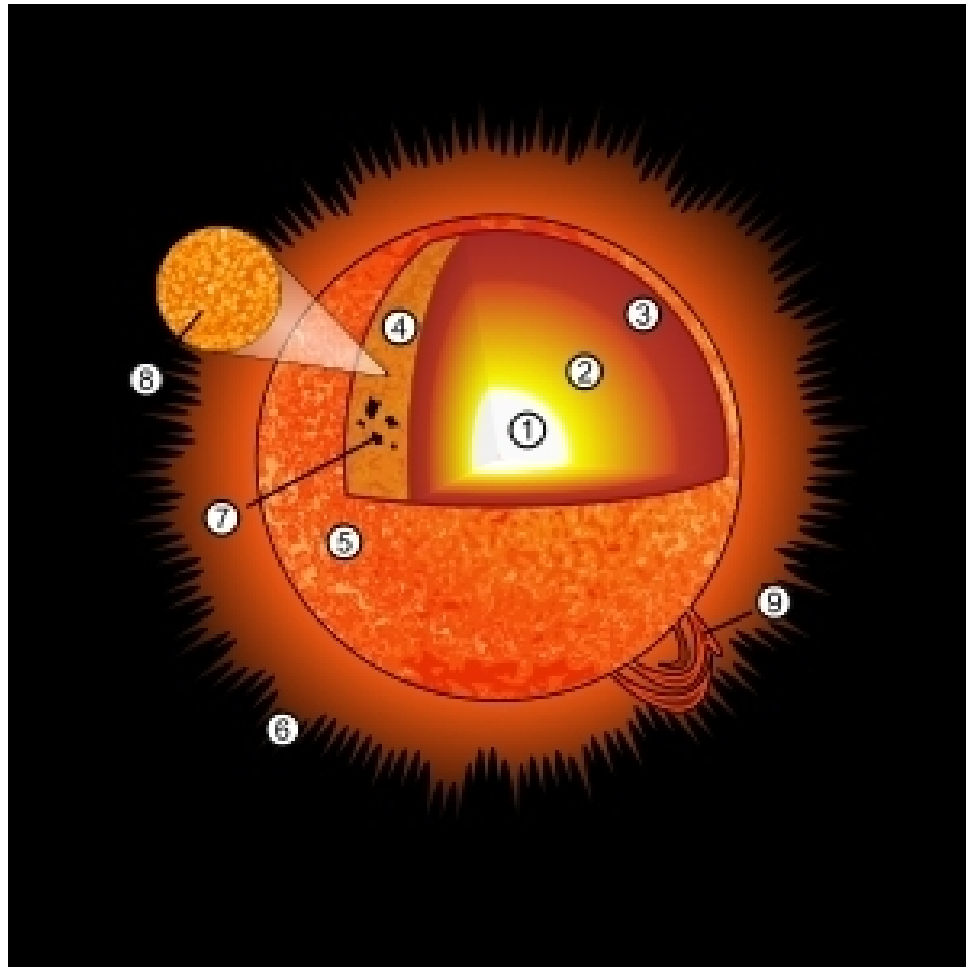


Figure 2.2 : Structure du Soleil: 1. Cœur; 2. Zone radiative; 3. Zone de convection; 4. Photosphère; 5. Chromosphère; 6. Couronne; 7. Taches solaires; 8. Granules; 9. Protubérances.

Le Soleil est une étoile jaune de la séquence principale comptant pour quelque 99.86% de la masse totale du système solaire. Il a la forme d'une sphère presque parfaite. Comme il est constitué d'un plasma, il tourne plus vite sur lui-même à l'équateur qu'aux pôles. Les périodes de rotation sont de 25.6 jours à l'équateur et de

33.5 jours aux pôles. Toutefois, comme la Terre elle-même tourne autour du Soleil, la période de rotation moyenne vue de la Terre est de 28 jours.

Le Soleil est une étoile de la Population I, donc riche en éléments lourds. C'est sans doute l'onde de choc d'une (ou plusieurs) supernova qui a déclenché l'effondrement du nuage dont il est né. C'est du moins ce que suggère l'abondance d'éléments lourds, tels que l'or et l'uranium, qui sont très rares chez les étoiles de la Population II.

Le Soleil n'a pas un bord très franc, au voisinage de sa surface la densité décroît exponentiellement en fonction du rayon. Néanmoins, il a une structure interne bien définie. Le rayon du Soleil est défini comme étant celui de la photosphère, c'est-à-dire de la couche au dessus de laquelle les gaz sont trop froids ou trop dilués pour rayonner une quantité importante de lumière: c'est le bord interne de cette couche que l'on voit à l'œil nu.

L'intérieur du Soleil n'est pas directement observable et le Soleil proprement dit est opaque aux ondes électromagnétiques. Cependant, de la même façon que la sismologie apprend la structure interne de la Terre par les ondes sismiques associées aux tremblements de terre, l'hélioséismologie utilise les ondes de pression infrasoniques qui se propagent dans le Soleil pour observer et mesurer sa structure interne. Des modèles numériques du Soleil ont été développés et permettent d'extrapoler vers son centre.

2.2.1 Le cœur

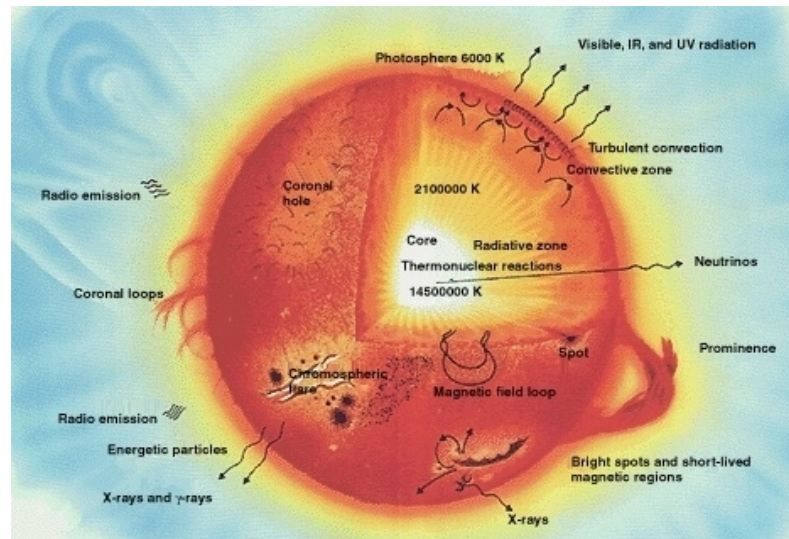


Figure 2.3: Vue schématique de la structure interne du Soleil.

Le cœur du Soleil s'étend du centre à quelque 0.20 à 0.25 rayons solaires. Il a une densité atteignant 150 g/cm^3 et une température proche de 13.6 MK (alors que sa

surface n'est qu'à 5.8 kK). Pendant la majorité de son existence en tant qu'étoile, il produit son énergie par fusion nucléaire en une suite de réactions qu'on appelle le cycle p-p, convertissant ainsi l'hydrogène en hélium. Moins de 2% de l'hélium produit l'est par l'intermédiaire du cycle CNO. Ce n'est que dans le cœur que l'énergie nucléaire est produite: le reste de l'étoile est simplement chauffé par la chaleur qui s'écoule du cœur vers la périphérie. Avant d'être rayonnée dans l'espace, cette énergie est plusieurs fois absorbée et réémise au cours de son voyage à l'intérieur de l'étoile.

Chaque seconde, quelques 10^{38} protons sont convertis en noyaux (sur les $\sim 10^{57}$ que contient le Soleil). La densité moyenne de puissance est de l'ordre de 0.2 mW/kg de matière, mais la densité de puissance dans le cœur est 150 fois plus élevée. Par comparaison, le corps humain produit de l'ordre de 1.3 W/kg, soit environ 600 fois plus que le Soleil par unité de masse. La densité dans le cœur est donc relativement faible : environ 0.27 W/m^3 , soit bien moins que ce que produit une bougie dans un mètre cube. Le taux de fusion nucléaire dépend fortement de la pression et de la température, si bien que dans le cœur on trouve un équilibre thermique stable: une petite augmentation du taux de fusion augmente la température du cœur et le fait se dilater, réduisant ainsi le taux de fusion. Au contraire, une petite diminution du taux de fusion implique une contraction du cœur et un échauffement.

Quelques millimètres de plasma solaire suffisent à absorber le rayonnement émis dans les réactions de fusion qui se trouve ainsi réémis isotropiquement à une énergie légèrement plus faible: le temps qu'il faut au rayonnement produit dans le cœur pour atteindre la surface est donc très long, entre dix mille et soixante-dix mille années selon les estimations.

Après avoir franchi la couche externe convective, les photons atteignent la couche extérieure transparente et s'échappent dans l'espace sous forme de lumière visible. Pour un photon de haute énergie produit dans le cœur, on a plusieurs millions de photons visibles ainsi rayonnés. Les réactions de fusion produisent aussi des neutrinos qui n'interagissent que très faiblement avec la matière et s'échappent instantanément.

2.2.2 Zone radiative

Entre ~ 0.25 et ~ 0.7 rayons solaires, le plasma est très chaud et assez dense pour que le rayonnement thermique suffise à transférer la chaleur produite vers l'extérieur. Dans cette zone, bien que le plasma se refroidisse vers les plus grands rayons (de 7 MK à environ 2 MK), le gradient de température ne suffit pas à permettre l'établissement de convection. Le transport de chaleur est exclusivement radiatif - les ions d'hydrogène et d'hélium émettant des photons qui sont rapidement absorbés avant que d'autres soient réémis. La densité décroît d'un facteur 100 (de 20 g/cm^3 à seulement 0.2 g/cm^3) de l'intérieur à l'extérieur de la zone radiative.

Entre la zone radiative et la zone de convection, on trouve une couche appelée tachocline. C'est là que s'effectue la transition d'une rotation uniforme de la zone radiative vers une rotation différentielle de la zone de convection. Il en résulte d'importants effets de cisaillement, les couches successives glissant les unes sur les autres. Les mouvements du fluide s'accroissent vers l'extérieur, produisant vraisemblablement le champ magnétique solaire par effet dynamo.

2.2.3 Zone de convection

Dans la couche externe du Soleil, de 0.7 rayons solaires à la surface, le plasma n'est ni assez chaud ni assez dense pour transporter l'énergie thermique par rayonnement. C'est le domaine de la convection qui produit des colonnes d'échange thermique conduisant la matière chaude vers la photosphère. Cette matière, parvenue à la surface, se refroidit et replonge vers l'intérieur où elle se réchauffe à nouveau au contact de la zone radiative. Au niveau de la surface visible du Soleil, la température est descendue à 5.7 kK et la densité à seulement 0.2 g/m^3 .

Les colonnes thermiques de la zone de convection marquent la surface solaire d'une sorte de granulation. Les turbulences qui lui sont associées créent un effet dynamo local produisant des dipôles magnétiques sur toute la surface.

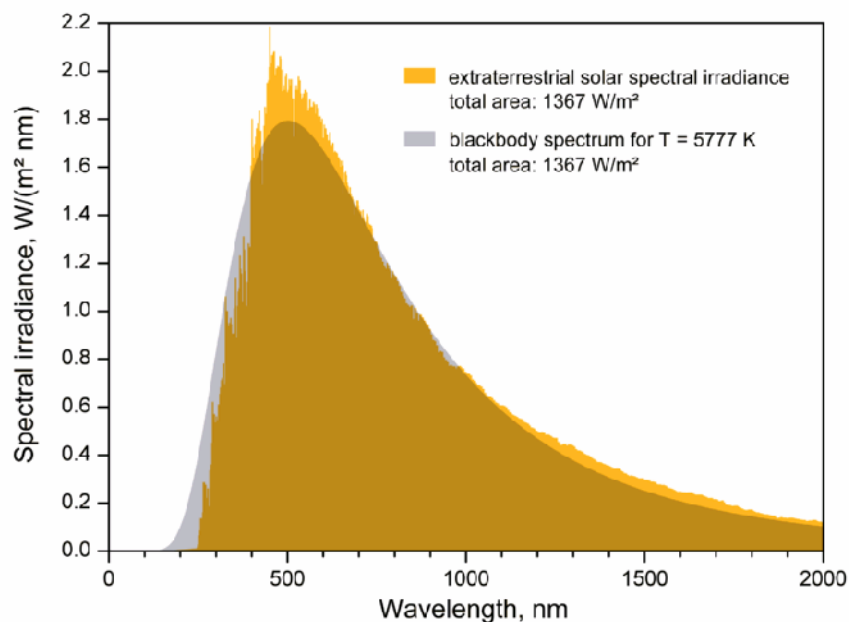


Figure 2.4: Le spectre solaire est comparé à celui du corps noir.

2.2.4 Photosphère

La température effective, ou température de corps noir du Soleil, 5777 K, est la température qu'aurait un corps noir de même taille pour rayonner la même puissance.

