EXTRAIT DU RAPPORT D'ACTIVITE DE L'INSTITUT POLAIRE FRANCAIS 2015-2016

MISE A JOUR 2019

LE PROGRAMME RAYCO

SURVEILLANCE DU RAYONNEMENT COSMIQUE AUX ÎLES KERGUELEN ET EN TERRE ADÉLIE

Rapport d'activité
Campagne d'été 2015-2016

2015

Rapport_activite_2015-2016_RAYCO_v2019b.indd 1 07/06/2019 14:25

©Laurent Ballesta

Wild touch - Institut polaire français

Toutes les photos sans nom d'auteur appartiennent à l'IPEV et ont été réalisées pas les équipes de l'Institut polaire français lors de leurs missions.

Direction de la publication : Yves Frenot

Département communication de l'Institut polaire français Paul-Emile Victor, IPEV

Création graphique : Agence "D'une idée l'autre", Brest

Intégration et coordination : Aude Sonneville

Impression : Calligraphy

ISBN : 978-2-910180-75-1

IPEV – Institut polaire français Paul-Emile Victor
Technopôle Brest-Iroise
CS 60 075 – 29280 Plouzané -France
Tel : + 33 (0)2 98 05 65 00
Fax : + 33 (0)2 98 05 65 55
www.institut-polaire.fr

4ème trimestre 2016

Rapport_activite_2015-2016_RAYCO_v2019b.indd 2 07/06/2019 14:25

PROGRAMME RAYCO

Surveillance du rayonnement cosmique aux Îles Kerguelen et en Terre Adélie

Karl-Ludwig Klein[1] • Nicolas Fuller[1] • Ymane Taoufiq[1] • Alain Desautez[2]

La Terre est en permanence bombardée par des particules de haute énergie – protons, ions, électrons – provenant de l'Univers. Au travers de cascades de réactions nucléaires dans l'atmosphère de la Terre, les protons et ions créent des particules secondaires au sol qui peuvent être détectées par les moniteurs à neutrons. Cet article donne un aperçu des observations des moni-teurs à neutrons aux Iles Kerguelen et en Terre Adélie pour la physique solaire et pour des applications à la météorologie de l'espace, en l'occurrence l'évaluation des doses de radiation reçues par le personnel de l'aviation civile.

The Earth is continually bombarded by high-energy particles of cosmic origin – protons, ions, electrons. Protons and ions create secondary particles through cascades of nuclear reactions in the Earth's atmosphere, which can be detected by neutron monitors at ground level. This article gives a glimpse of the observations conducted with the neutron monitors at Kerguelen Islands and at Terre Adélie for solar physics and space weather applications, especially the evaluation of radiation doses received by civil air crew.

LE RAYONNEMENT COSMIQUE

La Terre est la cible permanente de particules chargées de haute énergie en provenance de l'Univers – électrons, protons, noyaux atomiques lourds. Plusieurs sources se situent dans notre galaxie, comme les restes de supernovae, résultant de l'explosion d'étoiles massives. Le Soleil produit également, lors de certaines éruptions, des jets de particules énergétiques. Dans certains cas, des protons acquièrent une énergie jusqu'à dix millions de fois supérieure à celle qu'ils avaient avant l'accélération. Pour comparaison, un sprinter qui court 100 mètres en 10 secondes a une énergie cinétique de 81 fois supérieure au piéton moyen. L'accélération des particules chargées requiert l'établissement temporaire d'un champ électrique dans un milieu qui est électriquement conducteur. Les mécanismes mis en jeu sont encore une source d'interrogation et d'étude pour les astrophysiciens.

Pour répondre à ces questions, nous avons besoin d'observations. Nous voulons d'une part comprendre les mécanismes physiques à l'œuvre. D'autre part, les rayons cosmiques interagissent avec l'atmosphère de la Terre. Ils affectent ainsi la composition et l'ionisation de l'atmosphère, interagissent avec l'électronique à bord des véhicules spatiaux et des avions et créent des doses de radiation auxquelles sont exposés les voyageurs et, de façon répétée, le personnel navigant de l'aviation. Ce sujet fait partie de la météorologie de l'espace. Le programme RAYCO fournit, par la surveillance du rayonnement cosmique, des données de base pour la recherche astrophysique et pour la surveillance des doses de radiation reçues par les équipages de l'aviation civile en France.

