PROJET BIOSPHERE

Explorer l'impact des rayonnements cosmiques et solaires sur la vie terrestre

Viviane Pierrard

Le projet BIOSPHERE a pour objectif principal d'évaluer l'impact mutuel des rayons cosmiques et du rayonnement UV biologiquement actifs sur la biosphère terrestre et de développer pour cela des outils, des méthodologies et un cadre métrologique de normes et de procédures. Il réunit 22 institutions européennes de premier plan, dont l'Institut royal d'Aéronomie Spatiale de Belgique (IASB) et l'Institut Royal Météorologique (IRM).

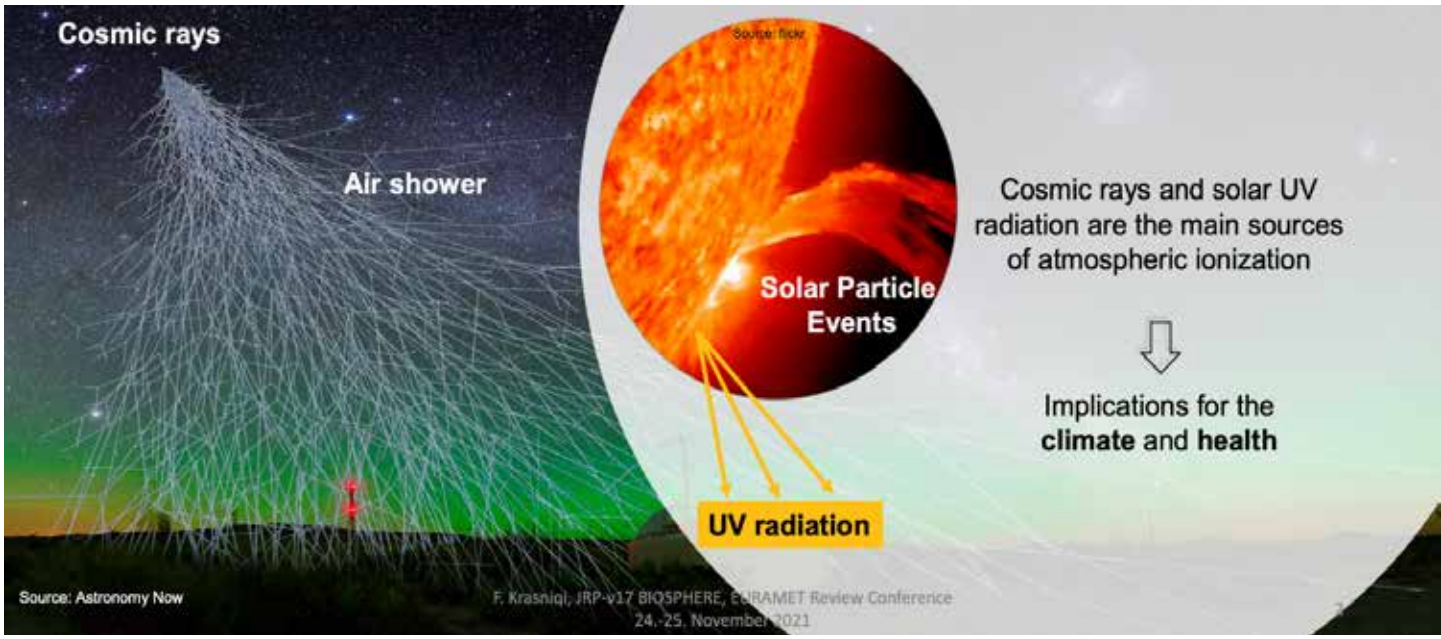
Le projet BIOSPHERE

Le projet (www.euramet-biosphere.eu) a débuté en octobre 2022 pour une durée de 3 ans. Il étudie les effets des rayons cosmiques et du rayonnement solaire ultraviolet (UV) sur la chimie et la dynamique de l'atmosphère. Il combine les observations satellitaires et la détection in situ ou au sol pour analyser les réactions induites par les électrons qui conduisent à la formation de radicaux libres dans l'atmosphère, qui peuvent participer à leur tour à des cycles catalytiques de perte d'ozone.

