



RAPPORT  
D'ACTIVITÉ



**2023**  
Campagne d'été  
22/23

# RAYCO

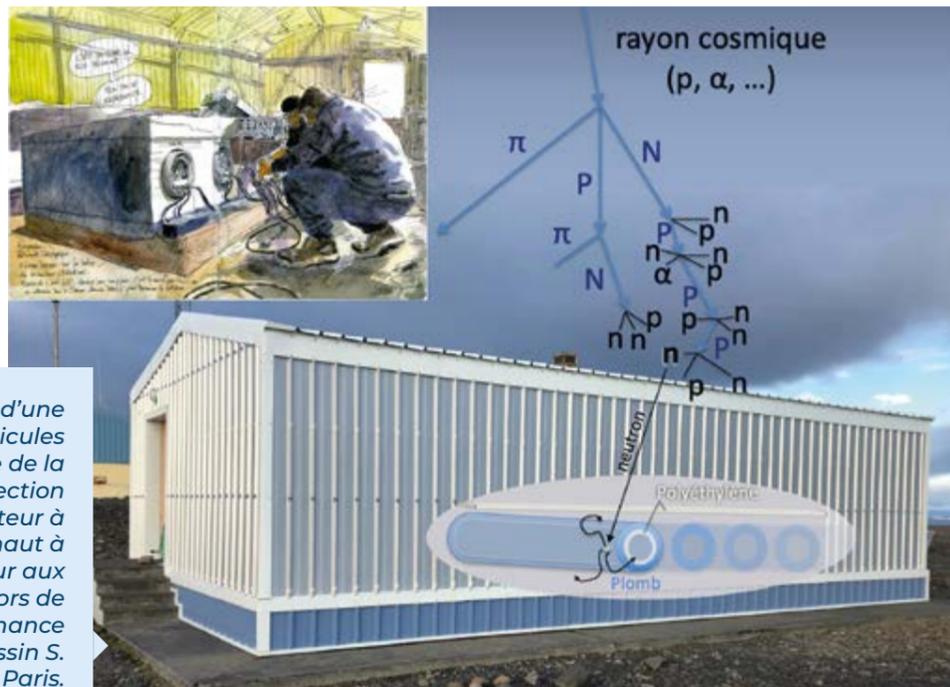
## SURVEILLANCE DU RAYONNEMENT COSMIQUE AUX ILES KERGUELEN ET EN TERRE ADÉLIE

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, elles créent des particules secondaires au sol qui peuvent être détectées par les moniteurs à neutrons. Cet article donne un aperçu des observations réalisées grâce aux moniteurs à neutrons des Iles Kerguelen et de Terre Adélie et de leur utilité pour la physique solaire et des applications en météorologie de l'espace, en l'occurrence l'évaluation des doses de radiation reçues par le personnel navigant de l'aviation civile.

### Le rayonnement cosmique

La Terre est la cible permanente de particules chargées de haute énergie en provenance de l'Univers qu'on appelle le rayonnement cosmique – électrons, protons, noyaux atomiques lourds. Elles proviennent des supernovae dans notre galaxie et, lors de certaines éruptions, du Soleil.

L'Institut Polaire Français héberge deux détecteurs de rayonnement cosmique, appelés moniteurs à neutrons, aux Iles Kerguelen et en Terre Adélie. L'Observatoire de Paris assure leur exploitation scientifique dans le cadre d'un service d'observation de l'Institut National des Sciences de l'Univers (INSU) du CNRS et intervient sur l'instrumentation depuis 2018.



**Figure 1 :** Schéma d'une cascade de particules dans l'atmosphère de la Terre et de la détection par un moniteur à neutrons. En haut à gauche: le moniteur aux Iles Kerguelen lors de travaux de maintenance en Avril 2023. Dessin S. Cnudde, Obs. Paris.

Nicolas Fuller <sup>(1)</sup>  
Karl-Ludwig Klein <sup>(1)</sup>  
Cyrille Blanchard <sup>(1)</sup>  
Sylvain Cnudde <sup>(1)</sup>  
Sophie Masson <sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup> Laboratoire d'Etudes Spatiales et d'Instrumentation en Astrophysique (LESIA) – Observatoire de Paris, CNRS, PSL Research University

5 Place Jules Janssen  
92190 Meudon  
nicolas.fuller@obspm.fr

<sup>(2)</sup> Laboratoire de Physique des Plasmas (LPP) et Observatoire de Paris

4 place Jussieu  
75005 Paris  
sophie.masson@obspm.fr



### Que mesure un moniteur à neutrons ?

Un proton ou noyau atomique de haute énergie heurtant un atome de l'atmosphère terrestre casse le noyau qui éjecte des particules secondaires, notamment des protons et neutrons. Certaines (P, N dans le schéma de la Fig. 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 atteint le sol si l'énergie de la particule primaire est d'au moins 450 MeV<sup>1</sup>, correspondant à une vitesse de 74% de celle de la lumière.