COMMENT OBSERVER LE RAYONNEMENT COSMIQUE : LES MONITEURS À NEUTRONS

Une particule de haute énergie heurtant un atome de l'atmosphère terrestre casse le noyau et produit des particules secondaires, notamment des protons et neutrons. Certaines (indiquées par P et N dans le schéma de la Figure 1) ont une énergie suffisante pour reproduire ce processus avec d'autres noyaux, plus bas dans l'atmosphère. Une cascade d'interactions nucléaires s'établit qui

(1)LESIA – Observatoire de Paris, CNRS, PSL Research University, Université Paris-Diderot, Sorbonne Université, Meudon. ludwig.klein@obspm.fr
(2)IPEV - Institut polaire français, Plouzané

Rapport_activite_2015-2016_RAYCO_v2019b.indd 3 07/06/2019 14:25

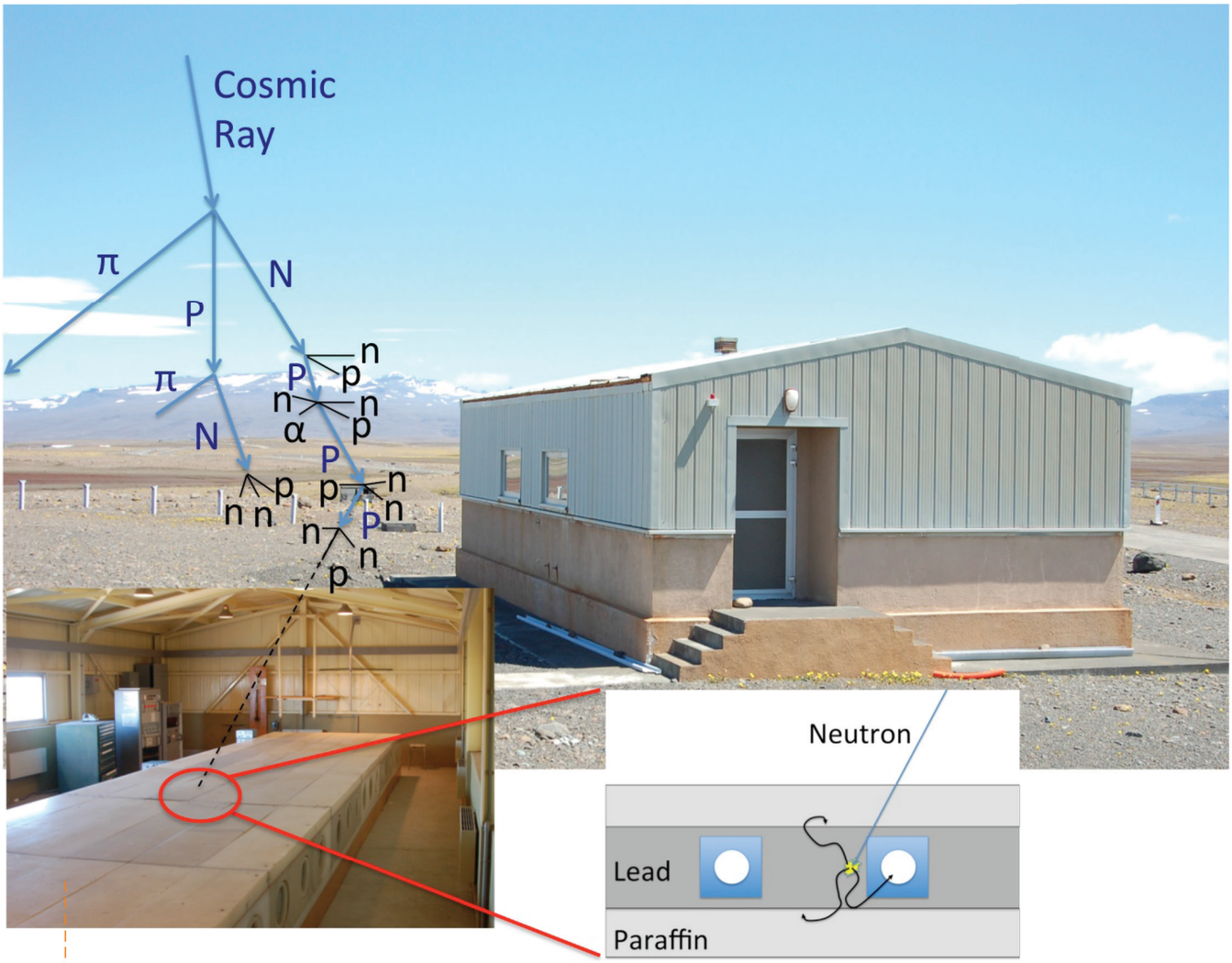

Figure 1 - Schéma d'une cascade de particules dans l'atmosphère de la Terre et de la détection par un moniteur à neutrons.