Étant donné que l'ozone protège la Terre des rayons UV nocifs du Soleil, son appauvrissement entraîne une augmentation des effets biologiques, avec des conséquences importantes pour la santé humaine, les plantes, les écosystèmes marins et les cycles biochimiques. Alors que l'ionisation des molécules anthropiques contenant du chlore par le rayonnement UV a longtemps été reconnue comme une explication de l'appauvrissement de la couche d'ozone dans l'hémisphère Nord, le rôle des rayons cosmiques reste à étudier.

Les institutions de ce consortium '21GRD02 BIOSPHERE' apportent leurs compétences, leurs connaissances et leur expérience dans les domaines variés de la surveillance de l'environnement, la recherche spatiale, la chimie atmosphérique, la médecine, la biologie et la radioprotection.

Ce projet fournit des données métrologiques sur les flux de rayons cosmiques, les spectres UV solaires et la colonne d'ozone, qui sont essentielles pour l'évaluation du rôle des rayons cosmiques



en tant que facteurs climatiques et vise à identifier et à quantifier les corrélations entre eux.

Les effets des rayonnements cosmiques et UV sur la santé humaine sont évalués en étudiant les dommages qu'ils causent aux cellules humaines saines, comme celles de l'épiderme. Ces radiations peuvent provoquer des modifications structurelles et fonctionnelles dans les cellules et leurs effets à long terme sur les gènes sont également étudiés.

Campagnes de mesure

Quatre campagnes de mesures successives sont prévues durant le projet BIOSPHERE, visant à identifier et quantifier la relation entre les rayons cosmiques, le rayonnement solaire UV et les émissions anthropiques. Pour ce faire, il faut simultanément des mesures traçables

1. des flux de muons et de neutrons au niveau du sol,
2. du rayonnement solaire UV terrestre, et
3. de la colonne d'ozone totale.

Ces mesures simultanées sont effectuées sur quatre sites européens qui fournissent l'infrastructure nécessaire pour la mesure précise des paramètres du profil atmosphérique et ont différents inventaires des émissions anthropiques pour tenir compte de l'influence des facteurs humains sur la dynamique de l'ozone. La première campagne de mesures a été réalisée du 1er juin au 31 août 2023 au Centre National des Sciences, Station de recherche Demokritos à Athènes et comprenait l'utilisation simultanée de 10 instruments, dont ceux illustrés à la Figure 2.

La deuxième campagne de mesures s'est déroulée de janvier à mars 2024 à Bruxelles sur le site urbain du plateau d'Uccle où sont situés les deux instituts belges (IASB et IRM) impliqués dans le projet. Leurs nombreux instruments sur site, tels que des radiomètres, photomètres, spectromètres, pyranomètres, LIDAR, entre autres, ont réalisé des mesures spectrales et intégrées en longueur d'onde de l'éclairement solaire, donnant accès au flux biologiquement efficace (indice UV) et mesures de paramètres atmosphériques (surveillance de la colonne totale de l'ozone et épaisseur optique des aérosols). L'IRM a également contribué activement avec des sondages par ballons pour les profils verticaux des paramètres atmosphériques. La mesure simultanée des flux de muons et de neutrons à l'aide de systèmes transportables des partenaires européens est complétée par les données de l'IRM, qui assure également la surveillance des neutrons et des muons. La surveillance des aérosols et de diverses molécules (espèces à l'état de traces, y compris d'origine humaine) est disponible à partir de satellites et de mesures in situ des instruments de l'IASB qui gère la campagne.

