



Assemblée générale

Distr. générale
25 septembre 2024
Français
Original : anglais

Comité des utilisations pacifiques de l'espace extra-atmosphérique

Rapport de l'atelier ONU/Allemagne consacré à l'Initiative internationale sur la météorologie de l'espace : se préparer au maximum solaire

(Neustrelitz, Allemagne, 10-14 juin 2024)

I. Introduction

1. La météorologie de l'espace tend à devenir un thème central qui exige une coordination internationale efficace et soutenue pour faire face aux phénomènes météorologiques spatiaux violents, ainsi qu'un meilleur partage des données à l'échelle internationale. Il est également nécessaire de disposer de modèles et outils plus perfectionnés pour répondre aux besoins des utilisateurs et pour coordonner le partage et la diffusion des données et des prévisions issues de ces modèles.
2. L'Initiative internationale sur la météorologie de l'espace, lancée en 2009, a permis aux scientifiques d'utiliser les données issues des systèmes mondiaux de navigation par satellite (GNSS) dans des études consacrées à la météorologie de l'espace. Ces données ont amené des scientifiques de différentes disciplines (telles que la sismologie et l'étude de l'ionosphère et de l'atmosphère) de travailler dans le domaine de la météorologie de l'espace et ont permis d'appliquer la physique fondamentale des relations Soleil-Terre à la vie quotidienne, ce qui revêt une grande importance pour les responsables politiques.
3. Le Comité international sur les systèmes mondiaux de navigation par satellite (ICG), créé en 2005, joue un rôle important dans les travaux de l'Initiative, les tempêtes géomagnétiques, les éruptions solaires et les irrégularités ionosphériques pouvant entraîner une détérioration de la précision du positionnement, de la navigation et de la synchronisation des systèmes mondiaux de navigation par satellite. Dans le même temps, les données fournies par les stations GNSS constituent une source précieuse d'informations pour étudier différents aspects de la réaction de l'ionosphère aux orages magnétiques et autres effets de la météorologie de l'espace.
4. On trouvera dans le bulletin d'information électronique de l'Initiative et sur son site Web (www.iswi-secretariat.org) des informations sur toutes les réalisations résultant de la coopération et de la coordination internationales dans le cadre de l'Initiative, notamment en ce qui concerne l'instrumentation, l'analyse des données, la modélisation, l'éducation, la formation et la sensibilisation du public.
5. L'atelier ONU consacré à l'Initiative internationale sur la météorologie de l'espace : se préparer au maximum solaire a été organisé par le Bureau des affaires spatiales avec l'appui de l'Agence aérospatiale allemande (DLR). Il s'est tenu à Neustrelitz (Allemagne) du 10 au 14 juin 2024. Il était coparrainé par l'ICG.



6. Le présent rapport décrit le contexte de l'atelier, en expose les objectifs et le programme et résume les observations formulées par les personnes qui y ont participé ainsi que leurs conclusions. Il a été établi pour être présenté à la soixante-huitième session du Comité des utilisations pacifiques de l'espace extra-atmosphérique et à la soixante-deuxième session du Sous-Comité scientifique et technique, qui se tiendront toutes deux en 2025.

A. Objectifs

7. Conformément à l'examen, par le Sous-Comité scientifique et technique, du point de l'ordre du jour intitulé « Météorologie de l'espace » (voir A/AC.105/1307, par. 132 à 143), les objectifs de l'atelier étaient les suivants : a) mettre l'accent sur le déploiement de nouveaux instruments, en particulier dans les pays en développement ; b) examiner les méthodes d'analyse des données sur la météorologie de l'espace et l'interprétation des données ; c) mettre l'accent sur de nouveaux résultats de recherche et de nouvelles constatations ; et d) renforcer la coordination et la coopération internationales en matière de produits et services de météorologie de l'espace.