atteint le sol si l'énergie de la particule primaire est d'au moins 450 MeV[1], correspondant à une vitesse de 74% de la vitesse de la lumière. Tout le long du chemin, des protons et neutrons de moindre énergie (indiqués par p et n dans le schéma) sont également éjectés.

Les moniteurs à neutrons sont composés de tubes de comptage entourés de plomb, où les particules secondaires produisent des neutrons supplémentaires. Dans l'illustration de la *Figure1*, le neutron incident produit trois neutrons qui traversent l'instrument dans une marche aléatoire (lignes noires). Deux sont arrêtés dans la paraffine entourant le plomb, alors qu'un neutron entre dans le modérateur qui entoure le tube de détection (surface dessinée en bleu). Le neutron y est freiné avant d'entrer dans le tube de comptage. Là, le neutron produit des réactions nucléaires avec du fluor, libérant des noyaux atomiques électriquement chargés qui sont collectés sur une électrode et détectés. Un moniteur à neutrons mesure donc surtout des neutrons, mais les rayons cosmiques créant la cascade sont en général des protons et ions lourds.

Bien avant d'arriver dans la haute atmosphère, le rayonnement cosmique subit l'influence du champ magnétique terrestre, qui filtre les particules en fonction de leur énergie. À proximité des pôles géomagnétiques, les particules atteignent l'atmosphère le long des lignes de champ qui émergent verticalement de la Terre. Le champ magnétique

1 MeV (mega-électron-Volt) = 1,6 10^{-13} Joule, 1 GeV (giga-électron-Volt) = 10^{3} MeV

Rapport_activite_2015-2016_RAYCO_v2019b.indd 4 07/06/2019 14:25

n'oppose alors aucun obstacle à la propagation de la particule. En revanche, à l'équateur, les lignes de champ sont un barrage que seules les particules avec une énergie supérieure à 10 GeV peuvent passer.

De ce fait, des moniteurs à neutrons à différents points sur la Terre voient des particules dans des gammes d'énergie différentes. La mise en réseau des moniteurs permet de mesurer le spectre d'énergie des rayons cosmiques et la direction d'arrivée. La cinquantaine de moniteurs du réseau mondial devient ainsi un seul instrument bien plus puissant que les moniteurs individuels. La France participe au réseau mondial avec les moniteurs des Iles Kerguelen et de Terre Adélie.

LE RÉSEAU MONDIAL DES MONITEURS À NEUTRONS ET LE PROJET NEUTRON MONITOR DATABASE (NMDB)

Le concept des moniteurs à neutrons date des années 1950. Une collaboration informelle s'est créée dès le début. Elle a conduit à un concept unifié d'un moniteur à neutrons. Ces instruments sont placés à différents endroits pour exploiter la capacité de spectrométrie et de détection des directions d'arrivée. Compte tenu de l'intérêt scientifique persistant et d'un besoin croissant d'accéder aux mesures du rayonnement cosmique, un groupe de chercheurs européens et de quelques pays limitrophes s'est constitué en 2007 pour créer une base de données donnant un accès standardisé aux observations des moniteurs à neutrons qui participent. Le projet NMDB a vu le jour grâce au financement de l'Union Européenne dans le cadre de son 7e Programme-cadre pour la recherche et le développement technologique en 2008 et 2009. L'Observatoire de Paris a développé l'interface graphique d'accès aux données, dont deux illustrations sont montrées dans les Figures 2 et 3. L'évidente valeur ajoutée du projet a incité des groupes aux États-Unis, au Mexique, en Australie, en Afrique du Sud, Thaïlande et Corée du Sud à le rejoindre. Grâce à ce réseau unique, de nombreux moniteurs fournissent dorénavant des données en temps réel (1 mesure/ minute) accessibles publiquement[2].