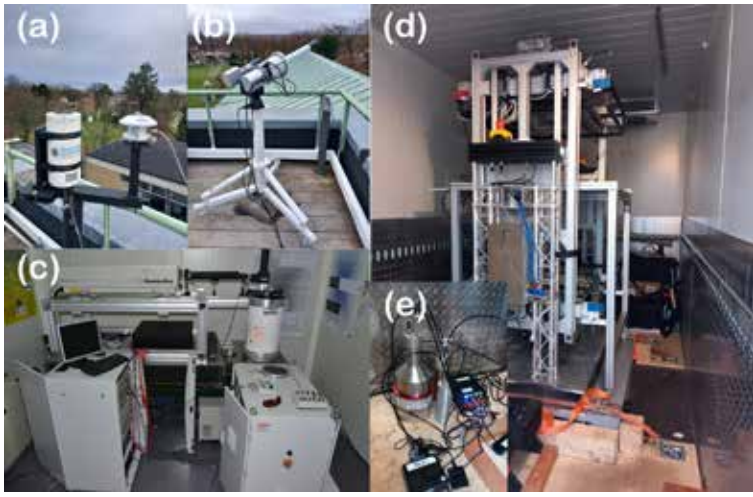


Figure 2 : Images de certains instruments installés à Bruxelles et à Athènes pendant les campagnes de mesures: (a) pyranomètre UVB, (b) UV spectroradiomètre BTS-Solar, (c) EOLE Multi-longueur d'onde Raman lidar, (d) détecteur de muons et (e) détecteur portable de neutrons. (Crédit: Alex Papayannis et David Bolsée)



Figure 1: Le projet BIOSPHERE et les 22 institutions participant au consortium (www.euramet-biosphere.eu).

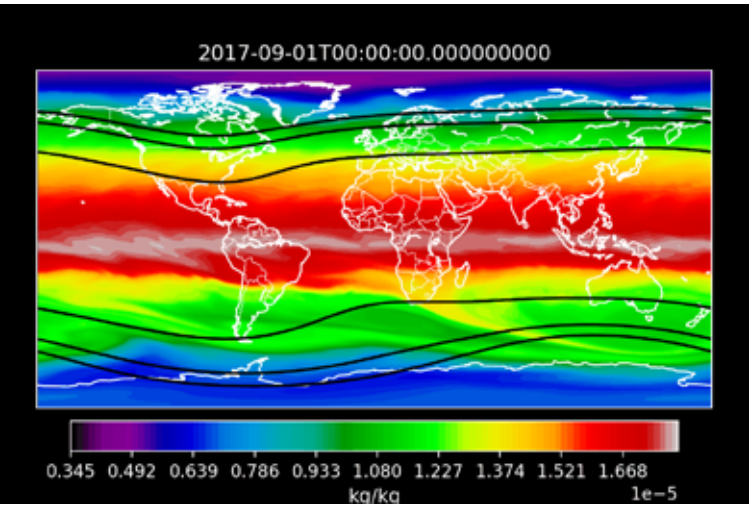


Figure 3 : Exemple de carte de concentration d'ozone à 25 km obtenu avec le Copernicus Atmosphere Monitoring Service.

Les campagnes 3 et 4 seront programmées ultérieurement à l'observatoire de la montagne Milesovka en Tchéquie et à l'Observatoire météorologique de Lindenberg en Allemagne, supervisées par David Bolsée, responsable de l'équipe 'Eclairement spectral solaire et radiométrie' à l'IASB.

L'événement solaire du 11 mai 2024

Les éruptions solaires peuvent également affecter l'atmosphère. Un événement particulièrement intense a eu lieu le 11 mai 2024 (appelé 'Mother's Day event' ou événement de la fête des mères). Suite à une forte éruption solaire dirigée vers la Terre, des aurores ont été visibles dans le monde entier. C'était la tempête magnétique la plus intense depuis plus de 20 ans.

Ce timing n'est pas dû au hasard : l'activité de notre Soleil varie selon un cycle d'environ 11 ans déterminé par le nombre de taches apparaissant à sa surface. Ce cycle est illustré par la Figure 5 et montre que nous sommes très proches du prochain maximum attendu fin 2024. Plus ces taches sont nombreuses, plus l'activité du Soleil est forte. Ces taches correspondent à des activités magnétiques très intenses à la surface du Soleil et sont à l'origine des éruptions solaires. La plus grande activité solaire va donc se matérialiser par de plus nombreuses éruptions solaires en 2024-2025, telles que celles observées du 6 au 11 février 2024, illustrées par la Figure 6 et celles apparues en mai 2024 qui ont causé l'événement du 11 mai.