La photosphère, surface visible du Soleil, est la surface au dessous de laquelle le Soleil est opaque dans le visible. Au dessus de la photosphère, la lumière visible se propage librement dans l'espace et son énergie est complètement rayonnée. Le changement d'opacité est dû à la décroissance de la concentration en ions H^- , qui sont de bons absorbants des photons visibles. Inversement, la lumière visible qui nous parvient est produite par l'interaction d'électrons avec des atomes d'hydrogène, avec production d'ions H^- . L'épaisseur de la photosphère varie de plusieurs dizaines à plusieurs centaines de kilomètres, correspondant à une opacité légèrement inférieure à celle de l'atmosphère terrestre. Comme la partie externe de la photosphère est moins chaude que la partie interne, le Soleil semble être plus brillant au centre qu'à la périphérie. La lumière solaire a un spectre proche de celui d'un corps noir (~ 6 kK) sur lequel viennent se superposer des raies atomiques rayonnées par le haut de la photosphère. La photosphère a une densité de $\sim 10^{23}$ particules/m³, soit $\sim 1\%$ de celle de la Terre au niveau de la mer.

2.2.5 Atmosphère



Figure 2.5: Éclipse totale de Soleil révélant la couronne solaire.

Pendant une éclipse totale de soleil, on peut voir la couronne solaire à l'œil nu. Les parties du Soleil au dessus de la photosphère portent le nom collectif d'atmosphère solaire. On les voit sous toutes les longueurs d'onde, des ondes radio aux rayons gamma. On distingue cinq zones principales: le minimum de température, la chromosphère, la région de transition, la couronne et l'héliosphère. Cette dernière, qu'on peut considérer comme la haute atmosphère du Soleil, s'étend au delà de l'orbite de Pluton jusqu'à l'héliopause où elle forme un front de choc abrupt à la frontière de la matière interstellaire. La chromosphère, la région de transition et la couronne sont beaucoup plus chaudes que la surface solaire. Cette élévation de température est mal comprise mais on pense qu'elle est associée à la présence d'ondes de Alfvén qui ont suffisamment d'énergie pour chauffer la couronne.

La couche la plus froide du Soleil est celle du minimum de température, quelques 500 km au dessus de la photosphère, avec une température d'environ 4 kK. Cette température est assez basse pour permettre la présence de molécules simples telles que le monoxyde de carbone et l'eau. On les détecte par leur spectre d'absorption. Au dessus de la couche du minimum de température, la chromosphère a une épaisseur d'environ 2'000 km. Elle est caractérisée par un spectre riche en raies d'absorption et d'émission. Sa température augmente graduellement avec l'altitude, atteignant quelques 20 kK au sommet. Dans la couche supérieure de la chromosphère l'hélium est partiellement ionisé.

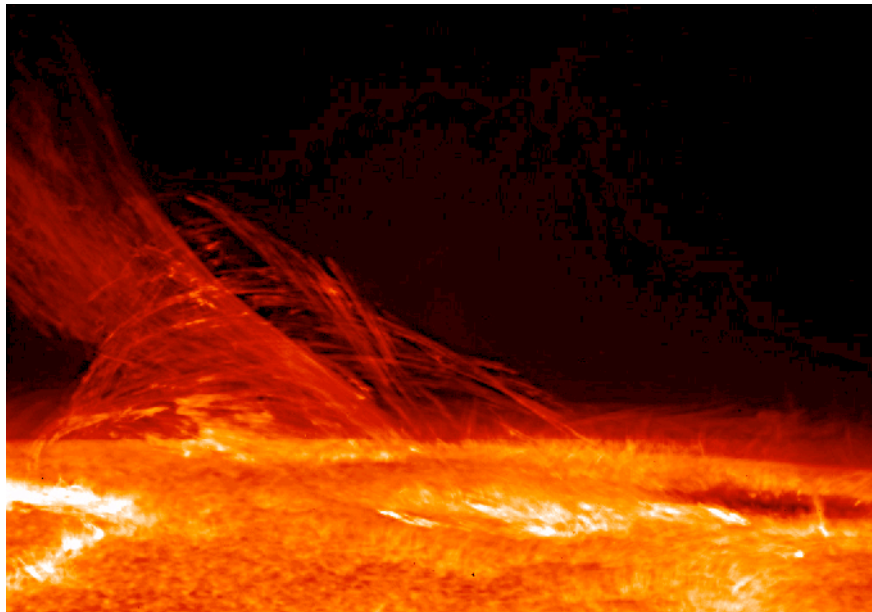


Figure 2.6: Photographie prise par le Hinode's Solar Optical Telescope le 12 Janvier 2007. Elle révèle la nature filamenteuse des plasmas qui connectent des régions de polarités magnétiques différentes.

Au dessus de la chromosphère la région de transition n'a qu'environ 200 km d'épaisseur. Sa température augmente rapidement des quelques 20 kK de la haute chromosphère des températures proches du mégaKelvin dans la couronne. L'augmentation de température est due en partie à l'ionisation complète de l'hélium dans la région de transition, réduisant sensiblement le refroidissement radiatif du plasma. La région de transition n'est pas une couche dont l'altitude est bien définie. Elle se traduit plutôt par des halos enveloppant les éléments turbulents de la chromosphère, spicules ou filaments, et est constamment animée d'un mouvement chaotique. Il est difficile de l'observer de la Terre, mais on peut facilement l'étudier depuis l'espace avec des détecteurs sensibles à l'ultraviolet lointain.

La couronne est la haute atmosphère du Soleil et occupe un volume bien plus grand que celui du Soleil proprement dit. Elle s'étend continûment dans l'espace en formant le vent solaire qui emplit la totalité du système solaire. La partie basse de la couronne, au voisinage de la surface solaire, a une densité de 10^{15} à 10^{16} particules/m³. La température moyenne de la couronne et du vent solaire est de 1 à 2 MK, atteignant 8 à 20 MK dans les régions les plus chaudes. On ne dispose d'aucune théorie permettant de rendre compte de la température de la couronne mais on sait qu'une partie de la chaleur qu'elle reçoit est associée à des reconnections magnétiques.

L'héliosphère, qui contient le vent solaire, s'étend d'environ 20 rayons solaires (0.1 AU) aux limites extrêmes du système solaire. Sa limite interne est définie comme étant là où le flux du vent solaire devient *superalfvénique*—c'est-à-dire plus rapide que les ondes d'Alfvén. Les turbulences et autres mouvements qui se produisent au delà de cette limite ne peuvent pas affecter la couronne parce que la vitesse de transmission d'un signal ne peut pas dépasser la vitesse d'Alfvén.

2.3 Champ magnétique

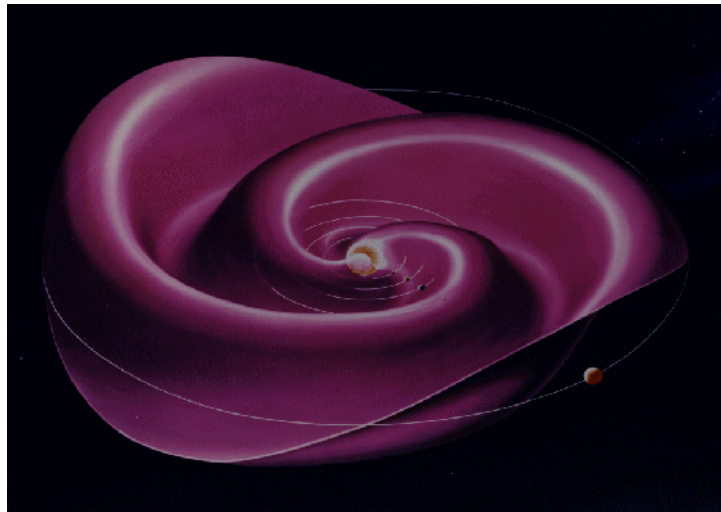


Figure 2.7: Structure en spirale du champ magnétique solaire.

Le vent solaire s'échappe radialement dans l'héliosphère, ce qui, combiné avec la rotation du Soleil, produit un champ magnétique de forme spirale s'étendant jusqu'à l'héliopause, à plus de 50 AU du Soleil. Ce champ magnétique en rotation agit sur les courants formés par les mouvements du plasma dans l'héliosphère.

2.3.1 Propriétés générales

Le Soleil est une étoile magnétiquement active. Il est le siège d'un champ magnétique fort et variable qui varie d'année en année et change de polarité tous les onze ans à l'époque du maximum d'activité solaire. Ce champ magnétique est la cause de nombreux effets qu'on appelle collectivement activité solaire, allant des taches solaires aux variations de vent solaire en passant par les protubérances et les grandes éjections coronales. Ses effets sur la Terre vont des aurores boréales aux perturbations apportées aux réseaux de transport de l'énergie électrique ou à la transmission des ondes radio. On pense que l'activité solaire a joué un rôle important dans la formation et l'évolution du système solaire par les changements qu'elle induit dans la structure de la haute atmosphère terrestre.

Les différences de vitesse de rotation en fonction de la latitude, source de l'effet dynamo, enroulent les lignes de champ qui deviennent de ce fait de plus en plus serrées jusqu'à former les taches et protubérances solaires avant de se recombiner avec inversement de la polarité. La longueur de ce cycle est d'environ onze ans

2.3.2 Champ interplanétaire

Le champ magnétique solaire s'étend bien au delà du Soleil proprement dit. Le vent solaire, un plasma dans lequel le champ est ancré, crée donc un champ magnétique dans l'ensemble du système solaire : on parle du champ interplanétaire. Comme le plasma se déplace en suivant les lignes de champ magnétique, le champ interplanétaire est radial au voisinage du Soleil. Comme le champ magnétique a des polarités différentes dans les hémisphères nord et sud, il existe au niveau de l'équateur solaire une mince couche de courant dite héliosphérique. Loin du soleil les lignes de champ s'enroulent en une spirale d'Archimède appelée spirale de Parker. Le champ interplanétaire est bien plus intense que la composante dipolaire du champ magnétique solaire. Ce dernier, qui vaut 50 à 400 μT dans la photosphère, diminue avec le cube de la distance pour atteindre 0.1 nT au niveau de l'orbite terrestre. Alors qu'à cette distance le champ interplanétaire, observé depuis l'espace, est d'environ 5 nT, soit cent fois plus élevé.

La superposition du dipôle terrestre au champ interplanétaire donne ce qu'on appelle la magnétosphère terrestre. Sa structure est complexe. En particulier des goulots magnétiques au voisinage des pôles piègent des particules du vent solaire pour produire les aurores boréales.

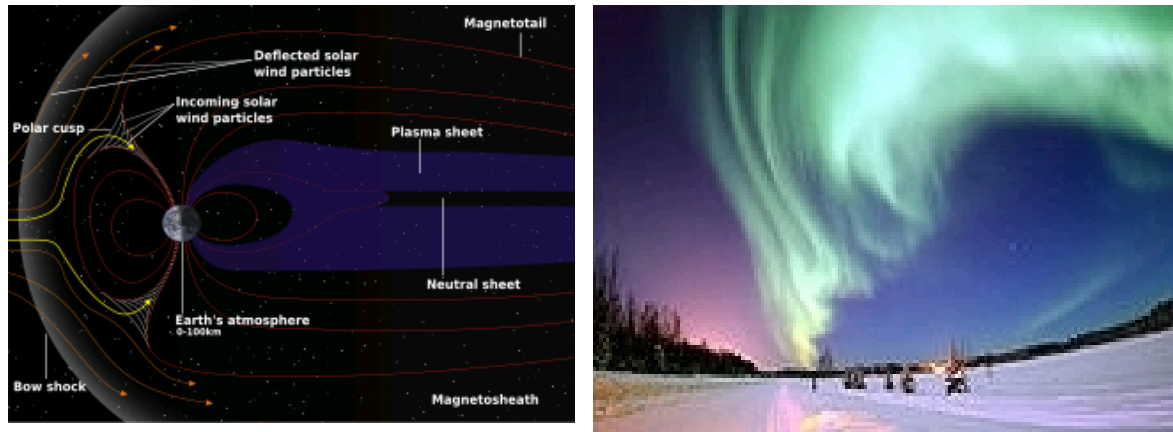


Figure 2.8: Structure schématique de la magnétosphère (à gauche) et photographie d'une aurore boréale (à droite).

2.3.3 Taches et cycle solaire

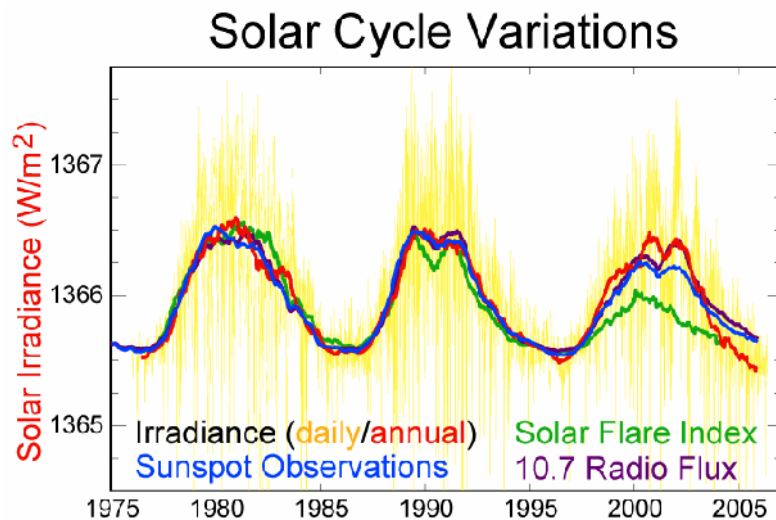


Figure 2.9: Le cycle solaire au cours des trente dernières années.

