



Assemblée générale

Distr. générale
6 novembre 2023
Français
Original : anglais

Comité des utilisations pacifiques de l'espace extra-atmosphérique

Rapport de l'atelier ONU concernant l'Initiative internationale sur la météorologie de l'espace : la voie à suivre

(Vienne, 26-30 juin 2023)

I. Introduction

1. La météorologie de l'espace est liée au comportement du Soleil et à la nature du champ magnétique terrestre et de l'atmosphère. Il existe, partout dans le monde, une volonté croissante de mieux comprendre les interactions Soleil-Terre, en particulier les caractéristiques et les tendances de la météorologie spatiale. Cet engouement n'a pas que des motivations scientifiques : en effet, l'exploitation fiable des moyens et infrastructures terrestres et spatiaux dépend de plus en plus de leur résistance aux effets néfastes de la météorologie spatiale.

2. L'Initiative internationale sur la météorologie de l'espace, lancée en 2009, est un programme de coopération internationale visant à promouvoir la météorologie de l'espace, qui associe le déploiement d'instruments (tels que magnétomètres, télescopes solaires, instruments de surveillance à très basse fréquence, récepteurs du système mondial de navigation par satellite et détecteurs de particules) à l'analyse des données météorologiques spatiales obtenues à partir de ces instruments, conjointement à d'autres données, et à la communication des résultats de cette analyse au grand public ainsi qu'aux chercheurs et aux étudiants.

3. Le Comité international sur les systèmes mondiaux de navigation par satellite (ICG) joue un rôle important dans les travaux de l'Initiative, les récepteurs desdits systèmes étant utilisés pour mieux comprendre les processus déclenchés dans l'atmosphère terrestre par des phénomènes extrêmes relevant de la météorologie de l'espace et par l'interaction Soleil-Terre, ainsi que leurs effets sur les satellites.

4. 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, sont disponibles dans le bulletin d'information électronique de l'Initiative et de son site Web (www.iswi-secretariat.org). La lettre d'information est publiée une fois par mois par ArkEdge Space, une société spatiale basée au Japon, tandis que le site Web est géré par le Boston College (États-Unis d'Amérique). L'Initiative organise en outre des webinaires sur des sujets liés à la physique solaire-terrestre, qui sont enregistrés et mis en ligne sur la chaîne YouTube du Bureau des affaires spatiales (des liens vers les enregistrements sont disponibles à l'adresse www.unoosa.org/oosa/en/ourwork/psa/bssi/iswi_webinars.html).



5. L'atelier ONU concernant l'Initiative internationale sur la météorologie de l'espace : la voie à suivre a été organisé et accueilli par le Bureau des affaires spatiales. Il était coparrainé par l'ICG, l'Agence spatiale européenne et la National Aeronautics and Space Administration (NASA) des États-Unis. Il s'est tenu selon des modalités hybrides à Vienne, du 26 au 30 juin 2023.

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 au Comité des utilisations pacifiques de l'espace extra-atmosphérique à sa soixante-septième session et pour être examiné par le Sous-Comité scientifique et technique à sa soixante et unième session, qui se tiendront toutes deux en 2024.

A. Contexte et objectifs

7. Le Comité des utilisations pacifiques de l'espace extra-atmosphérique a adopté le thème « Météorologie de l'espace » en tant que question ordinaire inscrite à son ordre du jour en 2013. L'Initiative internationale sur la météorologie de l'espace, qui constitue l'un des volets de ce thème, a continué à soutenir le déploiement d'instruments de météorologie de l'espace, l'analyse des données et les programmes de formation, d'éducation et de sensibilisation du public. Ces activités ont contribué au développement des réseaux d'instruments existants, au déploiement de nouveaux réseaux et à l'intégration des données issues des réseaux d'instruments dans les modèles physiques des processus héliosphériques, permettant ainsi les prévisions concernant la météorologie de l'espace.

