



iStock©Franck-Boston

Résumé

- La météorologie de l'espace articule les observations de l'activité solaire avec l'étude de ses effets sur la haute atmosphère et le champ magnétique terrestres.
- L'usage omniprésent de l'électricité, la transmission d'informations par des ondes électromagnétiques, la multiplication des satellites, l'explosion du transport aérien et la banalisation des vols spatiaux habités ont multiplié les canaux par lesquels l'activité solaire, surtout si elle est particulièrement intense, peut faire sentir ses effets sur l'activité humaine.
- De récents progrès font espérer le déploiement opérationnel de capacités de prévision de l'activité solaire offrant aux opérateurs la possibilité de mieux maîtriser cet aléa, au-delà de la connaissance des cycles récurrents de onze ans, le cycle en cours devant atteindre son pic en 2025.
- Une coopération entre recherche et opérateurs a vu le jour au niveau mondial et en France. Elle doit être intensifiée.

Christine Arrighi, députée

■ Premières observations au XIX^e siècle

La tempête solaire de 1859, connue sous le nom d'événement de Carrington, constitue à ce jour l'événement extrême le mieux documenté sur les effets de l'activité solaire pour la Terre. À la fin de l'été 1859, cette éruption solaire de grande ampleur a produit de très nombreuses aurores polaires visibles jusque dans certaines régions tropicales, par exemple aux Caraïbes, et a perturbé fortement les télécommunications par télégraphe électrique, parfois en endommageant les stations. Ce fut la première fois qu'on a établi un lien entre la découverte d'une éruption solaire – à savoir un embrillancement observable près d'une tache solaire – et la perturbation subséquente, dix-sept heures plus tard, du champ magnétique de la Terre, faisant apparaître des aurores visibles à des latitudes inhabituelles.

Aussi faut-il faire remonter à cette époque les prémices de la météorologie de l'espace, non comme ensemble de phénomènes variables affectant la Terre – ils sont bien sûr aussi anciens qu'elle –, mais comme discipline scientifique visant à en rendre compte. La météorologie de l'espace peut ainsi se définir comme la discipline visant à comprendre l'influence du Soleil sur l'environnement magnétique terrestre. Cette discipline s'appuie sur la recherche fondamentale en physique solaire et s'intéresse aux différents milieux qui vont du cœur solaire à la croûte terrestre, en se focalisant sur leurs interactions.

■ Les phénomènes spatiométéorologiques : des conséquences importantes

Les seuls phénomènes spatiométéorologiques observables à l'œil nu sont les **aurores** qui illuminent la nuit polaire aux hautes latitudes, soit au sud (aurores australes) soit au nord (aurores boréales, de Borée, mythologique vent du Nord)¹ ; on les observe moins fréquemment aux latitudes médianes en raison de la géométrie du champ magnétique terrestre. Leur couleur varie selon l'énergie des particules ionisantes (c'est-à-dire électriquement chargées) et le type de gaz qu'elles ionisent (oxygène, hydrogène, azote...); aux hautes latitudes, les aurores sont généralement vertes, aux latitudes médianes, elles ont plutôt une teinte rouge rosé, comme celle observée en Bretagne le 27 février 2023.

L'évolution des modes de vie expose cependant à des risques concrets dans la vie quotidienne. Ainsi, les réseaux de transport et distribution d'électricité, mais aussi les câbles sous-marins et les réseaux de transport d'hydrocarbures sont sensibles aux courants induits par les **orages magnétiques**, qui les exposent à des risques de surtension en cas de variations intenses. L'Académie américaine des sciences a extrapolé en 2008² les retombées que pourrait avoir au XXI^e siècle un événement de même ampleur que l'orage magnétique que connurent les États-Unis en mai 1921³ : il serait susceptible d'induire des courants au sol d'une intensité capable de mettre hors d'état 300 transformateurs électriques-clés, privant d'approvisionnement électrique