Quand on observe le Soleil avec des filtres appropriés, on remarque tout de suite la présence de taches. Il s'agit de régions bien délimitées qui sont plus obscures que leur entourage parce que la température y est plus basse. Ce sont des zones d'intense activité magnétique empêchant la convection et de ce fait réduisant le transport de chaleur de l'intérieur vers la surface. Il en résulte un fort échauffement de la couronne accompagné d'éruptions solaires et d'éjections coronales. Les taches les plus grandes atteignent des milliers de kilomètres de diamètre.

Le nombre de taches solaires varie au rythme du cycle d'onze ans. Typiquement, au minimum d'activité on ne voit que peu de taches, voire aucune. Puis au fur et à mesure qu'augmente l'activité solaire des taches apparaissent, d'abord aux grandes latitudes, puis de plus en plus proches de l'équateur (loi de Spörer). Les taches sont le plus souvent groupées par paires de polarités magnétiques opposées. Ces polarités alternent à chaque cycle.

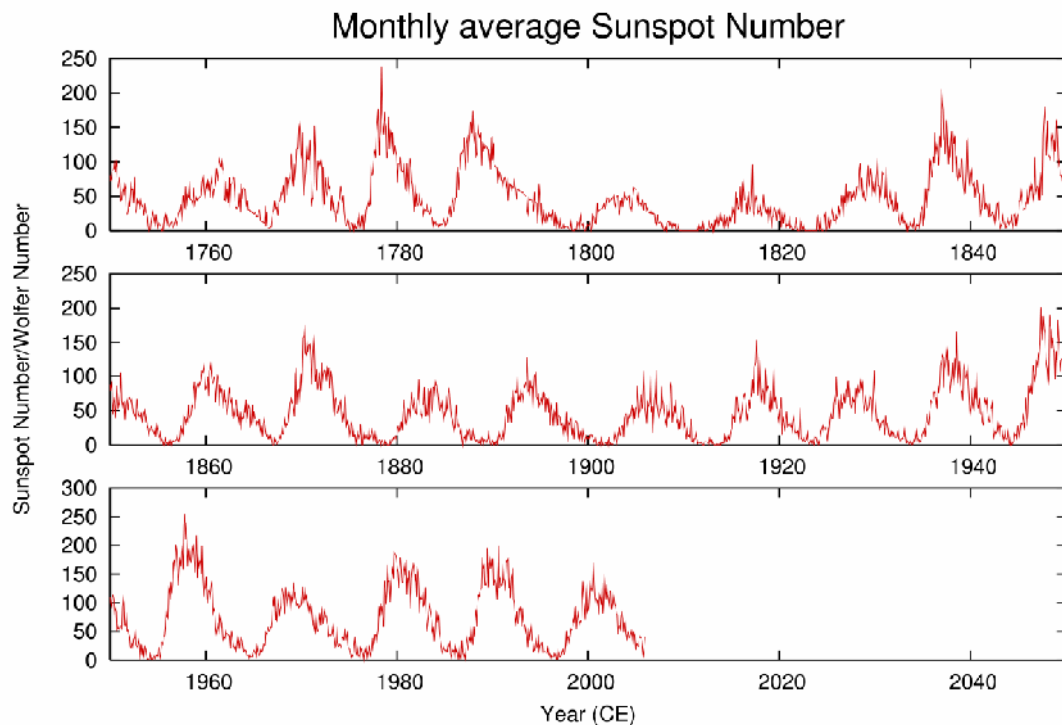


Figure 2.10: Distribution du nombre de taches solaires observées (moyennes mensuelles) couvrant les derniers 250 ans.

2.3.4 Anomalies

Le cycle solaire a une influence importante sur le climat puisque sa luminosité est en relation directe avec son activité magnétique. Les minima d'activité solaire tendent à correspondre à des minima de température des cycles solaires plus longs que la moyenne sont associés à des températures moyennes plus élevées. Au XVII^{ème} siècle le cycle solaire s'est arrêté pendant plusieurs décennies et très peu de taches ont pu être observées durant cette période qu'on appelle minimum de Maunder ou Petite Période Glaciaire. L'Europe a alors connu de très basses températures. D'autres minima semblables ont pu être révélés par l'étude des cercles de croissance des arbres.

Le Soleil se trouve avoir en ce moment un comporte assez peu normal. Après que le vent solaire et le champ qu'il transporte aient plus que doublé au cours du siècle dernier, il se trouve au milieu d'une période de minimum de taches plus longues que la moyenne. Depuis le mois de mai 2008, on a prédit à plusieurs reprises un retour d'activité qui ne s'est toujours pas concrétisé. Au cours des deux dernières décennies, la vitesse du vent solaire a diminué de 3%, sa température de 13% et sa densité de 20%. Son champ magnétique est plus de deux fois plus faible que lors du minimum d'activité d'il y a 22 ans. Il en résulte une diminution du volume occupé par l'héliosphère et une augmentation du flux de rayons cosmiques atteignant l'atmosphère terrestre. Ces anomalies ne sont pas comprises.

2.4 Evolution

2.4.1 Naissance du Soleil

Le Soleil est né il y a cinq milliards d'années de l'effondrement d'un nuage moléculaire d'hydrogène. On date sa naissance de deux manières: soit en utilisant les modèles dont on dispose pour décrire l'évolution des étoiles sur la séquence principale, avec pour résultat 4.57 milliards d'années ; soit par datation radiométrique des éléments les plus anciens du système solaire, avec pour résultat 4.567 milliards d'années, en excellent accord avec le résultat précédent.

Le Soleil se compose essentiellement d'hydrogène et d'hélium représentant respectivement 74.8% et 23.7% de la masse contenue à l'intérieur de la photosphère. Les éléments plus lourds, appelés collectivement métaux par les astrophysiciens, représentent moins de 2% de cette masse (0.8% d'oxygène, 0.3% de carbone, 0.2% de néon et 0.2% de fer).

Le Soleil a hérité ces éléments de l'espace interstellaire à partir duquel il s'est formé. L'hydrogène et l'hélium proviennent de la nucléosynthèse qui a suivi le Big Bang après quelque 3 minutes alors que les métaux ont été produits par nucléosynthèse stellaire par les générations successives d'étoiles qui ont précédé la naissance du Soleil. On considère généralement que la composition chimique de la photosphère est représentative de celle du système solaire primordial. Cependant, depuis la formation du Soleil, une partie de l'hélium et des éléments lourds a migré vers l'intérieur et la photosphère contient aujourd'hui moins d'hélium et seulement 84% des éléments lourds que contenait le Soleil protostellaire (71.1% d'hydrogène, 27.4% d'hélium et 1.5% de métaux).

2.4.2 Phase actuelle

Les modèles théoriques dont nous disposons pour décrire l'évolution du Soleil prédisent qu'il y a quelques trois milliards d'années la luminosité du Soleil n'était que

75% de la luminosité actuelle. Il aurait alors été impossible de retenir de l'eau liquide sur la surface terrestre et la vie n'aurait pas pu apparaître et se développer comme elle l'a fait. Cependant les données géologiques montrent que la Terre est restée à température quasiment constante au cours de son histoire, voire que la jeune Terre était en fait plutôt plus chaude qu'aujourd'hui. Il semble maintenant établi que l'atmosphère de la jeune Terre contenait alors de bien plus grandes quantités de gaz à effet de serre (gaz carbonique, méthane, ammoniac) qui retenaient suffisamment de chaleur pour compenser la moindre intensité du rayonnement solaire.

Le Soleil est à peu près au milieu de son évolution sur la séquence principale. Chaque seconde, plus de quatre millions de tonnes de matière sont converties en énergie à l'intérieur du cœur solaire, produisant neutrinos et photons. A ce jour, le Soleil a donc déjà brûlé une centaine de masses terrestres. Il passera au total une dizaine de milliards d'années sur la séquence principale.

A l'intérieur du Soleil la fusion nucléaire a modifié l'abondance d'hélium qui atteint aujourd'hui les 60%. L'abondance des métaux reste bien sûr la même. Comme l'intérieur du Soleil est radiatif et non convectif, aucun des produits de fusion n'a pu migrer vers la photosphère. Une mesure importante des abondances des métaux lourds est fournie par les météorites qui n'ont jamais atteint la température de fusion et qui sont de bons témoins des abondances du Soleil protostellaire.

2.4.3 Mort du Soleil

Le Soleil n'est pas suffisamment massif pour faire une supernova. Dans quelque cinq milliards d'années, il deviendra une géante rouge, ses couches externes se dilatant en même temps que le cœur se contractera et se réchauffera. La fusion de l'hélium en carbone se produira aux environs de 100 MK.

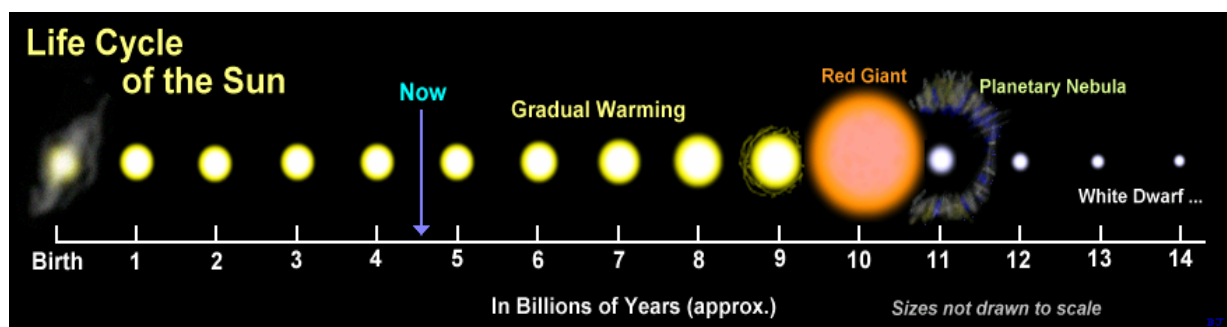


Figure 2.11: Evolution solaire: représentation schématique.

A la fin de la phase de géante rouge, des oscillations de grande amplitude vont éjecter les couches externes qui formeront une nébuleuse planétaire. Le cœur se contractera pour former une naine blanche qui se refroidira lentement pendant des milliards d'années.

3. RAYONS COSMIQUES

Les rayons cosmiques sont des noyaux d'atomes ionisés qui atteignent la Terre après avoir été accélérés dans l'espace jusqu'à des énergies très élevées. En pénétrant dans l'atmosphère, ils interagissent avec elle et produisent des cascades de particules secondaires qu'on nomme grandes gerbes. Ils peuvent atteindre des énergies de l'ordre de 10^{20} eV, au dessus desquelles ils interagissent avec les photons du rayonnement fossile (2.7 K) pour produire des pions, ce qui entraîne une perte importante d'énergie. Il en résulte une coupure effective du spectre d'énergie qu'on appelle "coupure" GZK [10] d'après les noms des physiciens qui ont prédit son existence. Le flux de rayons cosmiques sur la surface de la Terre décroît avec l'énergie selon une loi de puissance d'indice 2.7. Aux énergies les plus élevées il ne vaut que $1 \text{ km}^{-2}/\text{siècle}$, exigeant pour sa détection une énorme couverture au sol. L'Observatoire Pierre Auger, avec lequel VATLY – le laboratoire au sein duquel le présent travail a été effectué – est associé [11], couvre 3000 km^2 dans la pampa argentine et se consacre à la détection et à l'étude des rayons cosmiques d'énergie extrême qu'on désigne du sigle UHECR (ultra high energy cosmic rays).

3.1 L'histoire en bref

A la fin du XIX^e siècle, les physiciens avaient remarqué que leurs électromètres se déchargeaient spontanément et n'en comprenaient pas la cause: ces décharges suggéraient la présence d'une radiation ionisante. En 1909, Wulf, depuis la Tour Eiffel, remarqua que le taux de décharge diminuait avec l'altitude. Entre 1911 et 1913 le physicien autrichien Viktor Hess (Figure 3.1) fit des mesures en ballon jusqu'à cinq kilomètres d'altitude et établit l'existence "d'un rayonnement pénétrant inconnu venant d'en haut et vraisemblablement d'origine extra-terrestre". Il partagea le Prix Nobel de 1936 avec Carl Anderson. Dans les années qui suivirent les rayons cosmiques firent l'objet d'intenses recherches, en particulier avec Millikan (qui les baptisa ainsi en 1925) et Anderson à Pikes Peak. En 1927, la dépendance en latitude et l'asymétrie est-ouest firent la preuve que les rayons cosmiques étaient des particules chargées et non des photons. En 1938, Pierre Auger, en utilisant des compteurs en coïncidence, découvrit les grandes gerbes et comprit qu'elles étaient produites par des primaires de très haute énergie (jusqu'à 10^{15} eV) interagissant avec l'atmosphère terrestre. Dans les années trente et quarante, alors que les accélérateurs ne dominaient pas encore la scène, les rayons cosmiques devinrent le laboratoire d'étude de la physique des particules. Anderson découvrit le positon en 1932 et le muon en 1938. Powell et Occhialini découvrirent le pion en 1947. Puis vinrent les particules étranges: kaons, hypérons et beaucoup d'autres. Dans les années cinquante, les accélérateurs prirent la relève et on étudia les rayons cosmiques pour leur propre intérêt.