8. 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.105/1279](#), par. 152 à 164), les objectifs de l'atelier étaient les suivants : a) sensibiliser les États Membres à l'impact de la météorologie de l'espace ; b) mettre l'accent sur le déploiement de nouveaux instruments, en particulier dans les pays en développement ; c) examiner les méthodes d'analyse des données sur la météorologie de l'espace ; d) mettre l'accent sur de nouveaux résultats de recherche et de nouvelles constatations ; et e) encourager une plus grande coopération dans la mise en place de partenariats entre les fournisseurs et les hôtes d'instruments. Les discussions tenues lors de l'atelier ont également porté sur les objectifs de développement durable.

B. Programme

9. À l'ouverture de l'atelier, des allocutions de bienvenue ont été prononcées par les représentantes et représentants du Bureau des affaires spatiales et de la NASA. Des discours liminaires ont été prononcés par le représentant de la NASA et la représentante de l'université de Graz (Autriche).

10. Le programme de l'atelier comprenait huit séances techniques et des débats sur les observations formulées et les conclusions, suivis des discours de clôture des coorganisateur. En tout, 61 présentations ont été faites durant les séances techniques, sur des sujets relevant des domaines suivants : a) les instruments et les données de météorologie de l'espace ; b) le couplage magnétosphère-ionosphère-thermosphère ; c) la surveillance de la météorologie de l'espace à l'aide de systèmes de récepteurs à faible coût ; d) la modélisation de la météorologie de l'espace ; e) les effets de la météorologie de l'espace sur la technologie ; f) la recherche dans le domaine de la météorologie de l'espace ; g) les programmes nationaux et régionaux de météorologie de l'espace ; et h) des études de cas sur la météorologie de l'espace. Deux tables rondes ont permis de discuter plus en détail de questions touchant aux instruments de météorologie de l'espace et sur les questions relatives aux mécanismes de coopération régionale et aux ressources pour la mise en œuvre des projets.

11. Chacune des sessions techniques a donné lieu à un débat sur les principaux défis et problèmes évoqués dans les exposés. Les résultats des délibérations ont été résumés et présentés à la séance de clôture, au cours de laquelle un dernier échange de vues a eu lieu et les conclusions ont été adoptées.

12. Une visite technique informative de GeoSphere Austria, un service national de géologie, de géophysique, de climatologie et de météorologie, a également été organisée pour les personnes participant à l'atelier.

13. Un webinaire sur le thème des éruptions solaires et de la météorologie de l'espace, le douzième de la série de webinaires de l'Initiative, a été organisé en même temps que l'atelier. Il a permis d'examiner de plus près les origines de la météorologie de l'espace et les recherches actuelles sur les éruptions solaires.

14. Le programme a été établi par le Bureau des affaires spatiales en coopération avec un comité d'organisation scientifique international. Les personnes désignées pour assurer la présidence et les fonctions de rapporteur des séances techniques 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 économiques à participer à l'atelier et à y apporter leur contribution. Il les avait choisis en fonction de leur formation en sciences, en ingénierie et en éducation, ainsi que de leur expérience dans la mise en œuvre de programmes et de projets dans lesquels l'Initiative jouait un rôle de premier plan. Les préparatifs de l'atelier ont été pris en charge par un comité d'organisation scientifique international et le Bureau des affaires spatiales.

17. Les fonds alloués par l'ONU, l'ICG et l'Agence spatiale européenne ont servi à couvrir les frais de voyage, d'hébergement et autres de 24 participants venus de 22 pays. Les organisateurs avaient invité, en tout, 228 spécialistes à participer à l'atelier.