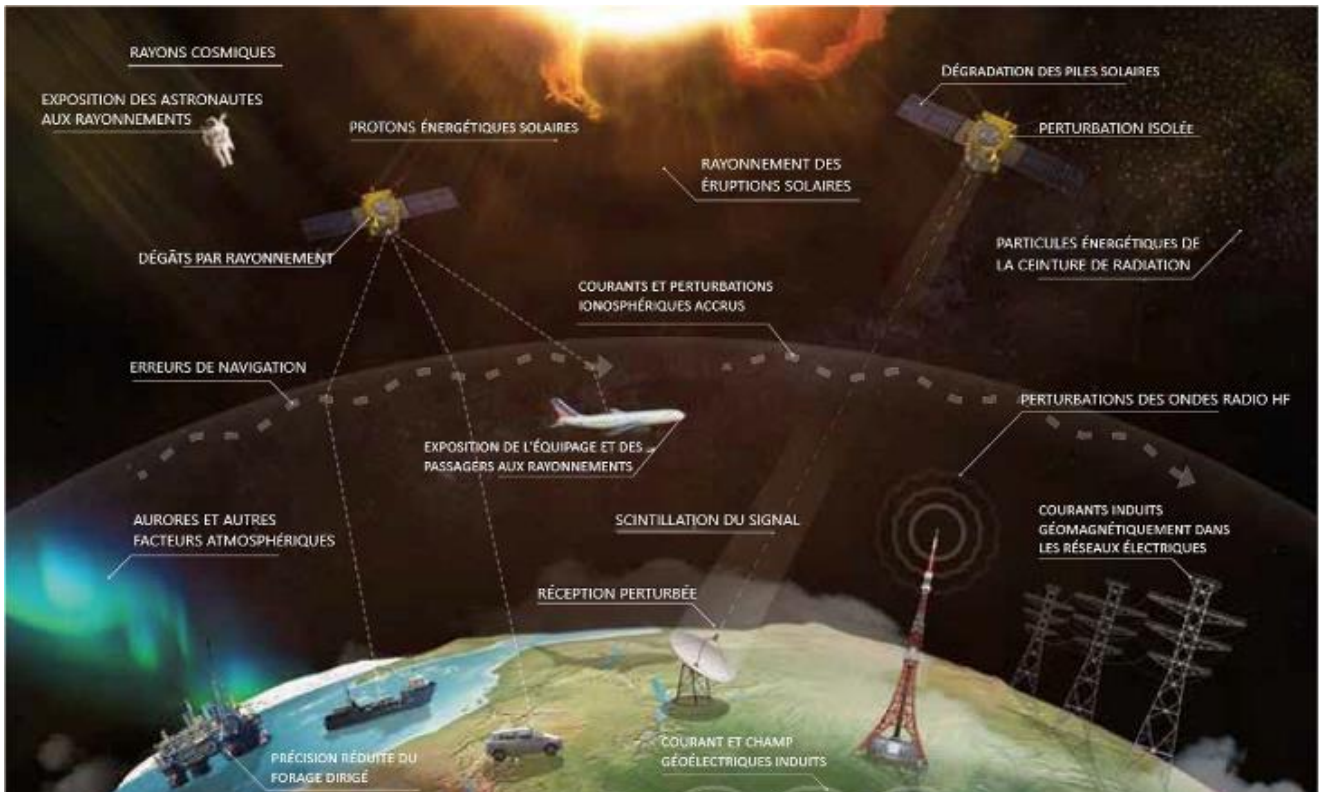
130 millions d'Américains et causant des dommages non seulement aux infrastructures, mais aussi aux équipements individuels.

L'utilisation de l'ionosphère terrestre pour les communications hertziennes et le déploiement de flottes satellitaires ont également fait des phénomènes spatio-météorologiques un aléa à prendre en compte sur une

est rarement mesurable et que même un événement centennal n'affecterait pas de façon mesurable le risque radiologique « vie entière » (*life-time risk*) d'un individu⁷.

■ Les voies d'une meilleure prévision

Il faut souhaiter qu'il soit un jour possible de tracer un parallèle entre l'évolution de la météorologie de l'espace, en plein essor, et celle qu'a connue la météorologie



In : Larisa Trichtchenko et Kenneth Holmlund, « Météorologie de l'espace : repousser les frontières de la terre », bulletin de 2021 (volume 70 (2)) de l'Organisation météorologique mondiale (OMM) @ ESA/Science Office, CC BY-SA 3.0 IGO.