2 www.nmdb.eu

QUELQUES ILLUSTRATIONS

La modulation solaire du rayonnement cosmique galactique

La Figure 2 montre l'évolution depuis 50 ans des rayons cosmiques mesurés par les moniteurs à neutrons de Kerguelen, Kiel et Terre Adélie. On note une variation avec une amplitude d'environ 10% du taux de comptage moyen. La comparaison avec l'indice des taches solaires (Ri12, fourni par l'Observatoire Royal de Belgique; courbe en violet), qui est une indication de l'intensité du champ magnétique du Soleil, révèle une anticorrélation : le flux du rayonnement cosmique à la Terre est plus intense quand les taches solaires sont rares, et moins intense quand elles sont nombreuses. Ce phénomène bien connu, appelé la modulation solaire du rayonnement cosmique, révèle l'effet d'écran du champ magnétique solaire. Ce champ magnétique, mesuré par l'indice des taches à la surface du Soleil, est transporté dans l'espace interplanétaire par le vent solaire. Quand il est intense, il réduit le flux des rayons cosmiques pénétrant à l'intérieur du système solaire. La variation de l'indice des taches avec une période d'environ 11 ans révèle le cycle d'activité du Soleil. Le champ magnétique interplanétaire, montré indirectement par le flux des rayons cosmiques, y répond.

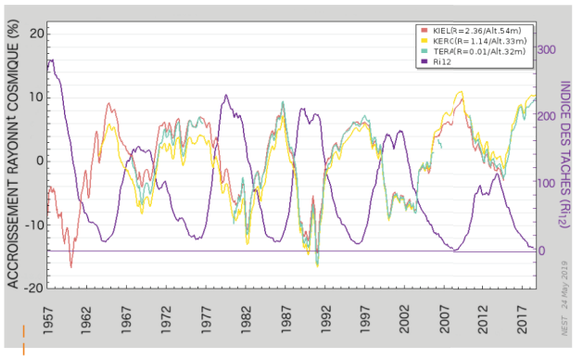

Figure 2 – Rayonnement cosmique (ordonnée gauche) et indice des taches solaires (violet, ordonnée droite) de 1957 à 2019. Source: www.nmdb.eu.

Mais, comme on le voit également dans la Figure 2, la modulation solaire évolue à l'échelle de plusieurs cycles solaires: le flux des rayons cosmiques mesuré aux alentours du maximum d'activité a augmenté entre 1991, 2001 et 2014. Il a augmenté au dernier minimum d'activité (2008) par rapport à tous les minima précédents depuis 1957. Ces augmentations du flux de particules traduisent la diminution du champ magnétique interplanétaire : une diminution lente du champ magnétique global du Soleil se superpose à sa variation avec le cycle d'activité.

Rapport_activite_2015-2016_RAYCO_v2019b.indd 5 07/06/2019 14:25

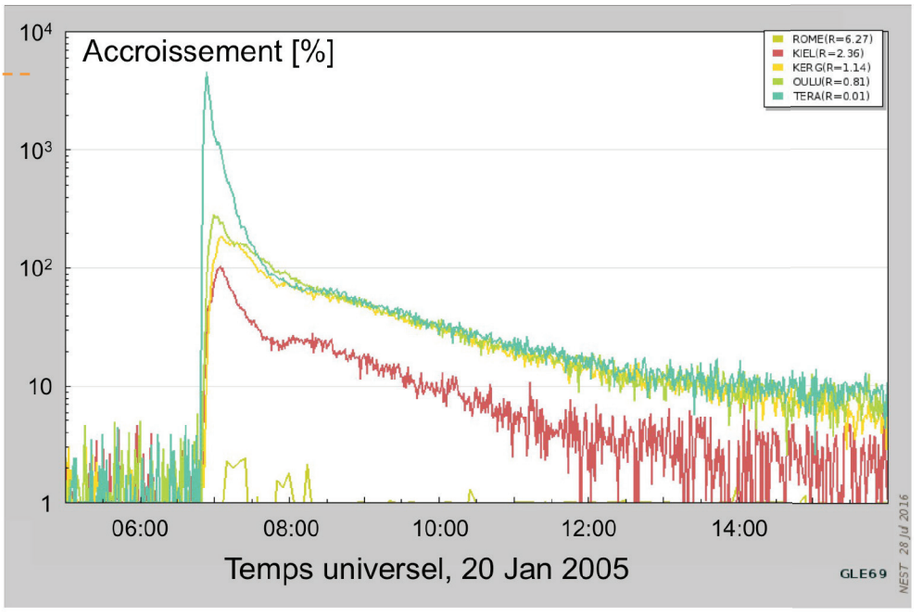

Figure 3
L'événement solaire du 20 janvier 2005 vu par quelques moniteurs à neutrons. Source:www.nmdb.eu.