8. Les discussions ayant eu lieu pendant l'atelier avaient également trait au Programme de développement durable à l'horizon 2030 et aux cibles énoncées dans les objectifs de développement durable. Les thèmes de discussion et les objectifs connexes étaient les suivants :

a) Poursuite des efforts d'enseignement de la météorologie de l'espace afin de mieux définir et caractériser les phénomènes météorologiques spatiaux violents et leur probabilité d'occurrence et d'évaluer leurs incidences sur les systèmes technologiques (objectif 4 : éducation de qualité) ;

b) Contribution de la recherche sur la météorologie de l'espace à la promotion du développement durable par la prévention des perturbations catastrophiques susceptibles de toucher les infrastructures terrestres et spatiales critiques ainsi que les services spatiaux, en particulier lors de phénomènes météorologiques violents dans l'espace (objectif 9 : Industrie, innovation et infrastructure) ;

c) Coordination internationale des services opérationnels de météorologie de l'espace, y compris la surveillance, la prévision et la sensibilisation, dans le but général de protéger la vie, les biens et les infrastructures critiques (objectif 17 : partenariats pour les objectifs).

B. Programme

9. À l'ouverture de l'atelier, des allocutions de bienvenue ont été prononcées par la Directrice du Bureau des affaires spatiales, les représentants de l'autorité nationale pour la science et la recherche du Mecklembourg-Poméranie-Occidentale (Allemagne), de la DLR et de la National Aeronautics and Space Administration (NASA) des États-Unis d'Amérique, ainsi que par le maire de Neustrelitz (Allemagne).

10. L'exposé liminaire sur l'activité solaire et la météorologie ionosphérique, présenté par le représentant de l'Allemagne, a porté sur le couplage entre l'activité solaire et l'ionosphère terrestre, ainsi que sur l'impact de l'activité solaire sur la propagation des ondes radio, sujet étudié à Neustrelitz depuis plus de 100 ans. Il a été noté que la dynamique de l'ionosphère constituait une partie essentielle du domaine complexe de la météorologie de l'espace et qu'il importait de la comprendre et de la modéliser pour atténuer les effets des événements météorologiques dans l'espace sur les infrastructures technologiques modernes. Il a été souligné que l'Initiative internationale sur la météorologie de l'espace, qui fait suite à l'Année héliophysique internationale, offrait de nouvelles possibilités de mieux comprendre les relations Soleil-Terre et les effets de la météorologie de l'espace sur la vie quotidienne.

11. Le programme de l'atelier comprenait 11 séances techniques et des débats sur les observations qui avaient été formulées et les conclusions, suivis des discours de clôture des coorganisateur et des participantes et participants. Dix-huit posters ont été présentés et 52 présentations ont été faites durant les séances techniques, sur les éruptions solaires et leurs sources au niveau du Soleil et leurs effets sur l'environnement géospatial (magnétosphère, ionosphère, atmosphère et sol) ; les éruptions solaires et leurs incidences sur l'ionosphère/l'atmosphère ; la relation entre les éruptions solaires et les éjections de masse coronale ; les événements extrêmes liés à la météorologie de l'espace ; les outils et les méthodes d'éducation et de sensibilisation à la météorologie de l'espace ; les trous coronaires et les flux à grande vitesse associés aux régions d'interaction des courants ; les particules énergétiques solaires et les phénomènes associés tels que les sursauts radio coronaires et interplanétaires ; les irrégularités ionosphériques et leur impact sur le GNSS, ainsi que les anomalies des engins spatiaux ; les tempêtes géomagnétiques et la variabilité de la ceinture de rayonnement due aux éjections de masse coronale et aux régions d'interaction des courants ; les prévisions de la météorologie de l'espace à l'aide de diverses techniques, notamment l'apprentissage automatique ; les instruments de météorologie de l'espace ; et l'utilisation opérationnelle des données de la météorologie de l'espace.

12. Les affiches et les séances de discussion ont permis aux participantes et participants d'examiner des problèmes et des projets particuliers liés à la météorologie de l'espace, en particulier les réseaux d'instruments et leur état de fonctionnement et de coordination, ainsi que sur l'utilisation opérationnelle des données de météorologie de l'espace.

13. Une visite technique d'information a également été organisée au Musée des technologies à l'intention des personnes participant à l'atelier.

14. Le programme de l'atelier a été établi par le Bureau des affaires spatiales, la DLR et la NASA, en coopération avec un comité d'organisation scientifique international. Les personnes désignées pour assurer la présidence des séances techniques et les fonctions de rapporteur ont communiqué leurs commentaires et remarques en vue de l'établissement du présent rapport.

