

L'activité solaire

Jean-Marie Malherbe, LESIA, Observatoire de Paris

L'étoile Soleil

Le Soleil est l'une des 200 milliards d'étoiles que compte notre galaxie. Il s'agit d'une étoile banale, de rayon 700 000 km, densité moyenne 1.4 et température effective 5750 degrés. Le Soleil puise son énergie dans les réactions nucléaires de fusion d'Hydrogène en Hélium dans son cœur porté à 15 millions de degrés. L'énergie rayonnée correspond à une perte de masse de 4 millions de tonnes par seconde. L'atmosphère solaire, seule observable, est constituée de la photosphère (300 km), la chromosphère (2000 km) et la couronne (millions de km) qui la raccorde au milieu interplanétaire. Il s'en échappe un flux permanent de particules chargées, le vent solaire, qui croise la Terre à 400 km/s. L'atmosphère solaire est dominée par des champs magnétiques dont les taches représentent la signature. La rotation différentielle, plus rapide à l'équateur (26 jours) qu'aux pôles (31 jours), conduit à des instabilités magnétiques violentes (éruptions de plasma, éjections de matière coronale) qui se propagent parfois jusqu'à la Terre.

Les traceurs de l'activité : taches et éruptions

Les taches constituent le premier traceur de l'activité solaire et ont été repérées à l'œil nu par les chinois il y a plus de mille ans. C'est la lunette de Galilée qui va marquer le début des observations régulières, à partir de 1610. En France, la fondation de l'Observatoire de Paris sous le Roi Soleil va faire du XVII^{ème} siècle celui de l'astrométrie. Cassini y impulse un programme d'observations des taches avec Picard et La Hire. Auzout invente l'oculaire micrométrique autorisant des mesures de position précises. Huygens introduit les horloges qui permettront de chronométrer les passages. L'observation des éruptions est plus tardive : Carrington, en 1859, mentionne la première éruption en lumière blanche, et caractérise la rotation différentielle. Les éruptions sont d'une grande importance dans les relations Soleil Terre ; elles peuvent injecter dans le milieu interplanétaire du plasma renforçant le vent solaire, qui, lorsqu'il parvient à la Terre, interagit avec la magnétosphère. Les mécanismes précis qui régissent le déclenchement des éruptions, leur développement et leur propagation, sont complexes et nécessitent le déploiement de simulations numériques. Sur ces sujets de recherche modernes progressent de nombreuses équipes internationales, appuyées par les données des missions spatiales.

Le cycle de 11 ans et sa modulation

Le cycle d'activité de 11 ans, caractérisé par une variation périodique du nombre de taches présentes sur la surface du Soleil, ne fut découvert qu'en 1843, par Schwabe, en compilant les données anciennes (fig. 1). La durée moyenne des cycles est de 11.03 ans, 70% des cycles durant de 10 à 12 ans, avec un temps de montée de 4.24 ans et de descente de 6.79 ans. Gleissberg a découvert une modulation du cycle de 11 ans (c'est à dire une variation d'amplitude des cycles, certains étant très productifs en taches, et d'autres moins) : la période de cette modulation semble centennale, mais reste imprécise. Des cycles faibles ont eu lieu vers 1810, 1910, et on pourrait s'orienter vers une nouvelle série.