Figure 3.1: Les pionniers. De gauche à droite, Viktor Hess et son ballon, Pierre Auger au Jungfraujoch et Anderson et sa chambre à brouillard.

Pendant de longues années, on consacra ensuite des efforts importants à l'étude des rayons cosmiques en cherchant à comprendre d'où ils venaient. On construisit de grands réseaux de détecteurs au sol et des télescopes à fluorescence afin d'atteindre de très hautes énergies (John Linsley détecta la première gerbe de 10^{20} eV à Volcano Ranch en 1962). L'astronomie spatiale révolutionna l'étude des rayons cosmiques de basse énergie, en particulier celle des particules solaires énergiques (SEP).

Au cours des dernières vingt années, les progrès spectaculaires qu'a fait l'astrophysique et les longs délais impliqués dans la construction d'accélérateurs de très haute énergie ont causé une renaissance de l'intérêt porté à la physique des rayons cosmiques qu'on appelle parfois aujourd'hui physique des astroparticules. En particulier, la détection de photons dans la bande du TeV a permis d'identifier des sources de rayons cosmiques sans être esclave des effets de déflexion des champs magnétiques.



Figure 3.2: Un détecteur de l'Observatoire Pierre Auger.

Quant à l'étude des rayons cosmiques, elle bénéficia de la naissance d'une nouvelle génération de détecteurs au sol. En particulier, l'Observatoire Pierre Auger (Figure 3.2) est un gigantesque détecteur hybride couvrant 3000 km^2 dans lequel les

grandes gerbes sont détectées par la lumière de fluorescence qu'elles produisent dans l'atmosphère et par leur impact sur un réseau de détecteurs au sol.

Des projets utilisant comme radiateur une fraction importante de l'atmosphère terrestre observée depuis l'espace sont actuellement proposés et des expériences explorent les possibilités d'une astronomie des neutrinos naissante.

3.2 Spectre en énergie

Les rayons cosmiques sont des noyaux d'atomes ionisés qui voyagent dans l'espace jusqu'à des énergies extrêmes de l'ordre de 10^{20} eV=16 Joules (Figure 3.3). Ils sont peu nombreux mais contiennent autant d'énergie que le rayonnement fossile ou que la lumière visible ou que les champs magnétiques, à savoir ~ 1 eV/cm³. Ils ont une distribution en énergie en loi de puissance qui couvre 32 ordres de grandeur (12 en énergie), de forme approchée $E^{-2.7}$.

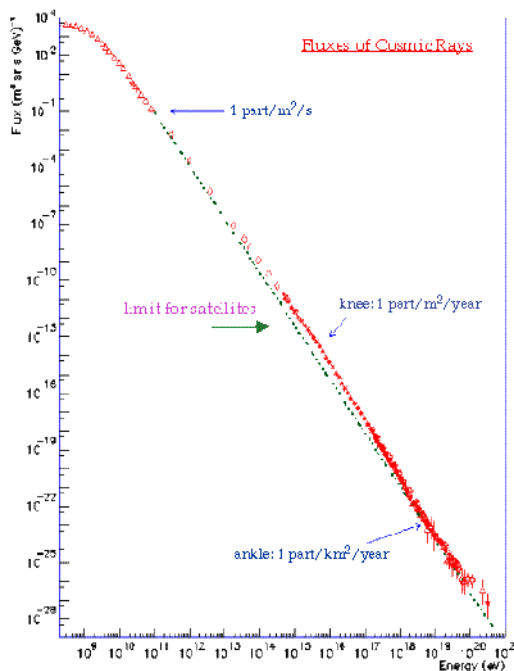


Figure 3.3: Spectre des rayons cosmiques

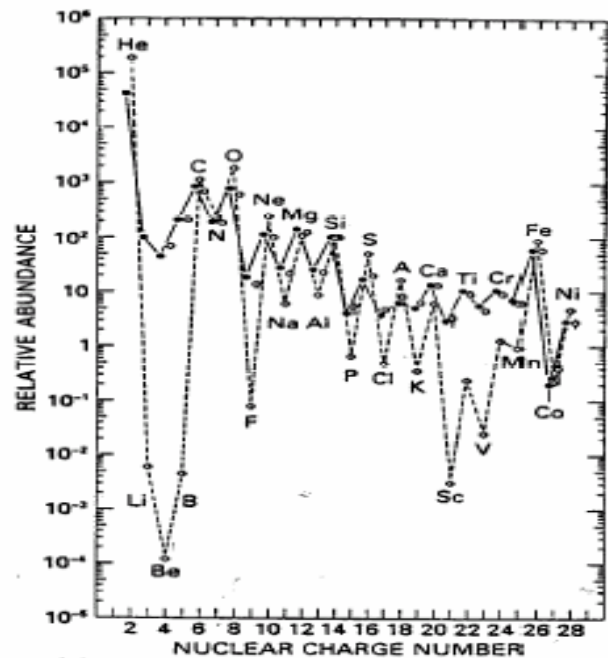


Figure 3.4: Abondance des éléments

L'abondance des éléments qui les constituent (Figure 3.4) est voisine de celle qu'on rencontre ailleurs dans l'univers à cela près que les vallées ont été comblées par les réactions de spallation sur les noyaux du milieu interstellaire. Un rayon cosmique traverse en moyenne 6 g cm^{-2} avant d'atteindre la Terre.

Aux énergies les plus basses, le rayonnement cosmique est d'origine solaire mais seule une très petite fraction atteint la surface terrestre protégée par son champ magnétique. La densité en énergie est évaluée à quelque $\sim 10^{-12}$ erg/cm³. La plupart des rayons cosmiques sont d'origine galactique parce que piégés dans le champ magnétique du disque de la Voie Lactée pendant quelque trois millions d'années. La puissance qu'ils contiennent atteint donc quelque $\sim 10^{-26}$ erg/cm³s qu'on peut comparer à celle délivrée par les explosions de Supernovae, $\sim 10^{51}$ erg/SN; soit, pour trois explosions de SN par siècle dans le disque, $\sim 10^{-25}$ erg/cm³s. On voit donc que les rayons cosmiques galactiques transportent environ $\sim 10\%$ de la puissance libérée par les explosions de SN et, comme on le verra plus loin, ont en effet leur origine dans les SNR.

L'indice du spectre en énergie passe de 2.7 à 3 aux alentours de $3 \cdot 10^{15}$ eV – on parle du genou – pour revenir à 2.7 en fin de spectre – on parle de la cheville. Ces déviations par rapport à un spectre de puissance pur sont liées à l'origine des rayons cosmiques dans les domaines d'énergie concernés (galactique ou extragalactique) mais les détails n'en sont pas bien compris; néanmoins il existe des scénarios plausibles qui reproduisent bien les données.

3.3 Sources galactiques



Figure 3.5: L'observatoire HESS (High Energy Stereoscopic System) en Namibie comporte quatre télescopes aux coins d'un carré de 120×120 m² et détecte des photons d'énergies dépassant les 100 GeV. Son champ de vision est de 5° et sa résolution angulaire de quelques arc minutes. Il suffit de 30 secondes pour prendre une image du Crabe.

Des progrès récents en astronomie gamma ont permis de clarifier le mécanisme d'accélération des rayons cosmiques galactiques. Contrairement aux rayons cosmiques, les rayons gamma ne sont pas déviés par les champs magnétiques et leurs trajectoires pointent vers leurs sources. Ce sont de bons révélateurs des photons de désintégration des pions neutres produits dans l'interaction des rayons cosmiques de très haute énergie avec la matière interstellaire.

L'astronomie gamma a montré que de nombreuses sources avaient une contrepartie X identifiée comme SNR et a permis d'établir que la

plupart des rayons cosmiques galactiques avaient là leur origine. Les sources principales de photons gamma sont le rayonnement synchrotron à basse énergie et les désintégrations de π^0 ou l'effet Compton inverse sur le rayonnement fossile à haute

énergie. Les observations de HESS au TeV ont montré que les enveloppes de plusieurs SNR étaient des sites où les signaux gamma prennent leurs sources (Figures 3.5 et 3.6).

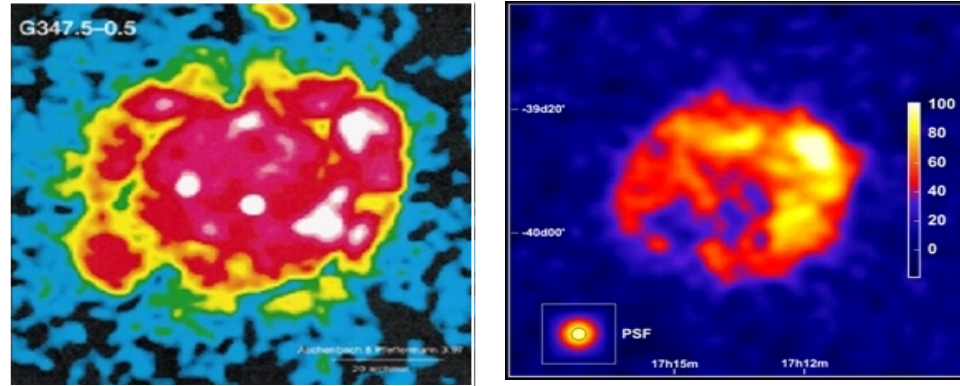


Figure 3.6: On voit à gauche l'image gamma (HESS) d'une SNR précédemment observée en rayons par Rosat (à droite) montrant que le maximum d'intensité gamma est situé sur l'enveloppe et non au centre de la SNR.

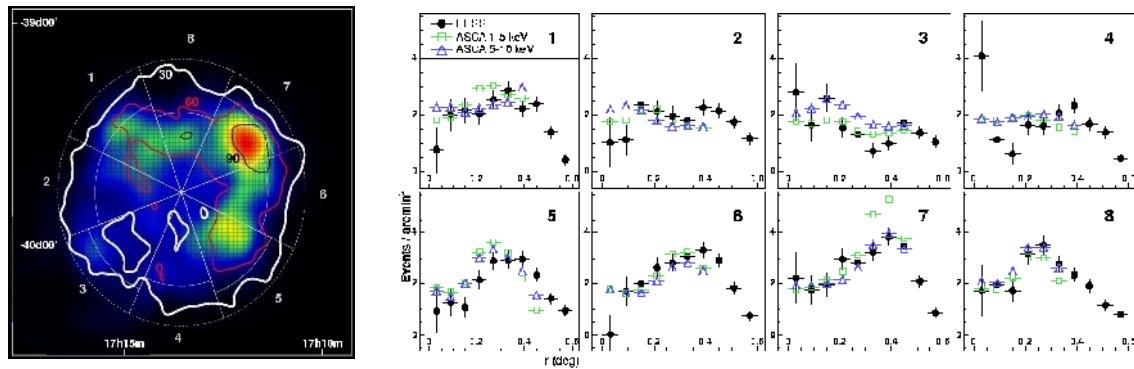


Figure 3.7: SNR RX J1713 observée en rayons X en 1996 par ROSAT (à gauche). Le spectre X contient surtout des photons non thermiques et le diamètre de l'enveloppe est ~ 1 kpc. L'image de HESS (contours) a été prise en 2004 et a nécessité 33 h d'observation des quatre télescopes pour permettre de résoudre l'enveloppe. Les profils d'intensité radiale mesurés en rayons X (ASCA) et en gamma dans huit secteurs de la SNR sont comparés à droite. Le coefficient de corrélation entre les deux profils est de 80%.

Il existe deux grands types de SN (Figure 3.8), Ia et II.

Le type Ia correspond à une naine blanche, membre d'une binaire, amassant par accrétion de la matière de son compagnon jusqu'à ce que sa masse atteigne la limite de Chandrasekhar, 1.4 masses solaires. Le cœur est presque complètement détruit, l'enveloppe est presque vide.

Le type II correspond à une étoile massive qui s'effondre pour former une étoile à neutrons qui reste au centre de l'enveloppe et est éventuellement détectée sous la forme d'un pulsar (c'est le cas du Crabe) dont le vent fournit de l'énergie à l'enveloppe (on parle d'un plérion).

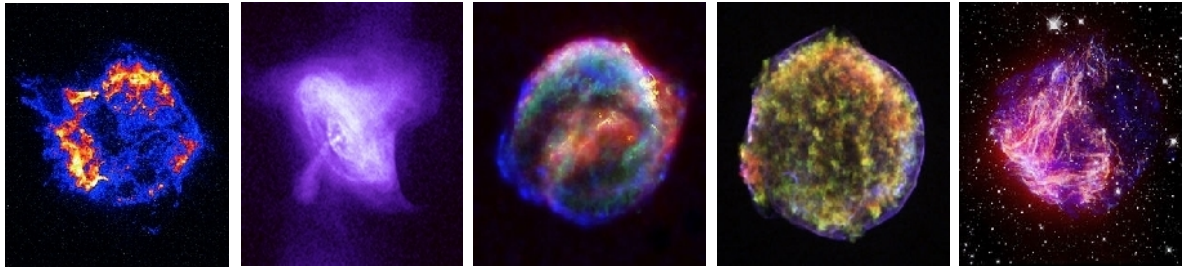


Figure 3.8: Images X de très haute résolution de plusieurs SNR. De droite à gauche: Cassiopee A, le Crabe, Képler (SN 1604), Tycho (SN 1572) et N49.