15. Les exposés présentés à l'atelier et les résumés des communications, ainsi que le programme de l'atelier et les documents de référence sont disponibles sur le site Web du Bureau des affaires spatiales (www.unoosa.org).

C. Participation

16. Le Bureau des affaires spatiales a invité des personnes issues du monde scientifique et technique et des membres du corps enseignant de pays en développement et de pays industrialisés de toutes les régions à participer à l'atelier et à y apporter leur contribution. Ces personnes ont été sélectionnées sur la base de leur formation scientifique, technique et académique et de leur expérience dans la mise en œuvre de programmes et de projets dans lesquels l'Initiative jouait un rôle de premier plan.

17. Les fonds alloués par l'ONU et l'ICG ont servi à couvrir les frais de voyage, d'hébergement et autres de 23 personnes venues de 20 pays. Les organisateurs avaient invité 80 spécialistes au total à participer à l'atelier.

18. Les 31 États Membres suivants étaient représentés à l'atelier physiquement ou en ligne : Afrique du Sud, Allemagne, Argentine, Autriche, Brésil, Canada, Chine, Côte d'Ivoire, États-Unis d'Amérique, Finlande, France, Ghana, Grèce, Inde, Indonésie, Italie, Japon, Kenya, Népal, Nigéria, Norvège, Pakistan, République de Corée, Royaume-Uni de Grande-Bretagne et d'Irlande du Nord, Rwanda, Serbie, Sri Lanka, Tchèque, Thaïlande, Türkiye et Ukraine. Le Bureau des affaires spatiales y était également représenté.

II. Observations et conclusions

19. Les personnes participant à l'atelier ont noté que les éjections de masse coronale étaient de vastes expulsions de plasma magnétisé depuis la basse atmosphère solaire vers l'espace interplanétaire. Avec les éruptions qui les accompagnaient souvent, elles constituaient le plus grand processus de libération d'énergie du système solaire et le principal moteur des perturbations météorologiques de l'espace sur la Terre et d'autres planètes. En conséquence, les éjections de masse coronale étaient connues pour provoquer les effets de la météorologie de l'espace les plus graves, tels que des tempêtes géomagnétiques susceptibles d'induire des courants électriques dans les lignes électriques, ce qui pouvait entraîner des pannes généralisées du réseau électrique et des dommages aux infrastructures. Les tempêtes géomagnétiques pouvaient également modifier les signaux des systèmes mondiaux de navigation par satellite et compromettre la précision. Il était par conséquent crucial de réaliser des travaux de recherche approfondie visant à mieux comprendre les processus physiques dans le domaine complexe et interdisciplinaire de la météorologie de l'espace pour protéger la technologie, les infrastructures et les activités humaines dans l'espace et sur Terre.

20. Lors de l'atelier, il a été observé qu'il demeurait difficile de prévoir l'impact des éjections de masse coronale en raison de leur nature complexe et variable et de l'absence de mesures précises du vent solaire dans ce contexte. Il était essentiel, pour améliorer les prévisions, de disposer de modèles coronaux et héliosphériques perfectionnés intégrant des données en temps réel sur le vent solaire et des mesures détaillées du champ magnétique. En outre, les données recueillies lors de missions telles que la sonde Parker Solar Probe de la NASA et l'orbiteur solaire de l'Agence spatiale européenne (ESA) fourniraient des informations détaillées sur l'environnement proche du Soleil, ce qui permettrait de mieux comprendre le processus d'initiation et d'interaction de l'éjection de masse coronale avec le vent solaire.

21. Lors de l'atelier, il a été noté que les taches solaires étaient des zones sombres temporaires observées à la surface du Soleil, qui devaient leur aspect sombre à leur température plus froide que celle de la zone environnante, et que ces structures étaient le signe d'un champ magnétique puissant. La question de la relation entre l'activité des taches solaires et l'activité des éruptions, ainsi que les principes physiques sous-tendant les éruptions solaires, étaient des éléments importants compte tenu des effets de ces phénomènes actifs sur la météorologie de l'espace. Il était crucial de comprendre les éruptions solaires et les activités qui y étaient associées, car cela permettait de prévoir les phénomènes météorologiques spatiaux, qui affectaient l'espace interplanétaire et la haute atmosphère de la Terre, et donc le système météorologique.