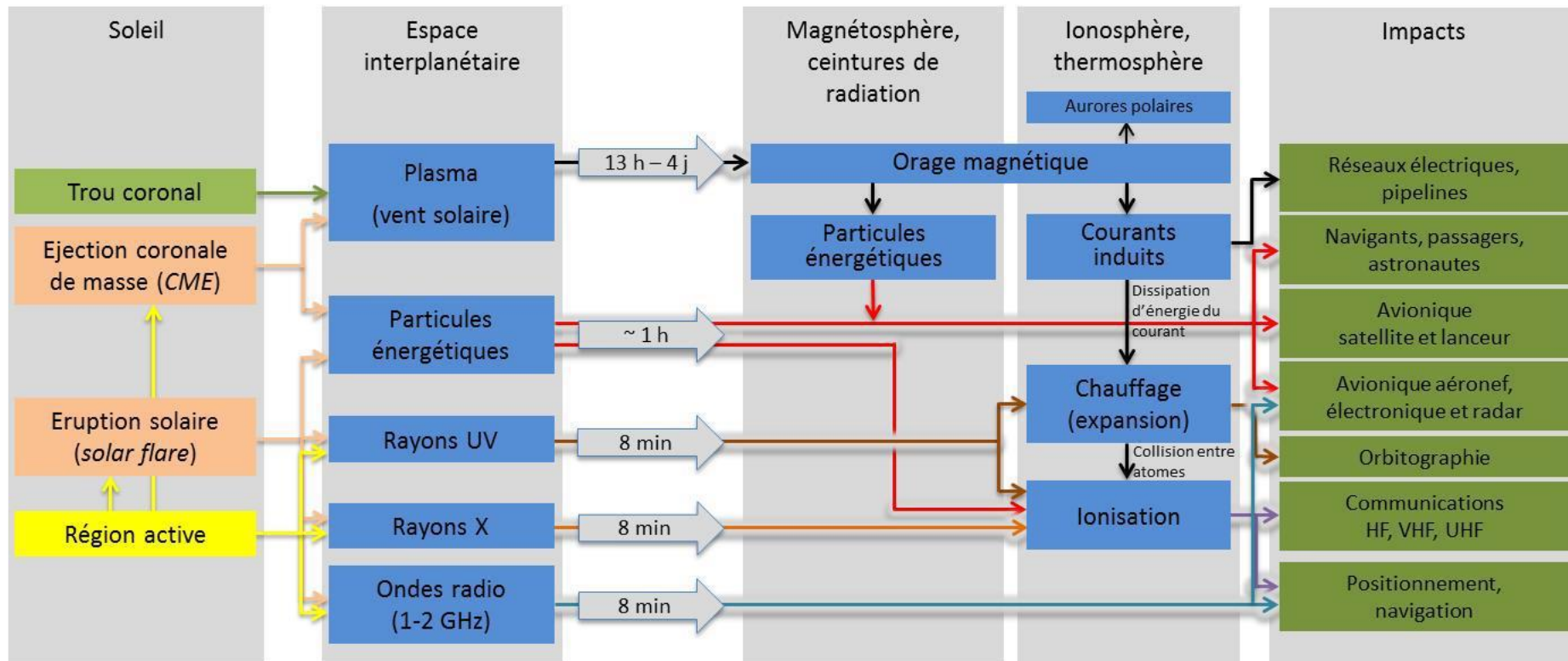
base plus courante. L'ionosphère est modifiée par les rayonnements X et UV variables du Soleil, ce qui affecte la propagation des communications hertziennes, détériore la qualité des signaux de positionnement par satellite (GNSS) et peut perturber la navigation des satellites en orbite basse par effet de freinage⁴. Le flux de particules de haute énergie liées à l'activité du Soleil et de la magnétosphère peut accélérer le vieillissement de l'électronique embarquée dans les satellites, y provoquer des erreurs informatiques ou réduire la puissance des panneaux solaires qui les alimentent en énergie. Des « bouffées » d'ondes radio émises par le Soleil peuvent même perturber les radars de surveillance aérienne⁵. L'ère technologique fait ainsi naître le besoin de prendre en compte de nouveaux risques.