Observation des particules solaires les plus énergétiques

Le Soleil accélère des électrons, protons et ions lors de certaines éruptions, où de l'énergie emmagasinée dans le champ magnétique de la couronne solaire est libérée de façon explosive. Une question clef pour identifier les processus d'accélération est de savoir jusqu'à quelles énergies le spectre des particules s'étend. Le Soleil donne l'occasion unique en astrophysique d'observer les phénomènes éruptifs dans sa couronne et des particules accélérées qui s'échappent dans l'espace interplanétaire. Des particules jusqu'à quelques dizaines ou centaines de MeV sont mesurées de façon continue par des sondes spatiales. Les moniteurs à neutrons mesurent la composante haute énergie jusqu'à plusieurs dizaines de GeV, si elle existe.

Mais une dizaine d'événements solaires seulement est détectée par les moniteurs à neutrons en moyenne par cycle d'activité de 11 ans : le Soleil est certes capable d'accélérer des particules à des énergies de quelques GeV, mais il s'agit là de cas extrêmes. L'actuel cycle d'activité du Soleil se révèle, là encore, particulièrement faible : seulement deux événements à particules, assez modestes, ont été détectés par les moniteurs à neutrons depuis 2007.

Un événement très fort a été observé le 20 Janvier 2005.

Comme le montre la *Figure 3*, différents moniteurs à neutrons répondent de façon différente : Rome ne voit pas d'excès, parce que les particules accélérées n'étaient pas assez énergétiques pour accéder à cette station. Terre Adélie voit un signal bref et très fort, dépassant le niveau du rayonnement cosmique galactique presque d'un facteur 50. Le signal monte plus lentement à Kerguelen, Oulu, Kiel et le maximum est bien moindre. Cette différence révèle surtout la directivité des particules solaires. Le moniteur de Terre Adélie "regardait" pendant cet événement le long de la direction du champ magnétique interplanétaire. Le gros des particules venait de cette direction-là. Elles étaient invisibles aux autres moniteurs, où les particules arrivaient plus tard de toutes les directions, après avoir été diffusées par les fluctuations du champ magnétique interplanétaire.

Cette évolution temporelle nous a conduits sur la piste de l'accélérateur: dans plusieurs articles[3] nous avons comparé le profil temporel des moniteurs à neutrons avec les processus éruptifs dans la couronne solaire. Nous concluons que les protons et ions sont sans doute accélérés aux très hautes énergies dans des champs magnétiques complexes de la couronne, dont la restructuration au cours de l'éruption crée des champs électriques temporaires. Le déroulement précis de ce processus et la manière dont les particules atteignent de si hautes énergies n'est pas encore compris.