Les détails de la structure de l'enveloppe résultent du mécanisme suivant (Figure 3.9): L'onde de choc de l'explosion balaie la matière interstellaire à l'avant. Au fur et à mesure que cette masse est balayée le choc ralentit et est rattrapé par la matière éjectée (dont les éléments ont les mêmes abondances que l'étoile mère). L'onde de choc réfléchi élève la température de la matière éjectée et induit des réactions nucléaires qui produisent de nouveaux éléments lourds. Quand une masse suffisamment importante a été balayée (soit plus qu'une fois et demie la masse de la matière éjectée) la SNR se dilue lentement dans la matière interstellaire: c'est la phase de Sedov.

Alors que les particules thermiques et les champs magnétiques (où l'émission synchrotron est confinée) sont concentrés dans la région de l'enveloppe, les particules relativistes couvrent de bien plus grandes distances. La structure du choc dépend de l'âge de la SNR, il est nécessaire de distinguer entre SNR jeunes et vieilles. Dans le cas d'un plérion, la présence d'un pulsar en son centre complique la situation mais le schéma général reste le même.

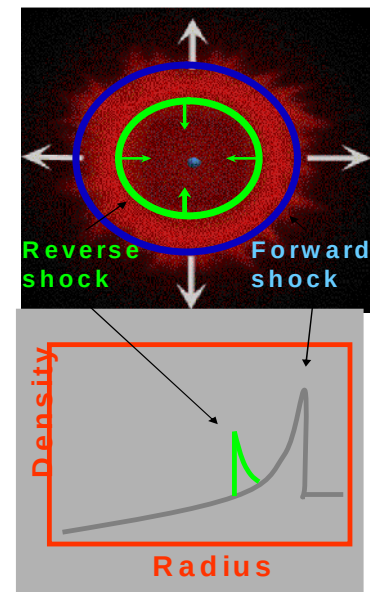


Figure 3.9: Structure schématique d'une enveloppe de SNR

L'étude détaillée de la région du choc en rayons X a révélé l'existence de turbulences importantes (Figure 3.10) ainsi qu'une forte amplification du champ magnétique pouvant atteindre près de deux ordres de grandeur par rapport à ce que produirait le seul effet de compression hydrodynamique.

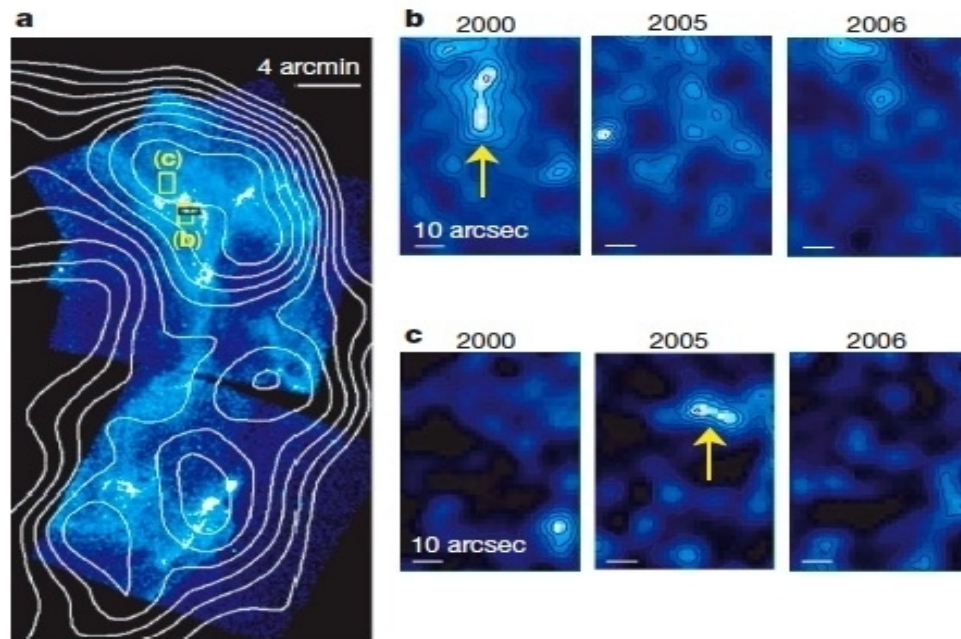


Figure 3.10: Mise en évidence de l'existence de turbulences variables dans l'enveloppe de RX J1713. Les régions situées dans les rectangles marqués b et c sur l'image de gauche sont montrées en fonction du temps sur les panneaux de droite, mettant en évidence d'importantes variations d'intensité d'une année sur l'autre.

La mise en évidence de l'amplification du champ magnétique est obtenue par comparaison des émissions radio et gamma en utilisant le fait qu'une même distribution d'électrons produit à la fois du rayonnement synchrotron (radio, X) et des gamma dans la région du TeV (effet Compton inverse) mais seul le rayonnement synchrotron dépend du champ magnétique. Les fronts de choc abrupts visibles dans les enveloppes de jeunes SNR mettent en évidence un effet de compression qui fournit une évidence supplémentaire de l'amplification du champ.

Rayons cosmiques et plasmas magnétisés transportent des densités d'énergie similaires et interagissent les uns avec les autres. Les particules accélérées tendent à s'écouler en aval, ce qui cause des instabilités et des non linéarités sources d'amplification du champ moyen: la structure du choc se trouve ainsi modifiée par la rétroaction des rayons cosmiques.

3.4 Accélération dans les chocs

Les observations mentionnées ci-dessus permettent de comprendre l'accélération des rayons cosmiques galactiques de part et d'autre de l'onde de choc d'une SNR en termes d'un mécanisme dit DSA (diffusive shock acceleration). Il rappelle ce qui se passe dans un cyclotron (Figure 3.11): les particules sont accélérées localement à la traversée du choc (l'équivalent de l'espace entre les dees) et sont guidées par les champs magnétiques présents de part et d'autre de telle manière qu'elles sont ramenées vers le choc (l'équivalent du champ dipolaire de l'électroaimant). Mais les mécanismes de guidage et d'accélération sont très différents de ce qu'ils sont dans un cyclotron. Le guidage est produit par ce qui reste du champ magnétique de l'étoile, maintenant très fortement dilué (conservation du flux) et par les diffusions stochastiques sans collision sur les turbulences magnétiques qui lui sont associées. L'accélération est décrite de la manière la plus simple dans un repère où le choc est au repos, les milieux amont et aval s'écoulant vers le centre de la SNR et allant à la rencontre l'un de l'autre avec une grande vitesse relative $v = \beta c$. L'énergie $E + \Delta E$ du rayon cosmique (masse M) après avoir traversé le choc est obtenue en fonction de l'énergie E qu'il avait avant la traversée par la formule de Lorentz $E + \Delta E = \gamma \beta E + \gamma p c$ où $\gamma^2 = \gamma^2 \beta^2 + 1$ et $E^2 = p^2 c^2 + M^2 c^4$. Comme $\beta \ll 1$, $\gamma \sim 1$ et $p = E$ et on obtient, dans le cas de rayons cosmiques relativistes, $\Delta E = \beta E + O(\beta^2)$. On parle d'accélération de Fermi du premier ordre. $\Delta E/E = \beta$ implique $E_n = E_0 (1 + \beta)^n$ après n traversées du choc. En effet, quand la particule revient sur le choc, son impulsion a changé de direction mais son énergie n'a pas changé puisque la matière interstellaire est si diluée que les collisions sont négligeables.

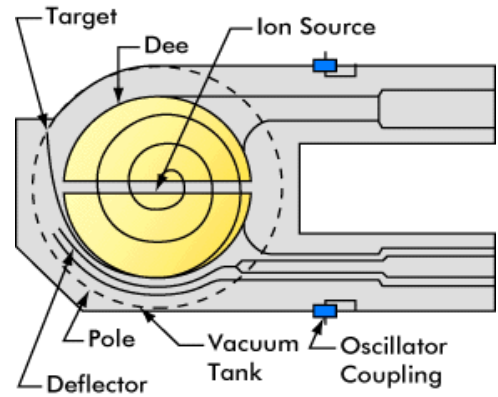


Figure 3.11: Fonctionnement schématique d'un cyclotron

Cette matière interstellaire, loin d'être statique, est constamment recyclée par l'effet des explosions de SN. Elle est composée de trois éléments de base: matière proprement dite (particules thermiques), champs magnétiques et rayons cosmiques. Dans la Voie Lactée elle représente 10 à 15% de la masse du disque. Les associations OB, pépinières de jeunes étoiles, et les explosions de SN affectent la matière interstellaire du fait des vents stellaires, du rayonnement, de la chaleur produite, de l'ionisation et des explosions. En pratique, on peut ignorer les collisions des rayons cosmiques avec la matière interstellaire.

Il va de soi que le mécanisme d'accélération DSA implique la présence de champ magnétique dans un volume suffisamment grand pour contenir les trajectoires

des rayons cosmiques [12], ce qui impose, pour une énergie donnée, une limite inférieure au produit de l'intensité du champ par le diamètre de ce volume (Figure 3.12).

En particulier les SNR sont incapables d'accélérer des particules aux énergies des UHECR. Mais des chocs de bien plus grande taille existent en dehors de la Galaxie, tels que des noyaux galactiques actifs (Figure 3.13), et l'Observatoire Pierre Auger a déjà montré l'existence d'une importante corrélation [13] entre de telles sources et les directions d'où les UHECR semblent venir. En particulier plusieurs d'entre eux pointent vers Cen A, un site où deux galaxies en collision possèdent un AGN en leur centre.

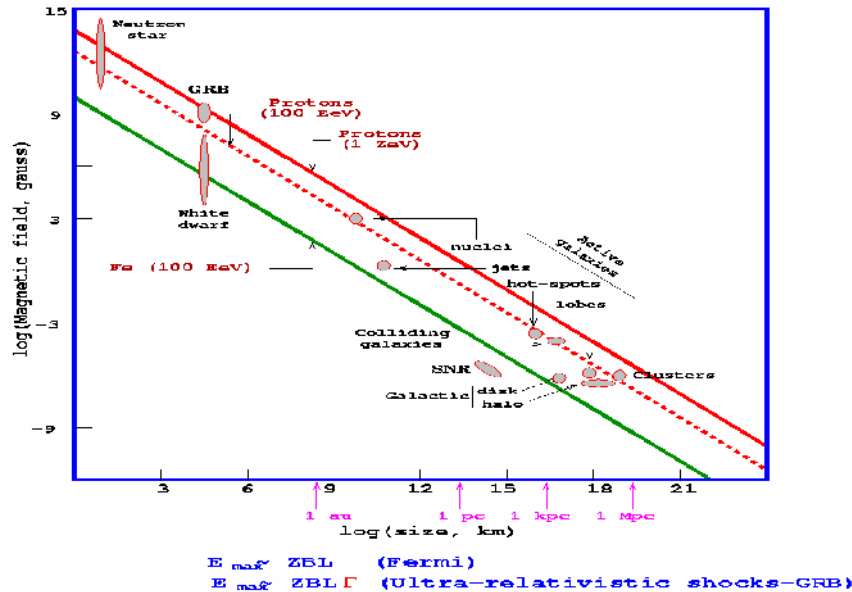


Figure 3.12: Diagramme dit d'Hillas; les lignes supérieures correspondent à des protons de 100 et 1000 EeV respectivement.

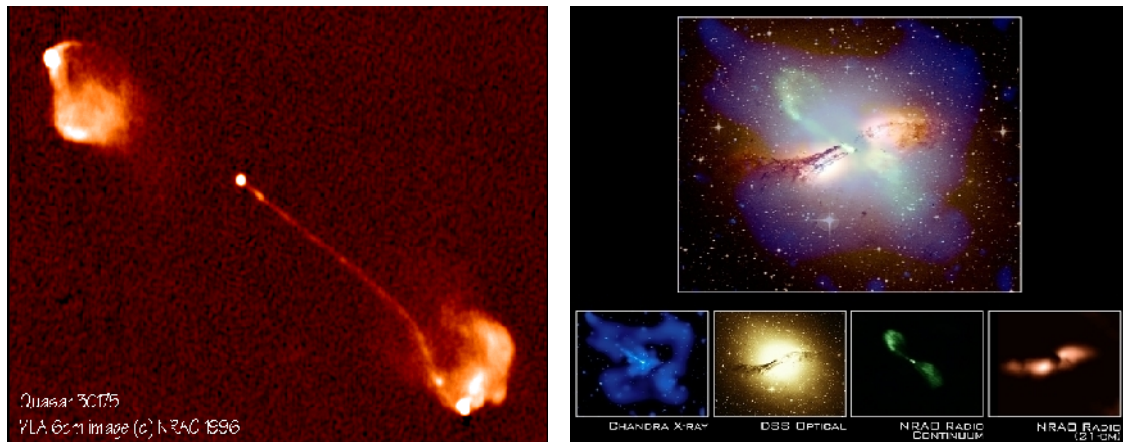


Figure 3.13: A gauche: image radio d'un quasar. A droite: Centaurus A, réunion d'une galaxie elliptique et d'une spirale plus petite avec un AGN en son centre (l'AGN le plus proche de nous), est vraisemblablement le site de chocs importants.