En revanche, les risques pour la santé sont extrêmement faibles. Dans une note d'orientation de 2014⁶, l'Agence sanitaire britannique rappelle que les rayonnements cosmiques sont à l'origine de 12% de la dose moyenne radiologique reçue par la population britannique. Elle souligne que les tempêtes solaires peuvent augmenter ponctuellement les doses délivrées – plus fortement en altitude qu'au niveau du sol –, mais que ce phénomène

terrestre en quelques décennies. Il y a un siècle, les variations de la pluie et du beau temps paraissaient devoir être inéluctablement acceptées comme si elles étaient le fruit du hasard, malgré leurs régularités séculaires et saisonnières. L'essor de la science météorologique s'est appuyé sur la compréhension des phénomènes physiques sous-jacents, les observations faites au sol et depuis l'espace, et les progrès de la modélisation. En quelques décennies, l'horizon de prévisibilité de la météorologie terrestre s'est étendu d'un jour tous les dix ans⁸.

Pour engager la météorologie de l'espace dans un processus similaire, il est nécessaire de **mieux comprendre la physique du Soleil**. Contrairement à une image répandue, celui-ci n'est pas un astre au rayonnement invariable : il y a une météorologie solaire. Dès le début du deuxième millénaire avant notre ère, les astronomes chinois avaient observé des taches noires à la surface du Soleil. L'abondance des taches solaires suit un cycle dont la durée est comprise entre dix et treize ans⁹. Le maximum du cycle actuel devrait se situer en 2025.

SCHÉMA DES RELATIONS SOLEIL-TERRE



Ce schéma et le présent paragraphe sont tirés du rapport du Groupe de travail sur la météorologie de l'espace (2017). Il détaille les processus en jeu et leurs répercussions sur la Terre. La première colonne, résumant les phénomènes solaires, distingue ceux qui sont relativement stables (en vert), susceptibles de revenir après une rotation solaire, ceux qui varient lentement au rythme de l'activité solaire (jaune), et qui sont également modulés par la rotation solaire, puis les phénomènes éruptifs liés aux instabilités du champ magnétique dans la couronne, et dont les conditions se créent sur l'échelle d'environ un jour (orange). Les perturbations traversent l'espace interplanétaire (deuxième colonne) puis, si la Terre est interceptée, impactent la magnétosphère (troisième colonne), l'ionosphère et la thermosphère (quatrième colonne). Les effets sont les perturbations du champ géomagnétique, l'ionisation et le chauffage de la haute atmosphère terrestre. Au niveau de la Terre, les impacts potentiels concernent les équipements techniques, les communications par ondes hertziennes ou les êtres vivants à bord de vaisseaux spatiaux et d'avions.

Un effort important a été engagé en 1995 avec le lancement de la **mission SoHo** (*Solar and Heliospheric Observatory*) conjointe entre l'Agence spatiale européenne (ESA) et la NASA¹⁰. Le satellite lancé est dédié à l'étude de la structure interne du Soleil, de la couronne et du vent solaire.

La **mission Solar Orbiter** met désormais à disposition des scientifiques un satellite placé en rotation synchrone autour du Soleil. Développé avec une participation de la NASA et lancé en 2020, cet orbiteur de l'Agence spatiale européenne (ESA) vise à étudier les processus à l'origine du vent solaire, du champ magnétique héliosphérique, des particules solaires énergétiques, des perturbations interplanétaires transitoires ainsi que du champ magnétique du Soleil.

La mission **Parker Solar Probe** de la NASA a, pour la première fois, recueilli en décembre 2021 des particules de la haute atmosphère du Soleil. Elle a plus largement pour but de retracer les flux énergétiques et d'étudier les modalités du réchauffement de la couronne solaire, pour mieux comprendre les causes de l'accélération du vent solaire.

Ces missions sont financées par des appels à contribution internationaux, ce qui permet de développer des plateformes pouvant coûter jusqu'à un milliard d'euros.

Les efforts vont également concerner l'amélioration des **connaissances sur l'environnement terrestre proche** et la **modélisation**. Les chercheurs réfléchissent déjà à des balises qu'on placerait dans l'espace pour aller y mesurer le système en de multiples points, fournissant des données capables de contraindre les modèles actuels. Ce faisant, ils s'inspirent des modèles scientifiques de la météorologie terrestre pour construire des plans de déploiement de constellations de satellites qui vont permettre de fournir des données, en temps réel, dans plusieurs points de l'espace, afin d'affiner les modèles.