Figure 5 : Nombre de taches solaires observées à la surface du Soleil depuis 1700. Le cycle d'activité de 11 ans est bien visible et le prochain maximum est prévu pour fin 2024. (Crédit: www.sidc.be)

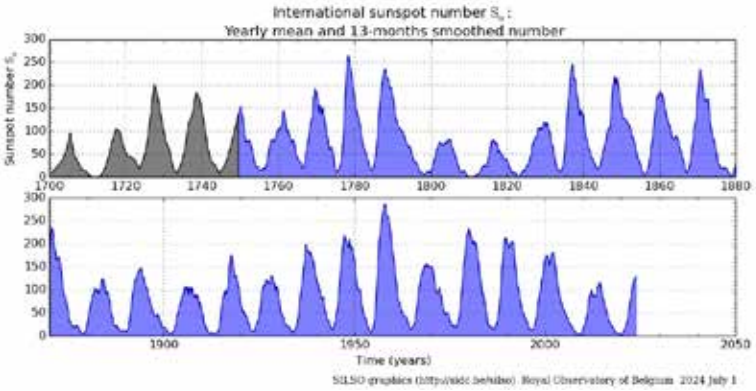




Figure 4 : Exemple d'aurore visible le 11 mai 2024 en Belgique. (Crédit: Gaël Cessateur, IASB)