18. Les 37 États Membres suivants étaient représentés à l'atelier physiquement ou en ligne : Allemagne, Argentine, Autriche, Burkina Faso, Canada, Côte d'Ivoire, Croatie, Égypte, États-Unis d'Amérique, Éthiopie, Fédération de Russie, France, Ghana, Grèce, Inde, Indonésie, Italie, Japon, Kazakhstan, Kenya, Malaisie, Maroc, Myanmar, Népal, Nigéria, Ouganda, Pakistan, Pérou, Pologne, Royaume-Uni de Grande-Bretagne et d'Irlande du Nord, Rwanda, Serbie, Slovaquie, Suisse, Thaïlande, Türkiye et Zambie. Le Bureau des affaires spatiales y était également représenté.

II. Observations et conclusions

19. Les présentations liminaires faites lors de l'atelier ont donné un aperçu des sources solaires de la météorologie de l'espace et de leurs conséquences géospatiales. Il a été noté que les perturbations solaires affectant la Terre étaient les éruptions chromosphériques, les éjections de masse coronale et les régions d'interactions corotatives. Les éruptions sur le côté du Soleil qui fait face à la Terre modifieraient le niveau d'ionisation de l'ionosphère, ce qui aurait un effet significatif sur la propagation des ondes radio et, par conséquent, sur les systèmes mondiaux de navigation par satellite. Les régions d'interactions corotatives et les éjections de masse coronale peuvent toutes deux provoquer des tempêtes géomagnétiques lorsqu'elles touchent la magnétosphère avec une composante sud du champ

magnétique. Un aperçu des efforts de collaboration à l'échelle mondiale dans le domaine de la météorologie de l'espace a également été présenté.

20. Les participantes et les participants ont rappelé que l'Initiative continuait à développer les réseaux d'instruments existants et à en déployer de nouveaux, et qu'il existait actuellement 19 réseaux d'instruments dans le monde, avec plus de 1 000 instruments déployés qui enregistrent des données sur l'interaction Soleil-Terre, depuis les éjections de masse coronale jusqu'aux variations de la teneur totale en électrons de l'ionosphère.

21. Les participantes et les participants ont noté que l'Instrument astronomique basse fréquence économique pour la spectroscopie et l'observation mobile (CALLISTO) était un récepteur hétérodyne. Il fonctionnait entre 45 et 870 MHz, avec une largeur de bande radiométrique d'environ 300 kHz. Les données enregistrées par le réseau CALLISTO étaient des fichiers FITS (flexible image transport system) renfermant un maximum de 400 fréquences par balayage. Les données étaient transférées à un ordinateur au moyen d'un câble R232 et sauvegardées localement. Le temps d'intégration était d'une milliseconde et la gamme dynamique globale excédait 40 décibels. De nombreux instruments CALLISTO avaient déjà été déployés dans le monde entier dans le cadre du programme de déploiement d'instruments de l'Initiative et l'ensemble des spectromètres formait le réseau e-CALLISTO. On trouvera des informations sur le réseau et les produits connexes sur le site Web du réseau (www.e-callisto.org).

22. Les participantes et les participants ont appris que le Low-Frequency Array (LOFAR) était un radiotélescope basse fréquence multifonctionnel et très innovant, réparti dans toute l'Europe et fonctionnant entre 10 et 240 MHz. Il a été noté qu'une observation LOFAR typique des structures ionosphériques était basée sur la scintillation induite par les ondes radioélectriques. La quantité de scintillation induite par les irrégularités ionosphériques variait généralement en fonction de la fréquence des ondes radioélectriques, atteignant des valeurs plus élevées à des fréquences plus basses. Les résultats préliminaires ont démontré que les observations de la scintillation à très haute fréquence effectuées à l'aide du radiotélescope LOFAR pouvaient être utilisées pour détecter les structures de plasma se formant dans l'ionosphère dans des latitudes moyennes. Le site Web du projet LOFAR est disponible à l'adresse suivante : www.astron.nl/telescopes/lofar.