3.5 Les grandes gerbes

Quand un rayon cosmique pénètre dans l'atmosphère terrestre, il interagit avec elle et produit un grand nombre de mésons qui interagissent à leur tour, et ainsi de suite jusqu'à ce que toute l'énergie primaire ait été dépensée sous forme de pertes par ionisation. Il en résulte une cascade qu'on appelle grande gerbe. Les gerbes induites par les rayons cosmiques galactiques contiennent plusieurs milliers de particules ionisantes au maximum de leur développement et s'étendent transversalement sur de grandes distances.

Leur profil longitudinal (Figure 3.14) évolue lentement avec l'énergie, proportionnellement à son logarithme, tandis que son contenu énergétique, dépensé sous forme de pertes par ionisation, est proportionnel à l'énergie.

L'échelle du développement est donnée par deux grandeurs : la longueur de radiation correspond à la distance que parcourt un électron avant de rayonner une fraction $1/e$ de son énergie (bremsstrahlung) ; la longueur d'interaction correspond à la section efficace d'interaction de la particule primaire avec les noyaux de l'atmosphère terrestre. C'est cette dernière qui définit l'altitude à laquelle la gerbe commence à se développer. Aux énergies moyennes des rayons cosmiques galactiques atteignant la Terre (quelques GeV ou dizaines de GeV) la longueur d'interaction pour des protons primaires est de l'ordre de 100 g cm^{-2} , soit près de trois fois la longueur de radiation. Pour des noyaux primaires lourds (tels que le fer), la longueur d'interaction est deux à trois fois plus petite. L'altitude à laquelle les gerbes commencent à se développer est donc de l'ordre d'une vingtaine de kilomètres en moyenne mais elle fluctue très fortement autour de cette valeur.

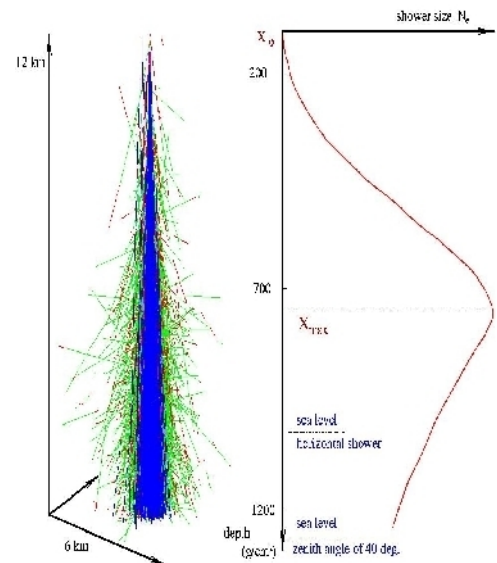


Figure 3.14: Développement longitudinal des grandes gerbes.

4. FORMATION DES NUAGES

4.1 Généralités

Un nuage est constitué de gouttelettes d'eau ou, bien moins nombreux, de petits cristaux de glace suspendus dans l'atmosphère terrestre. Il contient plus de 20% (en masse) de gaz. Gouttelettes et cristaux ont des diamètres de l'ordre de 10 à 20 μm (au maximum de 100 à 200 μm) mais peuvent se grouper par milliards pour former des nuages visibles. Les grands nuages denses réfléchissent de 70% à 95% de la lumière visible et sont donc blancs quand on les voit de dessus. Les gouttelettes d'eau diffusent fortement la lumière, causant une forte diminution de l'intensité du rayonnement solaire à l'intérieur du nuage : d'où l'aspect gris ou même noir quand les regarde d'en bas. Les nuages absorbent l'infrarouge.



Figure 4.1: Un ensemble de cumulus



Figure 4.2: Ciel de cirrus (à gauche) et de stratocumulus encadrés par des cumulus (à droite).

On définit l'altitude d'un nuage comme étant celle de sa base. On distingue entre nuages en couches et nuages convectifs. Les nuages dits de l'étage supérieur se

forment entre 3 et 8 km d'altitude aux pôles, entre 5 et 12 km dans les régions tempérées et entre 6 et 18 km dans les régions tropicales. Ce sont les cirrocumulus, les cirrus et les cirrostratus. Les nuages de l'étage moyen se forment aux alentours de 2 km d'altitude mais parfois bien plus haut selon les régions. Ce sont les altostratus, les altocumulus et, éventuellement, les nimbostratus. Les nuages de l'étage inférieur atteignent jusqu'à 2 km d'altitude et comportent les cumulus, les stratocumulus, certains nimbostratus et les stratus (denses et gris) qui deviennent le brouillard quand ils touchent le sol.



Figure 4.3: Cumulonimbus en forme typique d'enclume (à gauche) et irisations (à droite).

Les nuages dits verticaux sont parfois le siège de forts courants ascendants et s'étendent loin au dessus de leur base. Ils peuvent se former à toutes les altitudes. Ils sont du type cumulonimbus (associés aux orages et fortes précipitations). Les Figures 4.1 à 4.3 montrent des exemples typiques de formations nuageuses.

Il existe aussi d'autres types de nuages qui se forment au dessus de la troposphère, dans la mésosphère ou la stratosphère ou des nuages associés à des particularités géographiques.

La blancheur ou noirceur d'un nuage renseigne sur sa nature. Les nuages se forment parce que l'air chaud absorbe la vapeur d'eau qui, plus légère que l'air, crée un courant ascendant. En gagnant de l'altitude, l'air refroidit et la vapeur d'eau se condense en gouttelettes microscopiques rapprochées qui absorbent fortement la lumière solaire. Quand le nuage évolue et que les gouttelettes augmentent de diamètre (éventuellement jusqu'à tomber en pluie) la distance entre les gouttelettes augmente permettant à la lumière de pénétrer plus profondément dans l'intérieur du nuage et diminuant la probabilité qu'elle soit réfléchi. Pour s'en convaincre, il suffit de remarquer que la visibilité est meilleure par forte pluie que par épais brouillard. C'est

donc surtout la taille des gouttelettes qui décide de la blancheur du nuage. Comme les gouttelettes diffusent de préférences les courtes longueurs d'onde, des phénomènes d'irisation peuvent apparaître.

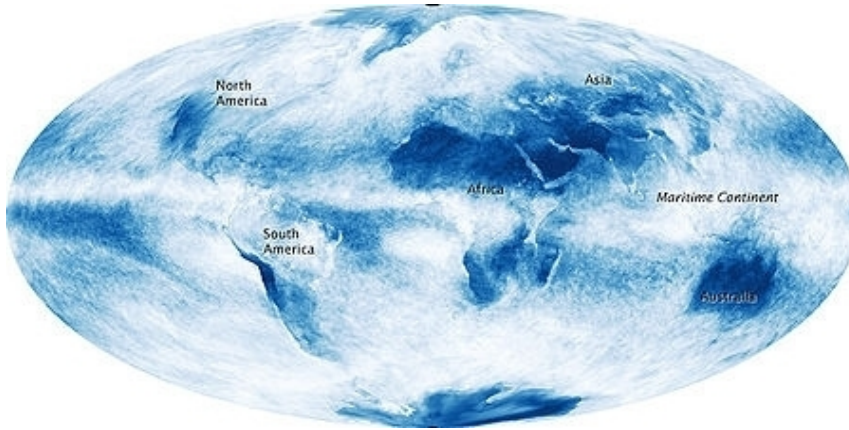


Figure 4.4: Couverture nuageuse globale moyenne en octobre 2009.

Le rôle que jouent les nuages dans la régulation du temps et du climat est encore mal connu et ne permet pas d'évaluer leur contribution au réchauffement global. On observe en ce moment une tendance à un éclaircissement global (Global brightening) dû à une diminution du nombre de particules en suspension dans l'atmosphère impliquant une surface moindre offerte à la condensation. Moins de condensation, donc plus de lumière solaire atteignant la surface des océans, donc plus d'évaporation, plus d'humidité et des nuages moins nombreux mais plus denses [14].

4.2 Mécanismes de formation

4.2.1 Mécanismes atmosphériques macroscopiques

La condensation ou la déposition d'eau au dessus de la surface du globe crée les nuages. En principe, des nuages se forment dès que l'air est saturé, c'est-à-dire dès que l'humidité atteint 100% à la suite de mécanismes atmosphériques induisant une diminution de la température au dessous du point de rosée.

- Ascension orographique: l'air est obligé de monter le long de la pente d'un relief élevé. En montant, il se refroidit par expansion adiabatique d'environ 10° par km d'altitude jusqu'à saturation.

- Ascension convective due à l'échauffement de l'air au contact de la surface de la terre. Ce mécanisme est courant à l'intérieur des continents et au voisinage de l'équateur. Il forme des cumulus ou cumulonimbus (orages et pluies fortes mais courtes et locales).

– Rencontre frontale de deux masses d'air ayant des températures et humidités différentes. La rencontre avec la masse la plus froide cause l'ascension de l'air de la masse chaude. Ce mécanisme est courant aux latitudes moyennes (formation de cyclones) et au voisinage de l'équateur.

– Refroidissement radiatif pendant la nuit. Le sol rayonne dans l'infrarouge et l'air à son contact se refroidit formant des brumes.

Il va de soi que ces mécanismes sont idéalisés et qu'en pratique des situations intermédiaires bien plus complexes sont souvent réalisées de telle sorte que des mécanismes différents peuvent agir simultanément.

La Figure 4.4 illustre la couverture nuageuse globale et la Figure 5.5 montre celle des mois de juillet (haut) et janvier (bas), moyennées sur huit années consécutives (1983 à 1990). On peut en interpréter les détails en termes des mécanismes ci-dessus.

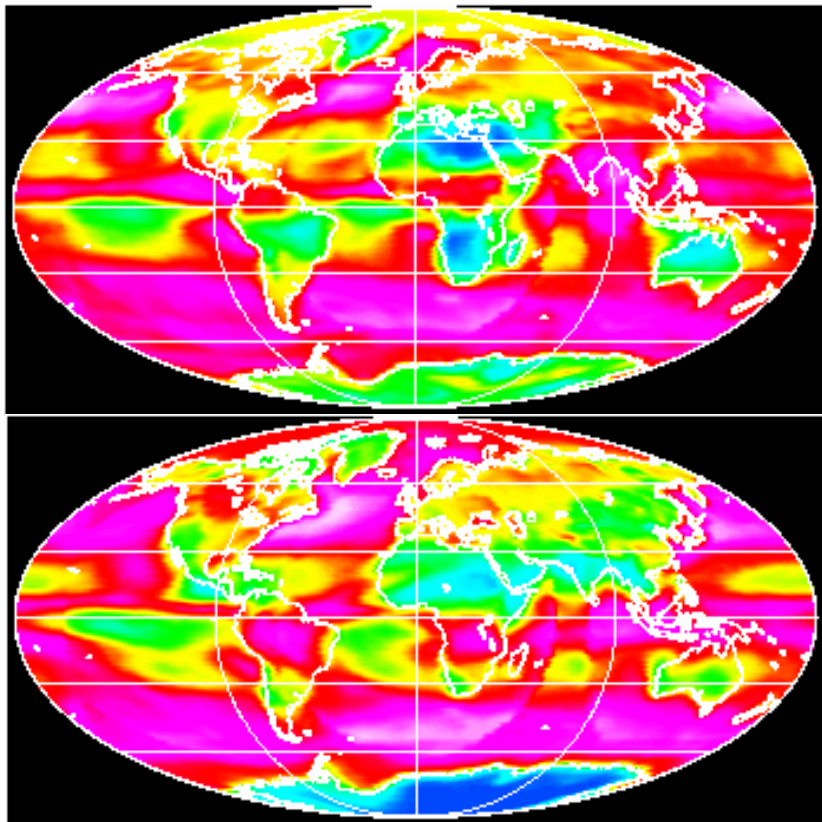


Figure 4.5: Couvertures nuageuses moyennes de juillet (haut) et janvier (bas).

4.2.2 Mécanismes microscopiques : généralités

En principe, il suffit, pour que se forment des nuages, que de l'eau soit présente dans l'air dans des conditions de température et de pression correspondant à l'état liquide. Nous venons de voir des exemples où la vapeur d'eau, en montant dans l'atmosphère (la masse atomique de la molécule d'eau est seulement $18/28 = 64\%$ de celle de la molécule d'azote), se refroidit jusqu'à ce que la transition de phase soit possible. En pratique, les choses sont beaucoup moins simples. Les concepts même d'état liquide et de transition de phase n'ont de sens que pour un nombre assez grand de molécules d'eau. Mais pour que le processus de condensation démarre de façon notable, il est nécessaire qu'existent des germes le favorisant. En effet, la probabilité pour que deux molécules d'eau se rencontrent et s'unissent est extrêmement faible. Si, au contraire, il préexiste un germe possédant une grande affinité chimique ou physique pour les molécules d'eau, la condensation pourra se produire rapidement.