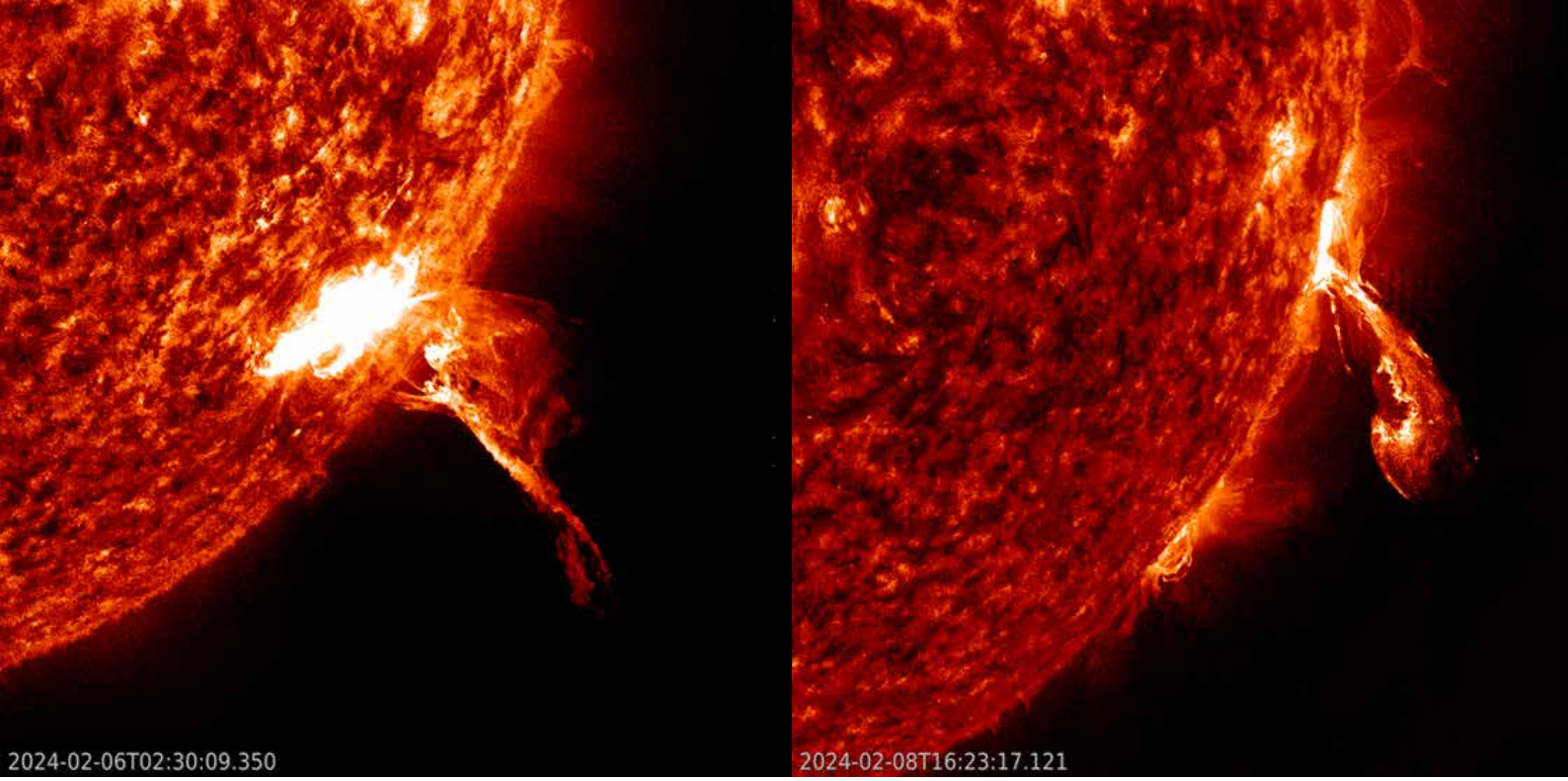


Figure 6 : Exemple d'images des éruptions solaires du 6 février 2024 (gauche) et 8 février 2024 (droite) prises par le satellite SDO (Solar Dynamics Observatory). (Crédit: NASA)

Observations satellitaires

Pour observer les effets des événements solaires sur les flux de particules énergétiques piégées dans le champ magnétique de la Terre et en particulier dans les ceintures de radiations de Van Allen, on peut compter sur l'EPT (Energetic Particle Telescope), un spectromètre qui a été développé conjointement dans notre institut, l'IASB, à l'Université Catholique de Louvain et la firme privée Qinetiq Space (actuellement Redwire Space). L'EPT a été lancé sur le satellite PROBA-V en mai 2013 sur une orbite quasi-polaire à 820 km d'altitude (Pierrard et al., 2014). Une anti-corrélation entre les flux de protons piégés dans le champ magnétique de la Terre et le cycle solaire de 11 ans a récemment été détectée grâce à l'EPT (Pierrard et al., 2023).

Un nouveau spectromètre appelé 3DEES (3 Dimensions Energetic Electron Spectrometer) a été développé par le même consortium et sera lancé fin 2024 sur PROBA-3. 3DEES aura l'avantage de mesurer les flux de particules dans plusieurs directions, permettant de déterminer celles qui sont injectées dans l'atmosphère. Les deux instruments sont illustrés par la Figure 7.

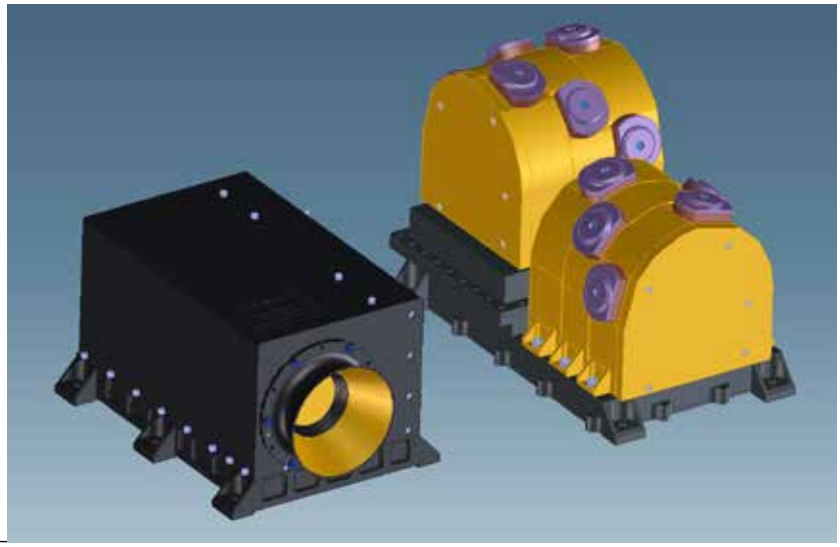
Ionosphère et plasmasphère

Pour le projet BIOSPHERE, notre équipe D13 'Vent solaire' de l'IASB est chargée d'étudier l'ionisation de l'atmosphère par le rayonnement solaire et cosmique galactique en utilisant des observations satellitaires et des simulations.