Les moniteurs à neutrons sont composés de tubes de comptage entourés de plomb, où les particules secondaires produisent des neutrons supplémentaires (Fig. 1). Ces neutrons interagissent avec le gaz contenu dans le tube de comptage en produisant des ions, qui eux-mêmes produisent des électrons libres qui sont détectés par l'électronique de mesure. Le nombre d'impulsions électriques résultant de ce processus mesure le flux de particules primaires qui impactent la haute atmosphère terrestre.

<sup>1</sup> 1 MeV (mega-électron-Volt) = 1,6 10<sup>-13</sup> Joule  
1 GeV (giga-électron-Volt) = 10<sup>3</sup> MeV

Le champ magnétique terrestre filtre les rayons cosmiques en fonction de leur énergie. A proximité des pôles géomagnétiques, ils atteignent l'atmosphère le long des lignes de champ magnétique. A l'équateur, les lignes de champ sont perpendiculaires au trajet et ne laissent passer que les particules d'une énergie supérieure à 10 GeV. Les moniteurs à neutrons à différents points sur la Terre voient donc différentes gammes d'énergie.

Leur mise en réseau permet de mesurer le spectre d'énergie des rayons cosmiques et la direction d'arrivée, ce qui fait de la cinquantaine de moniteurs du réseau mondial un seul instrument bien plus puissant que les moniteurs individuels.

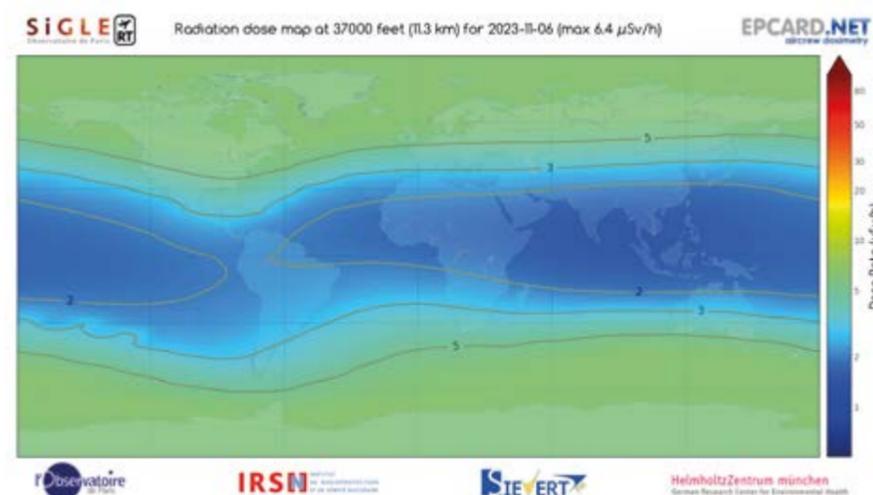
La plupart, dont les moniteurs français, fournissent leurs observations à la base de données NMDB à l'Université de Kiel (Allemagne). Elle a été construite avec un financement de l'Union Européenne en 2008-09 et s'est étendue au niveau mondial depuis ([www.nmdb.eu](http://www.nmdb.eu)).

## Météorologie de l'espace

Le flux des particules secondaires constitue une irradiation dans l'atmosphère, qui diminue quand l'altitude décroît. Au sol, la radioactivité naturelle ainsi que les radiographies médicales représentent la plus grande partie de l'exposition aux rayonnements ionisants.