■ Une coopération internationale forte où la France doit garder son rang

Deux programmes sont en cours à l'Agence spatiale européenne (ESA) : le *Space Security Program* (S2P)¹¹ et le *Space Situational Awareness* (SSA, 3^e période)¹². Dans ce cadre, le projet RB-FAN (*Radiation Belt Forecast and Nowcast*) vise à fournir en temps quasi réel (*nowcast*) et sur un horizon de 3 jours (*forecast*) l'état des ceintures de radiation terrestres¹³.

En 2016, l'Organisation météorologique mondiale (OMM) a adopté un plan quadriennal relatif à la météorologie de l'espace ; un deuxième plan couvre la période 2020-2023. Il prévoit notamment d'analyser, valider et évaluer les informations recueillies sur les modèles de météorologie de l'espace axés sur l'exploitation¹⁴, en s'attachant aux difficultés scientifiques qui font actuellement obstacle au développement des services de météorologie de l'espace, par exemple l'impossibilité de prévoir la structure magnétique des éjections de matière coronale ou encore

la vérification du seuil d'effet pour les services destinés à la navigation aérienne.

La France est impliquée de manière significative dans toutes les grandes missions. Les acteurs français s'organisent pour prendre part à la construction d'une offre de services de météorologie de l'espace¹⁵. Par exemple, le site Sievert permet déjà à l'aviation civile, et au grand public, d'évaluer la dose de rayonnement reçue lors d'un vol¹⁶.

Lancé en 1997, le programme national Soleil-Terre (PNST) a pour mission l'étude du système Soleil-Terre depuis la génération et l'émergence du champ magnétique à la surface de notre étoile et les éruptions et éjections de matière qui lui sont associées, jusqu'aux effets sur la magnétosphère, l'ionosphère et la thermosphère terrestres, en passant par la dynamique du vent solaire¹⁷.

Depuis 2019, Météo France, Collecte Localisation Satellites¹⁸ et le *European Satellite Services Provider* mènent une activité opérationnelle pour l'Organisation de l'aviation civile internationale (OACI), avec un fort soutien de la recherche. Celle-ci collabore aussi avec l'Armée de l'Air autour du système d'alerte FEDOME¹⁹ et²⁰. Dans le cadre du S2P, des démonstrateurs de services de météorologie de l'espace ont été mis en place.

Sur un plan opérationnel, l'Organisation française pour la recherche applicative en météorologie de l'espace (OFRAME)²¹ entend répondre de manière efficace et structurée aux sollicitations du monde académique, aux organismes publics et aux industriels. Elle est très impliquée dans l'organisation de réunions-clés comme la *European Space Weather Week*²².

Aussi, il est essentiel que la France maintienne un effort de recherche conséquent pour garder son rang dans le domaine, encore récent mais majeur pour l'ensemble de nos sociétés, de la météorologie de l'espace.

Sites Internet de l'Office :

<http://www.assemblee-nationale.fr/commissions/opepst-index.asp>
<http://www.senat.fr/opepst>

Personnes consultées

- M. Sébastien Bourdarie, directeur de recherches à l'Office national d'études et de recherches aérospatiales (ONERA), spécialiste de géophysique externe ayant notamment pour domaine de recherches les ceintures de radiation
- M. Alexandre Bresson, ingénieur de recherche de l'Office national d'études et de recherches aérospatiales (ONERA), ayant pour domaine de recherche la physique instrumentale, notamment les capteurs quantiques
- M. Allan Sacha Brun, directeur de recherches au Commissariat à l'énergie atomique (CEA), membre de l'équipe du projet européen Whole Sun (www.wholesun.eu)
- M. Jean-Marie Carrière, directeur des services de météorologie de MétéoFrance
- M. Ludwig Klein, astronome à l'Observatoire de Meudon, membre de l'Académie de l'Air et de l'espace, spécialiste de physique solaire
- M. Jean Lilensten, chercheur au CNRS, spécialiste des aurores polaires et responsable de météorologie de l'espace
- Mme Aurélie Marchaudon et M. Alexis Rouillard, chercheurs à l'Institut de recherche en astrophysique et planétologie (IRAP), dans l'unité de recherche mixte CNRS/Université Paul Sabatier – Toulouse III)
- M. Henry de Plinval, directeur adjoint du département physique, instrumentation, environnement, espace (DPHY) de l'ONERA.