23. Les participantes et les participants ont examiné les difficultés rencontrées par les utilisateurs pour accéder aux données obtenues à partir des instruments de l'Initiative et les utiliser, ainsi que la manière dont ces difficultés pourraient être atténuées à l'avenir. Il a été souligné qu'une coordination était nécessaire pour assurer le fonctionnement continu des réseaux d'instruments de l'Initiative et que, pour élargir l'utilisation des données, il fallait collaborer en vue d'adopter une norme pour les métadonnées telle que celle du consortium SPASE (Space Physics Archive Search and Extract) à des fins de documentation des données. Il a été noté que deux instruments, e-CALLISTO et le système AWESOME (Atmospheric Weather Electromagnetic System for Observation, Modeling and Education), étaient désormais enregistrés auprès du consortium SPASE.

24. Les participantes et les participants ont noté que l'équipe de projet sur la surveillance de la météorologie de l'espace à l'aide de systèmes de récepteurs GNSS à faible coût, mise en place en 2021 dans le cadre du Groupe de travail de l'ICG sur la diffusion de l'information et le renforcement des capacités, était composée de spécialistes représentant le Centre international Abdus Salam de physique théorique (CIPT, Italie), le Boston College (États-Unis d'Amérique), l'Université de Tokyo et l'Institut polytechnique de Paris. L'équipe du projet a continué d'explorer les possibilités d'utiliser des systèmes de récepteurs à faible coût pour la surveillance de la météorologie de l'espace et la mise en service d'un prototype du système. Il a été noté que les résultats d'une comparaison préliminaire entre les récepteurs GNSS haut de gamme et à faible coût ont montré que les deux systèmes avaient des performances similaires en ce qui concerne la teneur totale en électrons dans une colonne verticale,

le taux de variation de l'indice de la teneur totale en électrons et la scintillation en phase de code.

25. Les participantes et les participants ont observé que le couplage magnétosphère-ionosphère englobait de nombreux sujets différents de l'étude globale de la physique de l'espace circumterrestre, et qu'il y avait de nombreux phénomènes complexes à explorer à cet égard. Dans le contexte de la météorologie de l'espace, les processus magnétosphériques sont directement liés à l'activité géomagnétique, ainsi qu'aux environnements de particules de hautes énergies proches de la Terre, qui sont d'une importance capitale. Trois systèmes, le vent solaire, la magnétosphère et l'ionosphère, interagissent, transmettant l'énergie du vent solaire et la transformant en énergies des phénomènes d'aurores, pour finalement déposer la majeure partie de ces énergies sous forme de chaleur dans l'ionosphère.

26. En ce qui concerne la modélisation de la météorologie de l'espace, il a été noté que la météorologie de l'espace était devenue une partie essentielle de la physique spatiale et que plusieurs modèles étaient utilisés pour toutes sortes de conditions météorologiques, y compris le vent solaire et les caractéristiques de la magnétosphère, de l'ionosphère et même de la thermosphère. Ces modèles étaient utilisés dans des cas particuliers.

27. Les participantes et les participants ont été informés des principales approches numériques utilisées dans la modélisation des éjections de masse coronale et de leur propagation dans l'héliosphère interne. Ils ont également examiné la manière dont les synergies entre la télédétection et les observations *in situ* des éjections de masse coronale réalisées à partir de plusieurs engins spatiaux permettaient d'obtenir des prévisions plus précises et plus fiables à différents endroits de l'héliosphère. Il a été noté que, grâce à la combinaison de données provenant de sources terrestres et spatiales et de différentes techniques d'assimilation et d'ingestion de données, il avait été possible d'adapter des modèles empiriques représentant le climat de l'ionosphère pour mieux correspondre aux observations faites dans des conditions de perturbations géomagnétiques.