L'atmosphère est constamment soumise au rayonnement UV solaire, aux rayons X, aux particules solaires et également au rayonnement cosmique. Il en résulte une ionisation de l'atmosphère, c'est-à-dire la production d'ions et d'électrons. Ces particules peuvent ensuite se recombiner pour reformer des particules neutres, d'autant plus rapidement que la densité est grande. Le nombre d'électrons libres dépend donc du taux de production électronique mais aussi du taux de recombinaison.

L'ionosphère est créée principalement par le rayonnement solaire UV qui est la principale source d'ionisation atmosphérique avec un maximum autour de 250-300 km. Le taux d'ionisation est plus élevé pendant la journée et lors de l'activité solaire maximale (comme en ce moment). Bien que l'éclairement solaire UV soit une petite partie du spectre solaire total, il joue un rôle crucial dans l'ionisation et la photochimie de l'atmosphère. L'IASB a contribué à mesurer précisément l'éclairement solaire UV et sa variabilité à bord de la Station Spatiale Internationale, grâce aux mesures de SOLAR/SOLSPEC (Bolsée et al., 2017), ce qui est essentiel pour les recherches climatiques et ionosphériques.

Figure 7 : Le détecteur EPT à gauche, lancé sur le satellite PROBA-V en 2013 et le nouveau détecteur 3DEES qui sera lancé sur PROBA-3 en 2024.