22. Les personnes participant à l'atelier ont noté que les différents types de taches solaires étaient associés à des niveaux d'activité solaire variables. Les discussions ont porté sur la classification de l'intensité des éruptions et sa relation avec les différentes classifications de l'intensité de l'activité solaire. Il a été noté que les groupes de taches solaires étaient classés de deux manières différentes, sur la base de leur morphologie et de leur évolution (classification de Zurich modifiée) et sur la base des propriétés magnétiques des groupes de taches solaires (classification magnétique du Mont Wilson). Il a également été noté que la classification magnétique des groupes de taches solaires du Mont Wilson pourrait être utilisée comme prédicteur principal pour établir un modèle de prévision plus raisonnable des éruptions solaires.

23. Les personnes participant à l'atelier ont observé que les phénomènes météorologiques spatiaux extrêmes étaient considérés comme des événements à fort impact et à faible probabilité qui débutaient sur le Soleil sous la forme d'éruptions solaires extrêmes et d'éjections de masse coronale. Elles ont pris note de la Grande Année de l'héliophysique, une célébration mondiale de la science solaire et de l'influence du Soleil sur la Terre et l'ensemble du système solaire, et des activités

prévues dans ce contexte en 2024 et 2025, axées sur l'étude des éléments entre le Soleil et l'espace qui pourraient potentiellement déclencher des événements météorologiques spatiaux majeurs ou extrêmes.

24. Les personnes participant à l'atelier ont pris note de l'Initiative ISWAT (International Space Weather Action Teams) du Comité pour la recherche spatiale (COSPAR), qui constituait un pôle mondial de collaboration pour relever les défis dans le domaine de la météorologie de l'espace. L'un des objectifs de l'équipe ISWAT S2-01 était d'étudier et de comparer différents systèmes automatisés de détection des trous coronaux et de mettre au point des stratégies pour évaluer quantitativement l'incertitude des positions des limites des trous coronaux. Il a également été noté qu'un ensemble de données d'images coronales était publiquement disponible pour analyse (<https://iswat-cospar.org/S2-01>).

25. Les personnes participant à l'atelier ont été informées que le Community Coordinated Modelling Center (CCMC), un partenariat interinstitutions pour la recherche en vue de l'établissement de modèles perfectionnés pour les sciences spatiales et la météorologie de l'espace, fournissait un mécanisme par lequel les modèles de recherche pouvaient être validés, testés et améliorés à l'appui des prévisions concernant la météorologie de l'espace. Le CCMC donnait également accès à un grand nombre de modèles de recherche de pointe. L'ensemble de modèles, en constante expansion, comprenait des modèles dans tous les domaines scientifiques, de la couronne solaire à la haute atmosphère terrestre. Ce service scientifique était proposé au moyen d'un accès Internet (<http://ccmc.gsfc.nasa.gov>).

26. Les personnes participant à l'atelier ont également pris connaissance des premiers résultats obtenus par une ionosonde basée sur un récepteur radio logiciel (SDR) à faible coût dans la région équatoriale africaine. Il a été noté, en comparant les deux systèmes, que l'ionosonde à faible coût et à faible puissance basée sur la technologie SDR avait un niveau de performance équivalent ou supérieur à celui des ionosondes conventionnelles disponibles dans la région en termes de fiabilité, de flexibilité et de précision de la détermination des principaux paramètres ionosphériques.

27. Les personnes participant à l'atelier ont observé que l'éruption de protubérances pouvait exercer une influence importante sur l'environnement solaire-terrestre. L'analyse des données a montré une corrélation entre l'augmentation de la hauteur de la protubérance et les périodes d'oscillation, ce qui laissait supposer qu'il pourrait y avoir un lien avec l'éruption ultérieure observée par le STEREO (Solar Terrestrial Relations Observatory). Ces résultats permettaient donc de mieux comprendre la dynamique des protubérances et pourraient ouvrir la voie à une meilleure prévision des éruptions, ce qui faciliterait les futures prévisions de météorologie de l'espace.