28. Les participantes et les participants ont également été informés des techniques d'apprentissage automatique pour réaliser des prévisions immédiates et des prévisions de différents sous-domaines de la météorologie de l'espace. Un modèle de prévision ionosphérique global fondé sur l'apprentissage automatique pour prévoir le contenu total en électrons 24 heures à l'avance dans différentes conditions météorologiques spatiales a été expliqué. Il a été noté que pour les besoins d'un service opérationnel, parmi trois techniques d'apprentissage automatique différentes, la mémoire à long terme, les unités récurrentes gated et les réseaux neuronaux convolutifs, le modèle de réseaux de neurones convolutifs avait de meilleures capacités prédictives, même dans des conditions de perturbations géomagnétiques, et pourrait ainsi être mis en œuvre de manière opérationnelle pour les applications et services de météorologie de l'espace.

29. Les participantes et les participants ont été informés que le Centre de données pour la physique des plasmas spatiaux (CDPP, France) était à la disposition de tout utilisateur pour récupérer des données provenant d'engins spatiaux et de sondes dans le système solaire, et qu'il fournissait également un ensemble d'instruments au sol pour l'observation du géospace. Il a été noté que le Centre de données améliorerait continuellement ses capacités afin de faciliter l'exploitation scientifique des données et la distribution des données qui proviendront des futures missions spatiales. À ces fins, il élaborait des outils et des services pour faciliter l'extraction et l'analyse des données. Les données étaient stockées par le Centre national d'études spatiales (CNES, France) dans son centre informatique de Toulouse. On trouvera des informations sur le Centre de données à l'adresse suivante : <http://cdpp.eu>.

30. Les participantes et les participants ont observé que la météorologie de l'espace faisait partie des menaces naturelles susceptibles d'entraîner des erreurs et des perturbations du système mondial de navigation par satellite. Le principal impact était dû à l'ionosphère terrestre. Les signaux ralentissaient en raison d'effets

ionosphériques susceptibles de provoquer des erreurs de positionnement du système mondial de navigation par satellite allant de quelques mètres à plusieurs dizaines de mètres. Ces effets pourraient également provoquer des glissements de cycle dans les mesures de phase qui dégraderaient les performances cinématiques en temps réel. Les paramètres liés à la météorologie de l'espace, tels que le contenu total en électrons et les paramètres de scintillation (amplitude et phase), pourraient être calculés en mesurant les effets de l'ionosphère sur les signaux du système mondial de navigation par satellite.

31. Les participantes et les participants ont pris note d'une méthode décrivant les tâches d'assemblage de données multisources du système global de navigation par satellite et de données géomagnétiques en un seul ensemble de données, qui pourrait être utilisé pour développer des modèles de correction ionosphérique du système mondial de navigation par satellite à l'aide de méthodes statistiques et d'apprentissage automatique. La méthode a été mise en œuvre en combinant un logiciel sur mesure développé dans l'environnement R pour l'informatique statistique et une application logicielle disponible gratuitement pour l'estimation du contenu total en électrons fondée sur le système mondial de navigation par satellite. Les données rassemblées, obtenues lors de la démonstration de la méthode présentée, ont été mises à la disposition de la communauté scientifique internationale, en accès libre.

32. En ce qui concerne les applications de la recherche concernant la météorologie de l'espace, on a présenté un aperçu de l'impact des particules énergétiques solaires sur la météorologie de l'espace, de leurs principaux processus d'accélération et de leur transport à travers le milieu interplanétaire. Deux mécanismes susceptibles de dynamiser les particules énergétiques solaires (les chocs provoqués par les éruptions solaires et les chocs provoqués par l'éjection de masse coronale) ont été expliqués. Le projet AMELIE (Analysis of the MESosphere and Lower Ionosphere fall Effect) du Centre aérospatial allemand, qui vise à détecter automatiquement ce que l'on appelle « l'effet de chute » dans les mesures à très basse fréquence, a également été présenté. Les résultats analysés jusqu'à présent indiquent que, indépendamment de l'angle zénithal du Soleil, principalement aux hautes latitudes, un fort réchauffement de la basse mésosphère pouvait être observé au cours de l'automne, confirmant la dynamique interne dominante de l'atmosphère.