La seule force qui joue un rôle non négligeable dans la condensation d'un liquide est la force coulombienne. A grande distance, la force coulombienne entre deux objets microscopiques (molécules ou corpuscules) électriquement neutres est nulle. A courte distance, courte par rapport aux dimensions des objets considérés, une force apparaît, due à ce qu'on appelle un effet de polarisation: la répartition des charges sur les objets se modifie, les charges négatives de l'un attirant les charges positives de l'autre et inversement. On parle de forces de van der Waals. Les forces d'attraction ou de répulsion entre objets microscopiques chargés sont beaucoup plus importantes, par plusieurs ordres de grandeur, les objets de charges électriques opposées s'attirant mutuellement. Même l'interaction entre un objet chargé et un objet neutre est plus forte qu'entre deux objets neutres, l'effet de polarisation étant nettement plus important. On sait combien il est difficile de séparer les ions des électrons dans un plasma, la matière est essentiellement neutre et le reste à une excellente approximation à l'échelle macroscopique. Aussi n'est-il pas surprenant que les rayons cosmiques, qui sont de loin les agents d'ionisation les plus importants de l'atmosphère terrestre (depuis le sol jusqu'à la mésosphère moyenne, aux alentours de 65 km d'altitude) puissent jouer un rôle de premier plan dans les phénomènes de condensation.

Il est important, pour en discuter, d'avoir présentes à l'esprit les échelles des phénomènes en jeu. Une goutte de pluie a un diamètre de l'ordre de 2 mm, son poids (proportionnel au cube du diamètre) est alors suffisant pour qu'elle tombe au sol malgré la résistance de l'air (proportionnelle au carré du diamètre). Une gouttelette d'eau dans un nuage a typiquement un diamètre de l'ordre de 10 à 20 μm . Les diamètres des plus grosses atteignent la centaine de microns. Les germes qui facilitent la condensation doivent avoir, quant à eux, des diamètres de l'ordre de la centaine de nanomètres. Enfin, les molécules et radicaux chimiques les plus courants ont des dimensions de l'ordre du dixième de nanomètre.

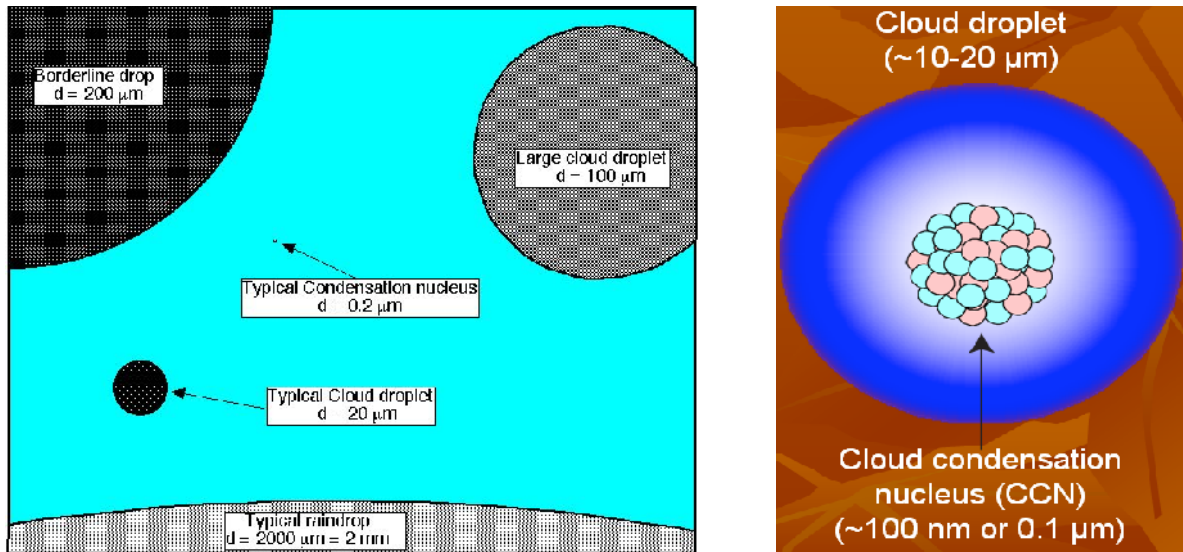


Figure 4.6: Dimensions typiques des CCN, gouttelettes de nuage et gouttes de pluie

Pour bien comprendre les mécanismes de formation des nuages, il est donc nécessaire de comprendre les mécanismes de formation des germes (on les appelle noyaux de condensation, CN, quand ils sont trop petits pour favoriser la condensation de la vapeur d'eau et noyaux de condensation des nuages, CCN, dans le cas contraire) et les mécanismes de condensation de la vapeur d'eau sur ces germes. On s'attend à ce que les apports de charges électriques associées aux rayons cosmiques contribuent à chacun de ces processus.

4.2.3 Mécanismes microscopiques : aérosols, noyaux de condensation (CN et CCN)

On appelle aérosol toute particule microscopique en suspension dans l'air. Quand ils ont une dimension inférieure à $0.1 \mu\text{m}$ on parle de noyaux de condensation (CN) et on appelle nucléation leur mécanisme de formation. Les plus petits aérosols sont des amas de molécules de substances volatiles, les plus grands des sels minéraux ou des particules de poussière. On parle d'aérosols primaires (naturels ou anthropogéniques) quand ils sont injectés directement dans l'atmosphère (érosion éolienne, embruns marins, pollen, combustions, etc...) et d'aérosols secondaires quand ils sont le résultat de nucléations ayant formé des amas moléculaires de quelques dizaines de molécules.

La croissance des aérosols les plus petits met en jeu des interactions entre molécules et se fait à l'échelle des réactions chimiques impliquant non seulement des forces de van der Waals mais aussi des liaisons chimiques covalentes et des liaisons ioniques. La concentration de radicaux libres tels que NO ou OH joue un rôle important ainsi que celle d'ions tels que H^+ , NH_4^+ , Na^+ , SO_4^{2-} , Cl^- et NO_3^- .

La contribution des rayons cosmiques est très importante à ce stade: ils sont responsables de la formation d'ions tels que N_2^+ , O_2^+ , N^+ et O^+ impliquant la libération d'électrons. Les ions interagissent rapidement avec les molécules de l'atmosphère et les transforment en groupements d'ions complexes. Les électrons libres se fixent rapidement (en quelque 200 ns) sur les molécules d'oxygène, produisant une population importante d'ions O_2^- . Ces ions interagissent rapidement (de l'ordre de 1 à 10 ms) avec les molécules d'air pour produire des groupements ioniques tels que $H_3O^+(H_2O)_n$ ou $CO_3^-(H_2O)_n$.

A une échelle de temps légèrement supérieure, on voit apparaître des groupements ioniques encore plus complexes contenant des radicaux ammoniacaux ou sulfuriques [15],[16].

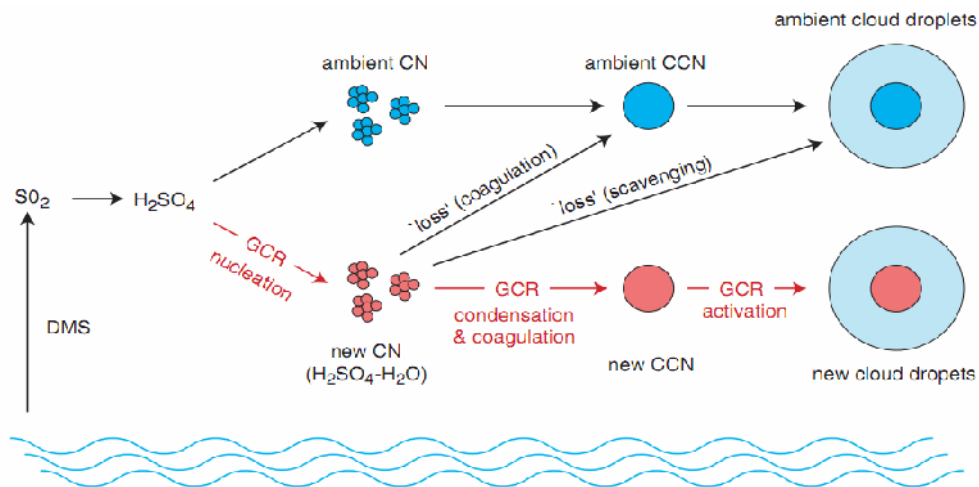


Figure 4.7: Influence possible des rayons cosmiques galactiques sur la nucléation de nouveaux noyaux de condensation (CN) et sur la croissance des noyaux de condensation présents dans les nuages (CCN). Les flèches marquées GCR indiquent les processus susceptibles d'être influencés par les rayons cosmiques. Le dimethyl sulphide (DMS) (venant du plancton) est la source principale de SO_2 , précurseur de l'acide sulfurique, en haute mer.

La croissance des CN en CCN, de diamètres de l'ordre du centième de micron au micron, se fait soit par accrétion de molécules de vapeurs condensables (ammoniac, acide nitrique) – on parle alors d'accumulation – soit par coagulation de plusieurs CN en groupements plus volumineux. L'accumulation domine à l'échelle de la centaine de microns, la coagulation domine à celle de la dizaine de microns.

Ce n'est qu'au dessus de la dizaine de microns que les CN favorisent efficacement la condensation des molécules d'eau, on parle alors de CCN. Si la plupart des aérosols minéraux sont hygroscopiques, il n'en est pas de même des aérosols organiques dont certains sont hydrophobes.

Bien que très rare (un CCN par million), la présence de cristaux de glace dans les nuages semble influencer de manière importante sur leurs propriétés, en particulier sur

leur réflectivité. On observe qu'une gouttelette d'eau ne se transforme en glace qu'au dessous de -40°C à moins qu'elle ne soit mise en présence d'un noyau de condensation, suggérant que les rayons cosmiques puissent jouer là un rôle important.

Il convient enfin de remarquer qu'en dehors du rôle essentiel qu'ils jouent dans la formation des nuages, les aérosols agissent directement sur le climat en absorbant ou réfléchissant le rayonnement solaire de différentes longueurs d'onde.

4.2.4 Influence des rayons cosmiques

En principe, la présence de rayons cosmiques porteurs de charges électriques doit favoriser tous les processus d'accrétion que nous avons mentionnés comme participant à la formation des nuages. En pratique il convient de modérer ce discours. En effet, la fraction de vapeur d'eau en sursaturation dépasse rarement le pourcent à cause du grand nombre de CCN, laissant peu de chances à des variations du taux de cosmiques de produire des effets notables à ce niveau : il y a déjà bien assez de CCN, et quand même les rayons cosmiques en seraient largement responsables, les fluctuations de leur taux joueraient essentiellement sur le pourcent restant et seraient négligeables. Aussi doit-on s'attendre à ce que, si les rayons cosmiques jouent un rôle important, ce soit au niveau de la formation des CN et de leur croissance à l'échelle de CCN plutôt qu'à celui de la condensation de la vapeur d'eau.

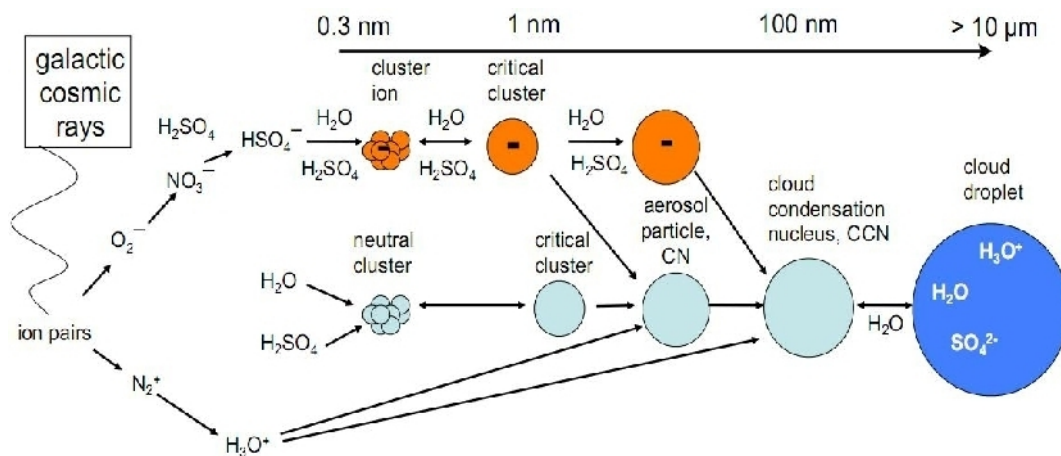


Figure 4.8: Un exemple d'influence de l'ionisation induite par les rayons cosmiques sur les différentes étapes de la croissance des noyaux de condensation: formation d'ions O_2^- et rôle de l'acide sulfurique.

Il faut reconnaître que nous savons très peu de choses sur le mécanisme détaillé de formation des nuages et encore moins sur le rôle qu'y jouent les rayons cosmiques. Les arguments que nous avons présentés sont certes raisonnables mais ne sont que des spéculations.

Il n'existe que très peu de données expérimentales sur l'effet qu'a l'ionisation

de l'atmosphère sur les phénomènes d'accrétion, nucléation, accumulation, coagulation et condensation, en particulier sur la croissance de CN en CCN et sur l'activation de CCN en gouttelettes. On a observé l'existence de bouffées soudaines de nucléation de CN dans l'atmosphère sans en comprendre la raison. Il n'existe aucune évidence expérimentale permettant d'affirmer que l'ionisation joue un rôle important pour la nucléation dans des conditions atmosphériques réalistes.