Depuis 2019, l'organisation de l'aviation civile internationale (OACI) a établi un service mondial opérationnel de météorologie de l'espace. La France y participe par un consortium constitué de Météo France et des sociétés ESSP (European Satellite Services Provider) et CLS (Collecte Localisation Satellites) à Toulouse. CLS utilise les outils que nous avons développés dans le cadre de SIEVERT et adaptés afin de fournir des alertes lorsque les doses de radiation dans l'atmosphère augmentent brusquement. Ce suivi repose sur les mesures des moniteurs à neutrons fournies par le réseau NMDB. Des cartes quotidiennes des débits de dose (Figure 2) sont aussi disponibles via les sites web publiques :

- [https://previ.obspm.fr/airdosrt/airdos\\_RT.php](https://previ.obspm.fr/airdosrt/airdos_RT.php)
- <http://www.meteo-espace.fr/forecasts/fr>



**Figure 2 :** Carte journalière du débit de dose, à une altitude de l'aviation civile, produite par le rayonnement cosmique galactique en période de faible activité solaire. [https://previ.obspm.fr/airdosrt/airdos\\_RT.php](https://previ.obspm.fr/airdosrt/airdos_RT.php)

À l'altitude des vols de l'aviation civile, aux alentours de 12 km, la dose biologique engendrée par les rayons cosmiques est prédominante. Pour cette raison, chaque membre du personnel navigant européen doit bénéficier d'une surveillance spécifique, afin de limiter son exposition.

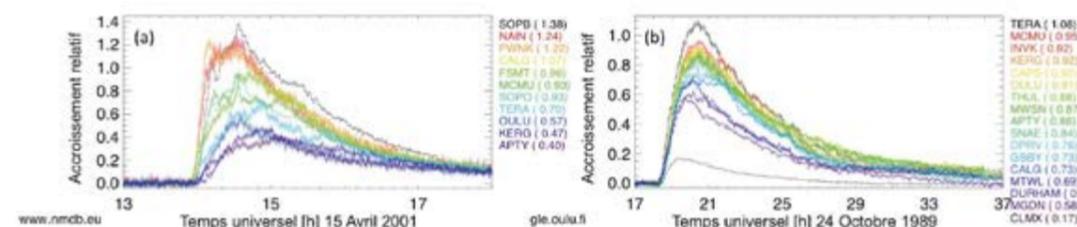
Le système SIEVERT, développé par la Direction Générale de l'Aviation Civile (DGAC), l'Institut de Radioprotection et de Sécurité Nucléaire (IRSN) et l'Observatoire de Paris, évalue les doses de radiation a posteriori pour les compagnies françaises.

## Recherche astrophysique particules solaires de haute énergie

Le Soleil accélère des électrons, protons et ions lorsque l'énergie emmagasinée dans le champ magnétique de la couronne solaire est libérée de façon explosive. Les protons solaires que nous détectons avec un moniteur à neutrons ont plusieurs millions de fois l'énergie moyenne de ceux de la couronne solaire. Il s'agit d'identifier les mécanismes physiques qui engendrent un si gros gain en énergie. L'étude des profils temporels des événements solaires vu par les moniteurs à neutrons contribue à notre compréhension de ces mécanismes et à ceux de la propagation des particules dans le milieu interplanétaire.

Les profils de deux événements solaires sont tracés sur la Figure 3. Pour chaque moniteur la courbe est différente car, selon sa localisation, il est sensible à une direction particulière de propagation des particules. Celui qui voit la montée la plus rapide et l'amplitude la plus grande détecte les particules arrivant le long du champ magnétique interplanétaire. Les deux événements semblent similaires: une montée rapide, puis une décroissance lente, avec quelques différences autour du maximum. Mais les axes de temps sont différents - 5 heures en (a), 20 heures en (b). La similitude de forme se révèle quand on utilise une échelle de temps normalisée à la durée de l'événement.

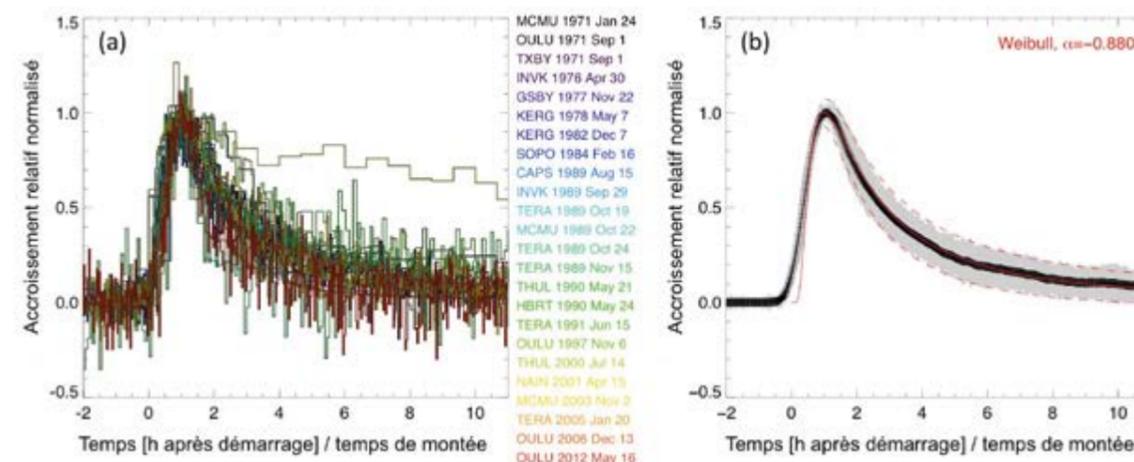
**Figure 3 :** Profils temporels enregistrés par différents moniteurs à neutrons (différentes couleurs) lors de deux événements solaires à particules.