33. Les participantes et les participants ont noté que le pic d'activité actuel du cycle solaire 25, connu sous le nom de « maximum solaire », pourrait être plus précoce et plus fort que prévu. On s'attendait par conséquent à une augmentation des perturbations dues aux événements solaires. Les éjections de masse coronale, les flux à haute vitesse, les éruptions solaires et les événements liés aux particules énergétiques solaires ont été décrits comme les principaux phénomènes transitoires pertinents pour la météorologie de l'espace. Les éruptions sur le côté du Soleil qui fait face à la Terre modifieraient le niveau d'ionisation de l'ionosphère, ce qui aurait un effet important sur la propagation des ondes radioélectriques et, par conséquent, sur les systèmes mondiaux de navigation par satellite. Les émissions issues des éruptions solaires dans les longueurs d'ondes radioélectriques pourraient submerger les signaux des radars et des satellites et affecter leur fonctionnement.

34. Les sessions consacrées aux programmes nationaux de météorologie de l'espace et aux études de cas ont donné aux personnes participant à l'atelier une occasion supplémentaire de mettre en commun leur expertise en vue de mieux faire connaître les événements météorologiques spatiaux et leurs conséquences possibles. Il a été reconnu que la recherche sur la météorologie de l'espace bénéficiait d'une coordination et d'une collaboration efficaces sur le plan international dans les domaines de l'échange et de l'utilisation des données d'observation disponibles ; de l'évaluation des capacités de prévision et d'analyse ; de la promotion de la connaissance, de la théorie et de la modélisation ; et de l'application des progrès issus de la recherche à la météorologie de l'espace.

35. Deux tables rondes, sur les thèmes « Les instruments de l'Initiative » et « La voie à suivre », ont été organisées dans le cadre de l'atelier. Elles avaient pour

objectifs d'examiner l'état actuel des réseaux d'instruments de l'Initiative et de cerner toute lacune importante concernant les types d'instruments et leur couverture ; d'identifier 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 d'examiner la manière d'attirer des scientifiques en début de carrière et de soutenir d'autres initiatives internationales en cours.

36. Les principales conclusions des tables rondes étaient les suivantes :

a) Les données provenant des réseaux d'instruments de l'Initiative devraient être associées à des données spatiales et d'autres données au sol pour faire progresser la science de la météorologie de l'espace, ce qui aboutirait à des résultats de recherche solides et à la publication d'articles scientifiques dans des revues internationales, et les communautés de la météorologie de l'espace et du système mondial de navigation par satellite devraient partager leurs données et collaborer à la recherche sur la météorologie de l'espace ;

b) Les écoles de sciences spatiales de l'Initiative et les ateliers annuels de l'ONU sur l'Initiative devraient se poursuivre à l'avenir, pour former des chercheurs moins expérimentés au fonctionnement des instruments et la science de l'héliophysique. Il faudrait renforcer les partenariats déjà établis avec d'autres organisations scientifiques internationales afin de garantir que ces activités de renforcement des capacités soient menées à bien de manière efficace et dans l'intérêt de tous les États Membres ;

c) Les nouvelles connaissances générées par les activités de l'Initiative devraient être efficacement communiquées au public et à la communauté scientifique dans son ensemble au moyen des bulletins de l'Initiative, de son site Web et d'autres médias.

37. Les participantes et participants ont été informés que la revue *Sun and Geosphere* allait publier un numéro spécial sur les influences du Soleil sur la magnétosphère, l'ionosphère et l'atmosphère d'ici à la fin de 2023. Ils ont été invités à soumettre les résultats de leurs recherches sur la météorologie de l'espace et la physique de l'ensemble Soleil-Terre.

38. Les participantes et participants ont remercié l'Organisation des Nations Unies et les parrains de cette manifestation pour le contenu, l'excellente organisation et le succès de l'atelier.