3 Masson et al. 2009, Klein et al. 2014, 2015

Rapport_activite_2015-2016_RAYCO_v2019b.indd 6 07/06/2019 14:25

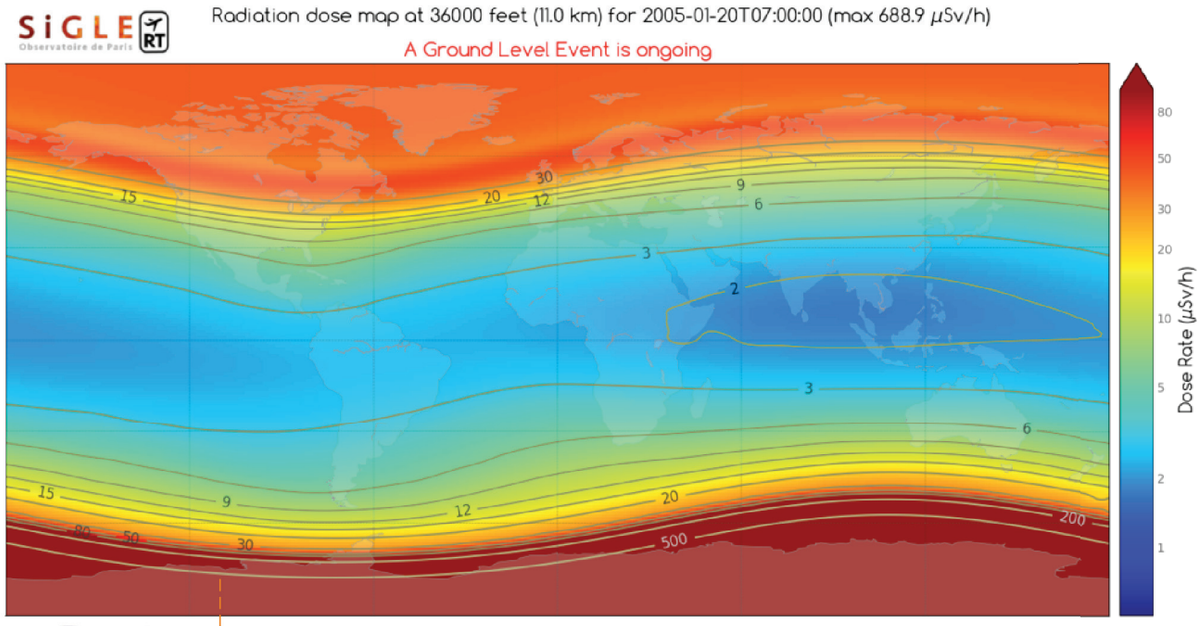

Figure 4 - Carte du débit de dose estimé à l'altitude de 11 km par le modèle SiGLE_RT pendant l'événement solaire à particules du 20 janvier 2005.

Météorologie de l'espace: le système SIEVERT

Le flux des particules secondaires engendrées par les rayons cosmiques dans l'atmosphère de la Terre devient important au-dessous d'une altitude d'environ 40 km. A l'altitude des vols de l'aviation civile, aux alentours de 12 km, la dose biologique de radiation est environ le double de celle au sol. De ce fait des personnes se trouvant exposées sur des durées prolongées font l'objet d'une surveillance médicale spécifique. En Europe, chaque membre du personnel navigant de l'aviation civile doit disposer d'un bilan de son exposition tenant compte de la route des vols effectués. Des mesures doivent être prises par les compagnies pour éviter le dépassement de seuils d'exposition.

Dans le cadre du système SIEVERT, développé par la Direction générale de l'aviation civile (DGAC), l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) et l'Observatoire de Paris, les moniteurs à neutrons des Iles Kerguelen et de Terre Adélie sont utilisés pour la surveillance des flux des rayonnements cosmiques galactique et solaire. Le flux du rayonnement galactique est permanent, mais, comme le montre la Figure 2, lentement variable. Il est mesuré et prédit pour les mois à venir. Lors d'événements solaires particulièrement intenses, un modèle dédié estime la dose supplémentaire engendrée en chaque point d'un maillage 3D de l'atmosphère de la Terre. Ces valeurs, fournies à l'IRSN, permettent d'évaluer les doses en fonction des routes des vols qui ont été opérés pendant l'événement.

La Figure 4 donne une carte instantanée du débit de dose (dose par unité de temps) lors de l'événement solaire du 20 Janvier 2005. Des régions en rouge foncé sont les plus exposées, avec un maximum de 689 µSv (micro-Sievert) par heure, alors que les régions en bleu, avec une dose de 2 µSv par heure, sont les mieux protégées par le champ magnétique de la Terre.

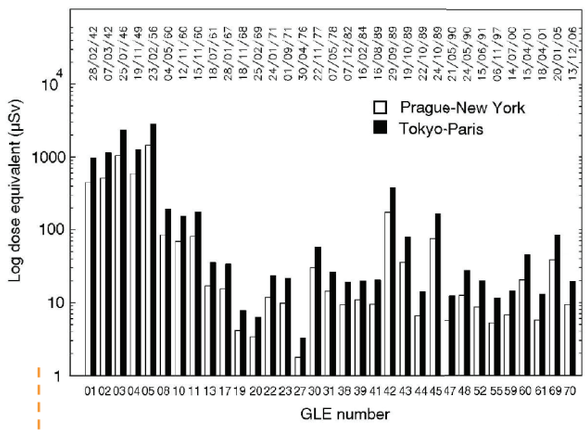

Figure 5 - Doses à bord de deux vols types lors des événements solaires à particules détectés au niveau de la mer. D'après Lantos & Fuller (2004).