Références

¹ De par leur caractère visible, ces « rares apparitions spectaculaires des aurores boréales ou australes » sont présentées comme une « exception » parmi les phénomènes spatiométéorologiques dans Larisa Trichtchenko et Kenneth Holmlund, « Météorologie de l'espace : repousser les frontières de la Terre », bulletin de 2021 (volume 70 (2)) de l'Organisation météorologique mondiale (OMM).

² National Research Council 2008. Severe Space Weather Events: Understanding Societal and Economic Impacts: A Workshop Report. Washington, DC. The National Academies Press (<https://doi.org/10.17226/12507>).

³ Hapgood, M. (2019). The great storm of May 1921: An exemplar of a dangerous space weather event. *Space Weather*, Vol. 7-17, July 2019 (<https://doi.org/10.1029/2019SW002195>).

⁴ Noé Lugaz, Huixin Liu, Brett A. Carter, Jennifer Gannon, Shasha Zou, Steven K. Morley, « New Space Companies Meet a "Normal" Solar Maximum », *Space Weather*, Vol. 21-9, September 2023 (<https://doi.org/10.1029/2023SW003702>).

⁵ Voir Laboratoire d'études spatiales et d'instrumentation en astrophysique (Observatoire de Paris) : « 6-10 septembre 2017 : une soudaine recrudescence de l'activité solaire », 11 septembre 2017 (<https://lesia.obspm.fr/10-septembre-2017-une-soudaine.html>) ; dans un registre un peu différent, voir aussi : « A Solar Storm Reportedly Made Airplanes Disappear From Radars » (<https://www.iflscience.com/airplanes-disappear-swedish-radars-due-solar-storm-31788>) et « The Sweden Case: Airplanes disappear from radars due to "solar storm" » (<https://watchers.news/2015/11/05/the-sweden-case-aircrafts-disappear-from-radars-due-to-solar-storm/>).

⁶ UK Health security agency guidance on space weather and radiation (<https://www.gov.uk/guidance/space-weather-and-radiation>).

⁷ Pour une analyse détaillée de l'exposition radiologique induite par une tempête solaire, voir par exemple N. Larsen, A. L. Mishev, « Analysis of the Ground Level Enhancement GLE 60 on 15 April 2001, and Its Space Weather Effects: Comparison With Dosimetric Measurements », *Space Weather*, Vol. 21-8, October 2023. L'article modélise l'impact d'un des plus importants événements survenus lors du cycle solaire 23, le 15 avril 2001, pour différentes altitudes et latitudes. Afin de tester la pertinence de cette modélisation, les auteurs comparent deux valeurs de la dose reçue lors d'un vol Prague-New York le jour de l'événement, d'une part telle qu'estimée par leur modèle avec des hypothèses majorantes et d'autre part telle que mesurée par un dosimètre installé à bord de l'appareil. L'exposition mesurée est 55 µSv et l'exposition estimée est 75 µSv. Après avoir discuté la portée de l'écart, les auteurs indiquent que, dans des conditions normales de vol (donc hors événement solaire), l'exposition estimée par le modèle est 40 µSv. L'impact de l'événement solaire est donc un quasi doublement de la dose reçue. Les auteurs signalent enfin que le vol réel a contribué à hauteur de 2,5% à la dose annuelle reçue par les pilotes, pour un temps de vol de 7 heures 30.

⁸ Cette estimation des avancées réalisées au cours des dernières décennies en matière de prévisibilité de la météorologie terrestre est tirée d'une présentation effectuée en 2012 à l'ENS Ulm par M. Jean-Marie Carrière (voir liste des personnes consultées) au sujet de l'état de l'art et des progrès à attendre sur la prévisibilité météorologique et hydrologique (<http://savoirs.ens.fr/conferencier.php?id=920>).

⁹ Voir Jean Lilensten et al., op. cit. note 1, p. 37-38. Les auteurs font notamment référence au traité astronomique chinois du Song Shi (宋史), terminé en 1345 et traitant de la période de la dynastie Song (960–1279).