28. Les personnes participant à l'atelier ont noté que les principaux phénomènes ionosphériques susceptibles d'avoir un impact sur le GNSS étaient l'introduction de gradients importants dans le contenu total en électrons de l'ionosphère, les irrégularités ionosphériques déclenchant une variation rapide de l'amplitude et/ou de la phase du signal (scintillation), et les augmentations soudaines du bruit de fond ou du contenu total en électrons dues aux sursauts radio solaires ou aux éruptions solaires. Ces phénomènes ont été démontrés à l'aide d'observations GNSS du contenu total en électrons disponibles dans la base de données Madrigal (<http://cedar.openmadrigal.org/>). Des informations provenant de plus de 6 000 sites GNSS étaient désormais téléchargées et traitées quotidiennement. Cet ensemble de données avait été utilisé pour surveiller les signatures ionosphériques des caractéristiques de la densité renforcées par les tempêtes, les éruptions solaires, les pulsations géomagnétiques, les structures aurorales, les réchauffements stratosphériques et l'éruption volcanique des Tonga.

29. En outre, la base de données Madrigal intégrait désormais des observations de scintillation recueillies par des réseaux de récepteurs GNSS spécialisés dans la scintillation. Les données de scintillation de l'ensemble des années 2023 et 2024 étaient à présent disponibles en ligne. Cette base de données englobait des données

provenant de divers réseaux, notamment le réseau MACAWS (Development of Monitors for Alaskan and Canadian Auroral Weather in Space), le réseau CHAIN (Canadian High Arctic Ionospheric Network), le réseau LISN (Low-Latitude Ionospheric Sensor Network) et le réseau de l'Institut national de géophysique et de volcanologie (INGV) d'Italie.

30. Les personnes participant à l'atelier ont noté qu'afin de fournir des informations pertinentes pour l'évolution de la deuxième génération du système européen de renforcement satellitaire (EGNOS V3), un vaste réseau de récepteurs répartis dans le monde entier avait été mis en place pour analyser à la fois le contenu électronique total et les données de scintillation. En outre, on avait tenté d'enregistrer les flux de données des événements de scintillation intense provenant des régions de basse et de haute latitude. Ces flux de données pourraient ensuite être utilisés comme scénarios d'exemple pour différents récepteurs GNSS afin de tester leur robustesse par rapport aux fortes scintillations de phase et d'amplitude.

31. Les personnes participant à l'atelier ont également noté que l'initiative comprenait 19 instruments, dont deux étaient gérés par l'Allemagne : l'instrument astronomique basse fréquence économique pour la spectroscopie et l'observation mobile (CALLISTO, Compound Astronomical Low-Frequency Low-Cost Instrument for Spectroscopy and Transportable Observatory) et le système mondial de détection des éruptions ionosphériques (GIFDS, Global Ionospheric Flare Detection System). Il a été noté que la DLR, à Neustrelitz, utilisait plusieurs récepteurs CALLISTO (10-80 MHz, 100-800 MHz et 1 000-1 600 MHz), ainsi que des récepteurs GIFDS pour surveiller les sursauts radio solaires et les éruptions solaires. Il a été souligné que les récepteurs d'origine avaient été perfectionnés, en termes de matériel et de logiciels, afin de minimiser le bruit et de faciliter les travaux de maintenance, de manière à pouvoir observer le comportement des différents trajets de propagation. Il en a résulté des récepteurs compacts dotés d'un écran intégré et d'un ordinateur personnel, qui constituaient la base d'un large éventail d'analyses d'événements météorologiques spatiaux.

32. Les personnes participant à l'atelier ont observé qu'un certain nombre de spectromètres CALLISTO étaient déployés dans le monde entier et constituaient ensemble le réseau e-Callisto. Les données des différents instruments étaient automatiquement téléchargées par protocole de transfert de fichiers vers le serveur central de l'Université des sciences appliquées et des arts du Nord-Ouest de la Suisse et étaient disponibles à l'adresse (www.e-callisto.org/), ainsi que la documentation technique de CALLISTO.

33. Les personnes participant à l'atelier ont examiné le problème des prévisions de la météorologie de l'espace en utilisant des approches traditionnelles, ainsi que les avantages de l'utilisation de techniques d'apprentissage automatique pour identifier et caractériser les phénomènes qui déterminent la météorologie dans l'espace.