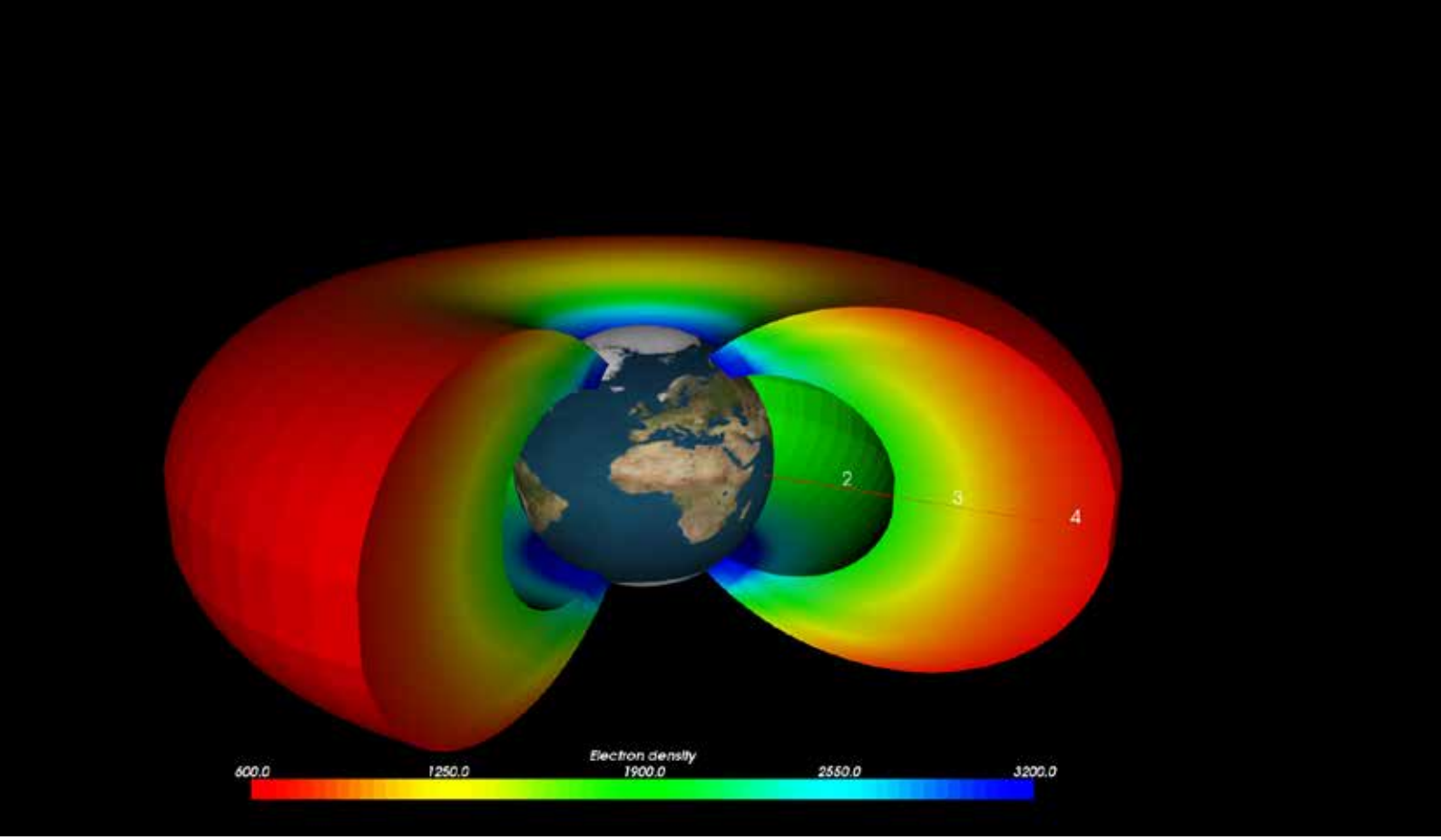


Figure 8 : Densité d'électrons dans le modèle tridimensionnel dynamique BSPM de plasmasphère-ionosphère développé par Pierrard et al. (2021).

L'ionosphère réfléchit les ondes radio et joue donc un rôle fondamental dans les communications radio et le positionnement par satellite. La propagation et la hauteur de réflexion des ondes radio en fonction de leur fréquence sont très sensibles aux conditions ionosphériques.

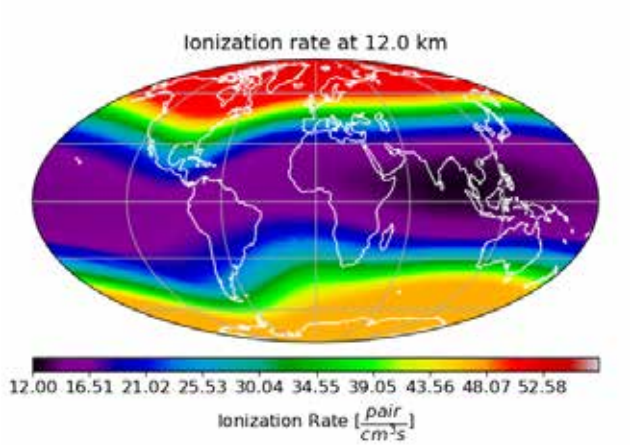
La plasmasphère constitue l'extension de l'ionosphère aux basses et moyennes latitudes. La Figure 8 illustre le modèle BSPM dynamique tridimensionnel de la plasmasphère couplé à l'ionosphère développé à l'IASB (Pierrard et al., 2021). La position de la plasmapause (la limite de la plasmasphère) est très dépendante de l'activité géomagnétique et donc des conditions solaires. Le modèle dynamique BSPM peut être tourné pour une date au choix sur la plateforme PITHIA (https://esc.pithia.eu), sur le site web de la NASA du Community Coordinated Modeling Center (https://ccmc.gsfc.nasa.gov/news/bspm), et est accessible en prévision journalière sur le site Space Situational Awareness de l'Agence Spatiale Européenne (ESA) (http://swe.ssa.esa.int).

Ionisation par les rayons cosmiques galactiques

Les rayons cosmiques galactiques constituent également une source continue de rayonnement qui ionise en permanence l'atmosphère terrestre à haute latitude avec un taux maximum apparaissant autour de 15 km. Ce rayonnement cosmique est un flux continu de particules de très haute énergie (relativistes), qui proviennent de l'espace interstellaire, du noyau de notre galaxie, des supernovae (explosion d'étoiles) et d'autres objets extragalactiques. Lorsque des particules cosmiques de haute énergie atteignent l'atmosphère, elles provoquent une ionisation à des altitudes plus basses par le biais de cascades complexes de nucléons, de muons et d'ondes électromagnétiques.