Rapport_activite_2015-2016_RAYCO_v2019b.indd 7 07/06/2019 14:25

D'un point de vue historique, cet événement, bien que rare, n'est pas exceptionnel. La Figure 5 donne l'estimation, par une méthode similaire, des doses reçues à bord de vols types lors de tous les événements solaires à particules détectés au sol depuis 1942. Le niveau typique de la dose sur ces vols est d'environ 50 µSv en l'absence d'événement solaire. Les événements les plus importants ont été détectés dans les années 1940 et 1950. Ceux survenus plus tard n'ont fait que doubler ou tripler la dose de radiation habituelle. La dose annuelle reçue, qui est la valeur cumulative à surveiller, n'est donc pas fortement affectée par ce type d'événement. Un événement solaire majeur doit être inclus dans la surveillance des effets cumulatifs, mais une alerte en temps réel ne se justifie pas dès lors que l'événement individuel ne constitue pas une menace particulière d'un point de vue dosimétrique.

Un nouveau service pour l'aviation civile

L'organisation internationale de l'aviation civile (OACI) établit un service mondial opérationnel de météorologie de l'espace à partir de 2019. La France y participe par un consortium constitué de Météo France et des sociétés ESSP (*European Satellite Services Provider*) et CLS (*Collecte Localisation Satellites*). Pour le suivi des doses de radiation par les rayons cosmiques, ce consortium utilisera les outils développés dans le cadre de SIEVERT, que nous avons adaptés récemment à un fonctionnement en temps réel. Ce système repose sur des mesures des moniteurs à neutrons et la disposition en temps réel de leurs données.

POURQUOI LES MONITEURS À NEUTRONS ?

Les moniteurs à neutrons ont été conçus dans les années 1950-1965. Malgré leur âge, ils restent l'équipement standard pour mesurer les particules les plus énergétiques que le Soleil est capable d'accélérer. Ils sont à ce titre un complément essentiel des mesures depuis les sondes spatiales aux énergies plus basses. Ils le seront de nouveau pour les projets Solar Orbiter (ESA) et Parker Solar Probe (NASA) qui s'approcheront du Soleil jusqu'à 0,3, voire 0,05 fois la distance Soleil-Terre et fourniront des données inédites sur les particules jusqu'à des énergies d'une centaine de MeV. Les moniteurs jouent aussi un rôle grandissant dans les activités de météorologie de l'espace. C'est parce qu'ils sont en service depuis longtemps qu'ils nous renseignent sur l'évolution globale du champ magnétique du Soleil, qui est un sujet important pour la compréhension du cycle d'activité. Le développement d'une base de données spécifique, NMDB, qui donne un accès unifié à une grande partie du réseau mondial des moniteurs à neutrons, a récemment conduit à une meilleure disponibilité des données pour la communauté scientifique et pour un nombre croissant d'autres utilisateurs. La collaboration entre l'IPEV et l'Observatoire de Paris restera essentielle pour assurer la contribution française.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Klein K.-L., Masson S., Bouratzis C., Grechnev V., Hillaris A., Preka-Papadema P., The relativistic solar particle event of 2005 January 20: evidence on the origin of delayed particle acceleration, Astron. Astrophys 572, A4 (2014)
- Klein K.-L., Agueda N., Bütikofer R., On the origin of relativistic solar particle events: interplanetary transport modelling and radio emission, 34th Int Cos Ray Conf, La Haye, 2015, Proc. of Science (2015)
- Lantos P., Fuller N., Semi-empirical model to calculate potential radiation exposure on board airplane during solar particle events, IEEE Trans. Plasma Sci. 32(4), 1468 (2004)
- Masson S., Klein K.-L., Bütikofer R., Flückiger E.O., Kurt V., Yushkov B., Krucker S., Acceleration of relativistic protons during the 20 January 2005 flare and CME, Solar Phys 257, 305 (2009)

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient l'IPEV et son personnel, ainsi que les volontaires du service civique qui assurent le suivi des moniteurs à neutrons à Kerguelen et Terre Adélie, pour le soutien qu'ils apportent depuis de nombreuses années au programme RAYCO.

Rapport_activite_2015-2016_RAYCO_v2019b.indd 8 07/06/2019 14:25