34. En ce qui concerne les services opérationnels de météorologie de l'espace, il a été noté que le centre d'excellence SPARTA (Space Weather Research and Technology Applications) utiliserait des modèles informatiques pour reproduire les perturbations météorologiques de l'espace et aurait recours à des expériences, à l'intelligence artificielle et à l'apprentissage automatique pour élaborer des solutions permettant d'améliorer les performances des satellites et d'autres technologies de navigation dans des conditions défavorables.

35. Il a également été noté que le Space Weather Service Network de l'ESA fournissait des services pré-opérationnels pour l'exploitation des engins spatiaux sur la base d'un modèle de fourniture de services fédérés, offrant aux utilisateurs finaux une très large gamme de produits et d'informations sur les conditions météorologiques spatiales actuelles et à venir, ainsi qu'un soutien à l'analyse après un événement. Ces données étaient fournies en même temps que les premières données du système de capteurs météorologiques spatiaux (Distributed Space Weather Sensor system) de l'ESA via le portail météorologique spatial de l'ESA (<https://swe.ssa.esa.int>).

36. Les discussions au cours de l'atelier ont permis de cerner a) toute lacune importante concernant les types d'instruments et leur couverture ; b) les problèmes de maintenance des instruments et des flux de données en termes de continuité, de collecte, d'analyse et de modélisation des données ; et c) la manière d'attirer des scientifiques en début de carrière et de soutenir d'autres initiatives internationales de météorologie spatiale en cours.

37. Les personnes participant à l'atelier sont convenues que les données provenant des réseaux d'instruments de l'Initiative devraient être combinées avec des données spatiales et d'autres données au sol par le biais de la modélisation et des mesures afin de faire progresser la science de la météorologie de l'espace, conduisant ainsi à des résultats de recherche solides et à la publication d'articles scientifiques dans des revues internationales. Il a également été convenu que les spécialistes de la météorologie de l'espace et du système mondial de navigation par satellite devraient partager les données et collaborer à la recherche sur la météorologie de l'espace.

38. Avec le soutien des États Membres sous l'égide du Comité des utilisations pacifiques de l'espace extra-atmosphérique, les efforts devraient se poursuivre afin d'atteindre l'objectif de prévisions fiables des phénomènes météorologiques spatiaux, associant l'ensemble des spécialistes des sciences spatiales en général et les spécialistes de la météorologie de l'espace en particulier.

39. Les personnes participant à l'atelier ont formulé les recommandations suivantes :

a) Les pays qui souhaitent s'engager dans l'étude et l'enseignement de la météorologie de l'espace devraient continuer de bénéficier de conseils techniques et d'un appui en matière de renforcement des capacités ;

b) Il faudrait développer encore les possibilités de partenariats de longue durée en matière de renforcement des capacités au sein de l'Organisation des Nations Unies ;

c) Une coopération internationale accrue devrait être encouragée afin de répondre aux besoins actuels et futurs en matière de services de météorologie de l'espace, et un mécanisme de coordination devrait être mis en place, avec une participation sur une base volontaire et le soutien du Bureau des affaires spatiales, le cas échéant.

40. Pour permettre une coordination et une collaboration internationales efficaces dans le domaine de la recherche et des services de météorologie de l'espace, il ne doit pas y avoir d'obstacles aux flux de données et aux communications. À cette fin, une politique de données ouvertes, assortie de règles de fonctionnement et de normes de données, devrait être encouragée au niveau national.

41. L'atelier a été informé que les actes de l'atelier seraient publiés par la société d'édition Springer. Les actes de l'atelier mettront en évidence l'état de la recherche mondiale sur la météorologie de l'espace, en particulier dans les pays en développement. Toutes les personnes participant à l'atelier ont été invitées à soumettre les résultats de leurs recherches sur la météorologie de l'espace aux rédacteurs et rédactrices desdits actes.

42. L'atelier a pris note de l'offre du Nigeria d'accueillir l'atelier en 2025. On a pris en outre note que la République de Corée était disposée à organiser l'atelier en 2026.

43. Les participantes et participants ont remercié l'Organisation des Nations Unies, la DLR, les parrains de cette manifestation et le comité d'organisation scientifique pour le contenu, l'excellente organisation et le succès de l'atelier.