¹⁰ Mission SoHo sur le site Internet du CNES : <https://soho.cnes.fr/fr/soho/en-resume/accueil> ; sur le site internet de l'ESA : https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/SOHO_overview2 ; sur le site Internet de la NASA : <https://soho.nascom.nasa.gov/home.html>.

¹¹ <https://swe.ssa.esa.int/space-weather-and-space-safety-programme>.

¹² https://www.esa.int/Space_Safety/The_story_so_far.

¹³ Exemple du projet RB-FAN : https://pnst.ias.u-psud.fr/sites/pnst/files/poster_PNST2022_AFERLIN_16.pdf.

¹⁴ Plan quadriennal 2020-2023 pour les activités de l'OMM relatives à la météorologie de l'espace (https://wmoomm.sharepoint.com/sites/wmocpdb/_layouts/15/download.aspx?SourceUrl=%2Fsites%2Fwmoocpdb%2Fveve%5Factivityarea%2F).

[2FWMO%20Space%20Programme%20%28WSP%29%2F7%2E%20Space%20Weather%2FWMO%20SWx%20FYP2020%2D23%2F2019%2DMISC%2DOBS%2DSPACE%2DWEATHER%2DFOUR%2DYEAR%2DPLAN%2D2020%2D2023%2D19258%5Ffr%2Epdf](https://www.esa.int/Space/Space_Weather/Space_Weather_Service_Network).

¹⁵ L'ESA propose déjà un ensemble de services par l'intermédiaire de l'ESA Space Weather Service Network (<https://swe.ssa.esa.int/user-domains>). Celui-ci est organisé de manière à fournir 39 services répartis dans 8 domaines ciblant des groupes spécifiques d'utilisateurs finaux. Les domaines sont : Conception d'engins spatiaux (SCD), Exploitation d'engins spatiaux (SCO), Vol spatial habité (SCH), Opérations de lancement (LAU), Liaison radio transionosphérique (TIO), Surveillance et suivi de l'espace (SST), Exploitation de systèmes non spatiaux (NSO), et Services généraux de données (GEN). Le domaine NSO regroupe plusieurs sous-domaines, dont le tourisme auroral, l'aviation, le système électrique et l'exploitation des pipelines.

¹⁶ <https://www.sievert-system.org/>.

¹⁷ Le site du programme national Soleil-Terre (PNST) est une mine d'informations sur les dernières recherches françaises et internationales dans le domaine de la météorologie de l'espace (<https://pnst.ias.u-psud.fr/fr/presentation/objectifs>).

¹⁸ Collecte Localisation Satellites fournit des informations sur l'océan et des modèles régionaux de prévision des océans adaptés pour évaluer, protéger et gérer les zones côtières et les activités en mer (<https://www.cls.fr/>).

¹⁹ Les prévisions ont une utilité évidente pour les gestionnaires de satellites civils, les communications et les réseaux terrestres, mais l'analyse des perturbations de la météorologie de l'espace a aussi une portée militaire. Si des satellites se trouvent exposés à des particules ionisantes susceptibles de les détériorer, ou si les communications hertziennes sont perturbées, les données recueillies doivent permettre d'analyser si la perturbation est imputable à un événement solaire ou à une agression (brouillage, éblouissement, irradiation induite, etc.).

²⁰ *Le Monde*, 13 mai 2013, « Les militaires français scrutent les colères du Soleil », par Vahé Ter Minassian, (https://www.lemonde.fr/sciences/article/2013/05/13/les-militaires-francais-scrutent-les-coleres-du-soleil_3176446_1650684.html). D'une durée de 5 minutes, une instructive présentation vidéo est également disponible : <https://www.youtube.com/watch?v=4iJPgJPHal4>.

²¹ L'OFRAME a été créé par l'INSU (Institut des sciences de l'Univers du CNRS), le CNES, le CEA et l'ONERA (<http://www.meteo-espace.fr/>).

²² Centre national d'études spatiales, Séminaire de prospective scientifique, 8-10 octobre 2019, Le Havre, p. 116-125 (https://sciences-techniques.cnes.fr/sites/default/files/drupal/202009/default/st_actes-sps_rapport-complet.pdf (rapport de la dernière rencontre quinquennale).