En raison du champ géomagnétique qui dévie les particules, l'ionisation apparaît principalement aux hautes latitudes, comme l'illustre la Figure 9, obtenue à l'aide du code AtRIS simulant ici le taux d'ionisation de l'atmosphère à 12 km dû aux rayons cosmiques galactiques (Winant et al., 2023). Aux altitudes de vol des avions de ligne, les doses de radiations dues aux rayons cosmiques ne sont donc pas complètement négligeables, c'est pourquoi les radiations reçues par les équipages voyageant fréquemment sur des vols transatlantiques sont monitorés.

Figure 9 : Carte mondiale du taux d'ionisation induit par les rayons cosmiques calculée pour août 2014 à une altitude fixe de 12 km (Winant et al., 2023).





Couverture du livre de Viviane Pierrard publié en 2024.

Il existe d'autres sources d'ionisation, associées à des injections de différentes particules : des précipitations d'électrons énergétiques provenant des ceintures de radiation ou des aurores, ainsi que des particules solaires. Plus d'informations sur les processus d'ionisation de l'atmosphère et plus généralement sur les interactions entre le Soleil et l'environnement spatial de la Terre peuvent être trouvées dans le tout nouveau livre de Viviane Pierrard de 2024, cours universitaire à l'Université Catholique de Louvain pour les étudiants en master en physique ou en climatologie, dont la couverture est illustrée à la Figure 10.

Conclusion

Le projet BIOSPHERE est une initiative ambitieuse qui explore les interactions complexes entre les rayonnements cosmiques et solaires et la vie terrestre. En combinant des observations satellitaires, des détections in situ et au sol, ainsi qu'en développant des outils, des méthodologies et un cadre métrologique solide, le projet évaluera l'impact mutuel de ces rayonnements sur la biosphère terrestre. Les résultats de cette recherche pourraient avoir des implications significatives pour notre compréhension de l'environnement, de la santé et de la durabilité de notre planète.

Remerciements

Le projet 21GRD02 BIOSPHERE a reçu un financement de l'European Partnership on Metrology, co-financé par le programme Recherche et Innovation de l'Union Européenne et les états participants.

L'auteur

Viviane Pierrard dirige la section 'Vent solaire' à l'Institut royal d'Aéronomie Spatiale de Belgique.

Références

- Bolsée, D., Pereira, N., Gillotay, D., Pandey, P., Cessateur, G., et al., SOLAR/SOLSPEC mission on ISS: In-flight performance for SSI measurements in the UV, Astronomy & Astrophysics, 600, A21, doi: 10.1051/0004-6361/201628234, 2017
- Pierrard V., L'environnement spatial de la Terre, Presses Universitaires de Louvain, 214 p., ISBN 978-2-87463-195-5, 2009
- Pierrard V., Les colères du Soleil, Académie Royale de Belgique, Ed. L'Académie en poche, 95 p., https://i6doc.com, 2016
- Pierrard V., Effects of the Sun on the space environment of the Earth, Presses Universitaires de Louvain, 208 p., https://i6doc.com, 2024
- Pierrard V., S. Benck, E. Botek, S. Borisov, A. Winant, Proton flux variations during Solar Energetic Particle Events, minimum and maximum solar activity and splitting of the proton belt in the South Atlantic Anomaly, Journal of Geophysical Research: Space Physics, 128, e2022JA031202, doi: 10.1029/2022JA031202, 2023
- Pierrard V., E. Botek, F. Darrouzet, Improving Predictions of the 3D Dynamic Model of the Plasmasphere, vol. 8, p. 69, *Front. In Astron.* Space Sci., 8:681401, doi:10.3389/fspas.2021.681401, 2021
- Pierrard V., G. Lopez Rosson et al., The Energetic Particle Telescope: First results, Space Science Rev., 184, Issue 1, 87-106, doi: 10.1007/s11214-014-0097-8, 2014
- Winant A., Pierrard V., Botek E., Herbst K., The atmospheric influence on cosmic ray induced ionization and absorbed dose rates, Universe, 9, 502, doi: 10.3390/universe912050, 2023