Il convient ici de mentionner une expérience (baptisée SKY) conduite dans une chambre à brouillard par une équipe de Copenhague [17]. Ils ont étudié certains effets induits par les rayons cosmiques traversant le détecteur. Ils ont observé que les électrons libérés par l'ionisation des muons cosmiques favorisaient la formation de groupements moléculaires propres à servir d'éléments de construction pour les CCN. Les électrons auraient une action catalytique, passant d'une molécule à une autre.

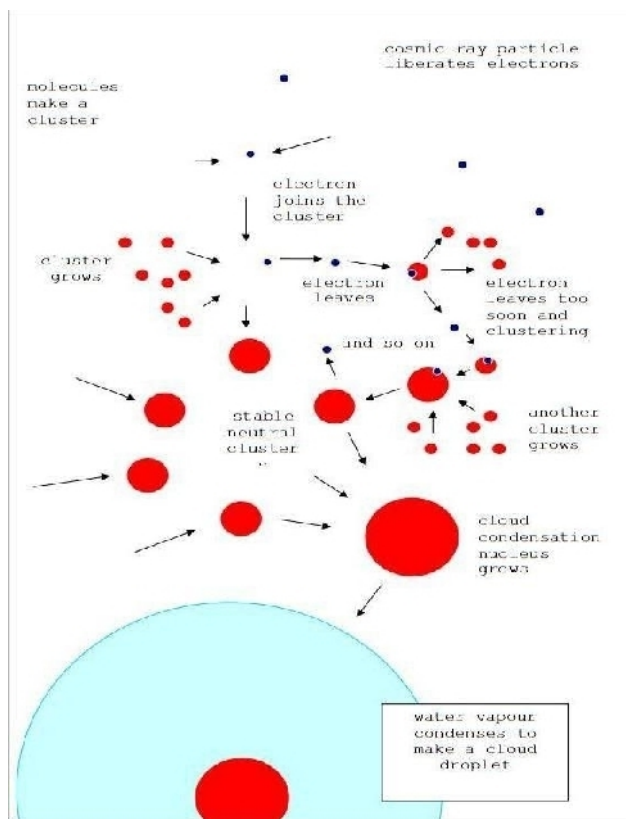


Figure 4.9: Rôle catalytique des électrons dans la croissance des noyaux de condensation (expérience SKY).

Enfin, une équipe de physiciens [18] conduit en ce moment des mesures au CERN visant à mieux comprendre en quoi les rayons cosmiques peuvent contribuer à la formation des nuages. Ils s'attachent particulièrement à l'étude de quatre questions : augmentation des taux de nucléation et de croissance des CCN, augmentation de l'efficacité des CCN par attachement de charges électriques, formation de vapeurs condensables affectant les CCN et formation de cristaux de glace.

5. CONCLUSIONS

Le réchauffement climatique que la Terre a subi au cours du dernier siècle, 0.74 ± 0.18 °C au voisinage de la surface terrestre, est une réalité bien établie. Toutes les mesures qui en ont été faites, bien qu'utilisant des outils et des méthodes différents, le confirment. Quoi qu'il importe, ce réchauffement n'a rien d'exceptionnel: à l'échelle du siècle, les fluctuations de la température terrestre au cours des trois derniers millénaires ont souvent atteint le degré. En même temps que la Terre se réchauffait, le XX^{ème} siècle a vu les glaces polaires fondre, les glaciers reculer sur l'ensemble de la planète et le niveau des océans augmenter de l'ordre de 17 cm. Ces changements ont des conséquences économiques et sociales importantes et les populations les plus affectées s'inquiètent à juste titre de leur future évolution. Malheureusement la complexité des mécanismes qui contrôlent le climat est encore aujourd'hui mal maîtrisée et les prédictions qui sont faites dans ce domaine souffrent d'importantes incertitudes.

On associe couramment le réchauffement climatique observé au cours du siècle dernier à l'augmentation simultanée de la concentration de gaz à effet de serre dans l'atmosphère terrestre, résultat de l'avènement parallèle de l'ère industrielle. Bien que ne contribuant que pour moins de 20% à l'effet de serre (la vapeur d'eau contribue pour plus de 50%), le gaz carbonique est particulièrement pointé du doigt: les émissions de CO₂ dans l'atmosphère ont augmenté d'un tiers dans la seconde moitié du XX^{ème} siècle. L'augmentation de la concentration de gaz carbonique dans l'atmosphère est tout aussi certaine que l'augmentation de la température terrestre.

Ce qui est moins clair, c'est à quel degré ces deux phénomènes sont corrélés (en supposant qu'ils le soient). Les réchauffements observés avant l'ère industrielle étaient, on l'a vu, commensurables à ceux qu'on a observés au cours du siècle dernier. Le calcul de l'effet qu'a l'augmentation de la concentration atmosphérique de gaz carbonique sur le climat est difficile; autant l'effet au premier ordre est facile à évaluer (transparence de l'atmosphère en fonction de la longueur d'onde et rayonnement du corps noir), autant les effets secondaires (feedback) sont complexes, mal compris et mal connus. Ils peuvent pourtant atteindre des valeurs comparables à l'évaluation au premier ordre. Il n'existe aucune évidence que l'émission de gaz carbonique dans l'atmosphère qui a accompagné l'avènement de l'ère industrielle soit responsable du réchauffement climatique qu'a connu le XX^{ème} siècle. Mais il n'existe non plus aucune évidence du contraire.

L'étude du climat dans les siècles qui ont précédé le XX^{ème} permet de mettre en évidence de fortes corrélations entre l'activité solaire et la température terrestre. Cette corrélation ne peut pas être due aux variations de luminosité solaire qui sont négligeables. En effet, les taches solaires, dont le nombre oscille sur une période de onze ans, sont entourées d'une zone plus brillante qui compense presque exactement la réduction de leur luminosité. Par contre, il semblerait que les rayons cosmiques

puissent fournir une explication plausible de cette corrélation. Les émissions du soleil (vent solaire et éjections), qui fluctuent fortement au cours du cycle solaire, n'ont pas assez d'énergie pour franchir le bouclier que constitue le champ magnétique terrestre et ne sauraient donc jouer un rôle direct. Mais elles transportent des champs magnétiques importants, très supérieurs à celui du dipôle solaire, qui affectent fortement la configuration du champ magnétique à l'intérieur du système solaire et par conséquent les trajectoires des rayons cosmiques qui atteignent la Terre. Ces derniers, en majorité des protons, ont une distribution d'énergie en loi de puissance d'indice ~ -2.7 coupée aux basses énergies par l'effet de bouclier du champ magnétique terrestre. Cette coupure dépend de la latitude et atteint un maximum de 17 GeV au Vietnam et des valeurs de l'ordre de 4 GeV en Europe et en Amérique du nord. Les fluctuations de l'activité solaire se reflètent donc directement sur les fluctuations de cette coupure et l'existence d'une forte corrélation entre le taux de rayons cosmiques mesuré sur la surface terrestre et l'activité solaire est bien établie. Le chaînon manquant de l'histoire est celui qui permettrait de comprendre comment les rayons cosmiques peuvent agir sur le climat.

Un candidat bien placé pour le faire est la formation des nuages. Les rayons cosmiques, et les grandes gerbes qu'ils produisent dans l'atmosphère terrestre, transportent une quantité importante de charges électriques et sont responsables de la quasi totalité de l'ionisation atmosphérique. La formation de nuages implique la condensation, quand les conditions de température et de pression s'y prêtent, d'une partie de la vapeur d'eau présente dans l'atmosphère. Cette condensation a besoin, pour se produire de façon notable, de noyaux de condensation sur lesquels les molécules d'eau puissent venir se fixer. En pratique, des molécules actives et radicaux libres (dimensions de l'ordre du nanomètre) se groupent pour former des noyaux de condensation qui croissent d'abord par accréation d'autres molécules (diamètres de l'ordre de la dizaine de nanomètres) puis par coagulation (diamètres de l'ordre de la centaine de nanomètres au micron). Quand ils ont atteint cette taille, les molécules d'eau viennent s'y fixer et des gouttelettes d'eau se forment jusqu'à atteindre des diamètres de 10 à 100 microns : elles forment les nuages. Si elles continuent à croître pour atteindre des diamètres de l'ordre de 1 à 2 millimètres, elles tombent au sol et c'est la pluie. Les phénomènes d'accréation qui caractérisent toutes les étapes de la formation des nuages sont certainement fortement facilités par la présence de l'ionisation produite par les rayons cosmiques. Malheureusement la connaissance que nous avons de ces phénomènes est trop rudimentaire pour nous permettre d'évaluer avec confiance le rôle précis que jouent les rayons cosmiques dans la formation des nuages. Des expériences sont en cours pour chercher à mieux comprendre ces mécanismes. S'il était établi qu'un accroissement d'activité solaire, entraînant une diminution du flux de cosmiques, ait pour résultat une diminution de la couverture nuageuse, sa corrélation avec une augmentation de la température terrestre serait

démontrée. Mais, dans l'état actuel de nos connaissances, rien ne nous permet de l'affirmer.

Récemment, le réchauffement climatique est devenu un enjeu politique de première grandeur. Une conséquence malheureuse est que le débat qu'il entraîne, fortement médiatisé et de plus en plus lié à des intérêts financiers, nationaux et sociaux souvent divergents, se déroule dans une ambiance de controverse peu propice à des discussions scientifiques sereines. Une conséquence heureuse, plus de quarante ans après les premiers avertissements du Club de Rome, est que la population de la planète prend conscience de la fragilité relative de l'équilibre des conditions qui permettent la survie de notre espèce. Il faudra sans doute encore bien des années avant que le climat terrestre soit bien compris; il faut y consacrer dès aujourd'hui un effort de recherche important.

REFERENCES

- [1] H. Svensmark and E. Friis-Christensen, Variation in cosmic ray flux and global cloud coverage - a missing link in solar-climate relationships, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 59 (1997) 1225.
- [2] M. Lockwood, R. Stamper and M.N. Wild, A doubling of the Sun's coronal magnetic field during the past 100 years, *Nature* 399 (1999) 437.
- [3] F. Arnold, Ion nucleation - a potential source for stratospheric aerosols, *Nature* 299 (1982) 134.
- [4] R.P. Turco, J.-K. Zhao and F. Yu, A new source of tropospheric aerosols: ion-ion recombination, *Geophys. Res. Lett.* 25 (1998) 635.
- [5] F. Yu and R.P. Turco, Ultrafine aerosol formation via ion-mediated nucleation, *Geophys. Res. Lett.* 27 (2000) 883.
- [6] S. Eichkorn, K. H. Wohlfrom, and F. Arnold, Massive ion detection in the upper troposphere: implications for aerosol particle formation via ion-induced nucleation, poster presented at the EGS General Assembly, The Hague (1999).
- [7] B.A. Tinsley and G.W. Dean, Apparent tropospheric response to MeV–GeV particle flux variations: a connection via the solar wind, atmospheric electricity and cloud microphysics, *J. Geophys. Res.* 96 (1991) 22283.
- [8] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), *Climate change 1995: the science of climate change*, eds. J.T. Houghton et al., WMO and UNEP, Cambridge University Press, Cambridge (1996).
- [9] *Aerosol-cloud-climate interactions*, International Geophysics Series, Vol. 54, ed. P.V. Hobbs, Academic Press Inc., San Diego (1993).
- [10] K. Greisen, *Phys. Rev. Lett.* 16 (1966) 748, Z.T. Zatsepin and V.A. Kuzmin, *Zh. Eksp. Teor. Fiz. Pis'ma Red.* 4 (1966) 144.
- [11] Abraham et al. (Auger Collaboration)rJ, Properties and performance of the prototype instrument of the Pierre Auger Observatory, *Nuclear Instruments and Methods*, A523 (2004) 50, and references therein.

- [12] K. Greisen, Proc. 9th Int. Cosmic Ray Conf. (1965) Inst. Phys. London, vol.2, p. 609. A.M. Hillas, Ann. Rev. Astron. Astrophys., 22 (1984), 425.
- [13] J. Abraham et al. (Auger Collaboration), Correlation of the highest energy cosmic rays with nearby extra-galactic objects, Science 318 (2007) 938.
- [14] *From Dimming to Brightening: Decadal Changes in Solar Radiation at Earth's Surface* by Martin Wild et al. (Science 6 May 2005; 308: 847–850).
- [15] H.Heitmann and F. Arnold, Composition measurements of tropospheric ions, Nature 306 (1993) 747.
- [16] A. Krieger and F. Arnold, First composition measurements of stratospheric negative ions and inferred gaseous sulphuric acid in the winter arctic vortex: Implications for aerosols and hydroxyl radical formation, Geophys. Res. Lett. 21 (1994) 1259.
- [17] H.Svensmark et al., Experimental evidence for the role of ions in partial nucleation under atmospheric conditions, Proc. Roy. Soc. A, October 2006.
- [18] B. Fastrup et al., A study of the link between cosmic rays and clouds with a cloud chamber at the CERN PS, CERN/SPSC 2000-021 SPSC/P317, April 24, 2000.