Pour voir si c'est le cas général, nous avons examiné avec Sophie Musset, chercheuse à l'Agence Spatiale Européenne (ESA), tous les événements solaires observés depuis 1971 avec une amplitude d'au minimum 10% au-dessus du niveau du rayonnement cosmique permanent. La Figure 4a montre qu'à une exception près, les profils normalisés se ressemblent. Dans ce cas exceptionnel, des particules revenant de l'espace interplanétaire lointain, réfléchies par une perturbation du champ magnétique, s'ajoutaient au profil observé. Nous pouvons donc bien conclure que ces événements solaires à particules ont un profil normalisé type. La Figure 4b montre le profil médian, avec en rouge une fonction mathématique qui représente bien la partie décroissante.

**Figure 4 :** Profils temporels normalisés des événements solaires détectés avec les moniteurs à neutrons depuis 1971 (a) et le profil médian, avec un ajustement (en rouge) par une fonction mathématique (b).

Le Soleil semble donc accélérer les particules de très haute énergie de façon à produire des événements longs quand la montée est longue et courte quand la montée est courte - la montée elle-même pouvant varier de moins de 10 minutes à plus de 3 heures, selon l'événement. Une autre explication serait que la propagation entre le Soleil et la Terre, dans les champs magnétiques fluctuants de l'espace interplanétaire, uniformise tous les profils. La question n'est pas tranchée. Ce résultat a aussi une application potentielle pour la météorologie de l'espace: dès que le taux de comptage des moniteurs à neutrons aura dépassé son maximum lors d'un événement en cours, le profil médian, adapté à l'événement, nous permettra d'estimer la durée pendant laquelle les doses resteront élevées.



## Les moniteurs à neutrons de Kerguelen et Terre Adélie : deux instruments clefs du réseau international

Les moniteurs à neutrons ont été conçus dans les années 1950-1965. L'implantation à Kerguelen date de 1957, celle en Terre Adélie de 1967. De par leurs emplacements, ils occupent des points stratégiques du réseau mondial : peu de terres émergées aux alentours de Kerguelen, proximité du pôle magnétique en Terre Adélie. Leurs séries temporelles font également parti des plus longues existantes.

Ces dernières années, l'Observatoire de Paris (LESIA) a joué un rôle actif dans la maintenance des moniteurs. En 2021 et 2023 deux missions ont été réalisées avec pour objectif premier de garantir l'étanchéité des tubes de comptage vis-à-vis du gaz qu'ils contiennent. Des mesures ont été effectuées afin de s'assurer de l'état de santé des moniteurs et deux tubes de comptage ont

été remplacés. Une étude visant à renouveler l'électronique de comptage par un système aux fonctionnalités élargies est en cours.

L'objectif de l'ensemble de ces opérations est de fiabiliser les moniteurs pour les années à venir. Car, malgré leur âge, les moniteurs à neutrons 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 plus basses énergies, comme actuellement Solar Orbiter (ESA) et Parker Solar Probe (NASA). L'intérêt renouvelé pour les moniteurs à neutrons, dans le cadre de la météorologie de l'espace et de la physique solaire, leur garantit une utilité sociétale et scientifique pour de nombreuses années encore. La collaboration entre l'Institut polaire français et l'Observatoire de Paris reste essentielle pour assurer la contribution française à ces recherches et services.

*Remerciements : Les auteurs remercient l'Institut polaire français et son personnel, ainsi que les volontaires du service civique qui assurent le suivi des instruments à Kerguelen et Terre Adélie, pour le soutien qu'ils apportent depuis de nombreuses années au programme RAYCO.*



### Références bibliographiques:

Musset S., Klein K.-L., Fuller N., Khreich G., Wargnier A., The time profile of relativistic solar particle events as observed by neutron monitors, *J. Space Weather Space Clim.* 2023, 13, 15, <https://doi.org/10.1051/swsc/2023016>