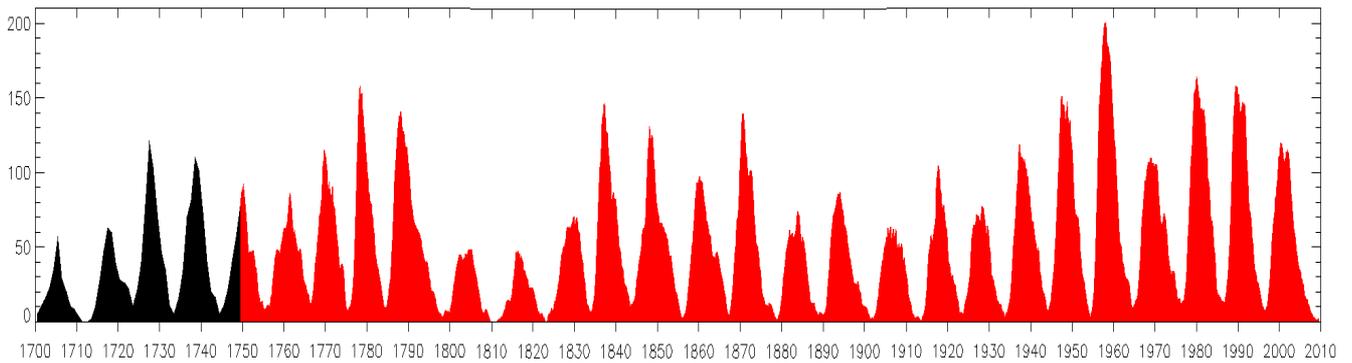


Fig 1 : Nombre de taches (dit de Wolf) en fonction du temps (Observatoire Royal de Bruxelles) mettant en évidence le cycle de 11 ans ainsi qu'une modulation plus ou moins séculaire, <http://www.sidc.oma.be/>

L'activité solaire ne se quantifie pas qu'au comptage des taches : on utilise d'autres indicateurs bien corrélés comme l'irradiance ($1366 \pm 0.05 \text{ W/m}^2$, fig.4), le nombre d'éruptions (fig. 5) ou encore le flux radio centimétrique à 10.7 cm. Le déficit d'irradiance qu'on penserait imputer aux taches est plus que compensé par l'excédent dû aux facules brillantes, dont la surface est plus grande. L'irradiance solaire n'est donc pas constante et varie environ de 1 pour 1000 avec le cycle. L'identification du cycle magnétique associé de 22 ans est due à Hale. Grâce à l'effet Zeeman, qui interprète le dédoublement des raies atomiques en présence de champ magnétique, Hale a compris la nature magnétique des taches en 1908, puis découvert en 1919 le cycle magnétique de 22 ans lié au renversement tous les 11 ans de la polarité des deux hémisphères du Soleil (Fig. 2).

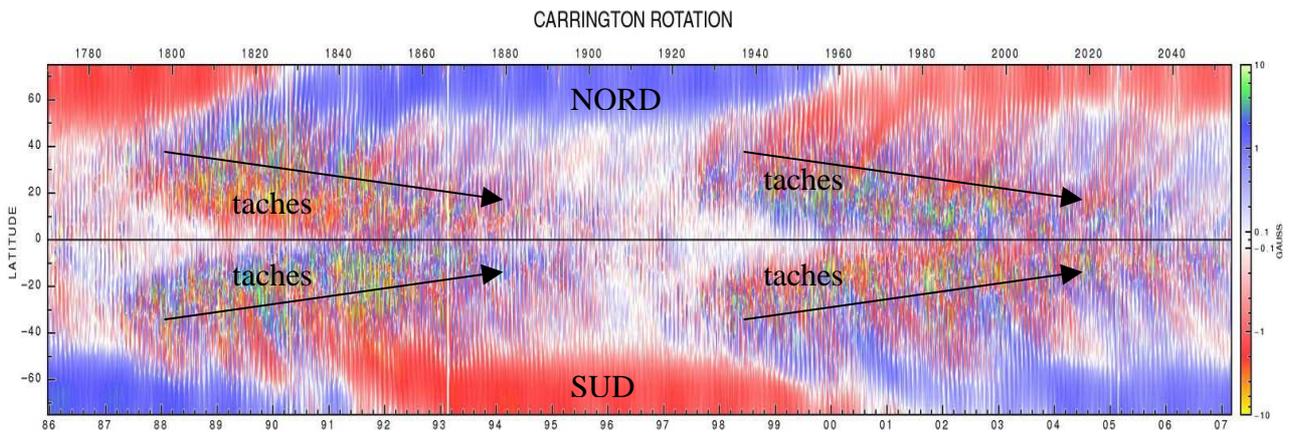


Fig 2 : Cycle magnétique de 22 ans, carte synoptique 1986 - 2007 du télescope solaire de 150 pieds du Mont Wilson (UCLA) montrant la distribution des polarités magnétiques (bleu et rouge) en fonction du temps (croissant de gauche à droite) et de la latitude (de bas en haut). La latitude d'apparition des taches décroît au cours du cycle de 11 ans.

Des minima remarquables

L'observation des taches solaires a été plus ou moins continue au XVII^{ème} siècle, les astronomes les plus actifs dans ce domaine étant Scheiner, Hevelius, puis Picard et la Hire à l'Observatoire de Paris. Cependant, très peu de taches furent observées entre 1645 et 1705, époque où l'apparition d'une tache était souvent notée comme un évènement. Les reconstructions historiques montrent que ce déficit est bien réel. Une baisse du nombre d'aurores boréales corrobore l'idée que le soleil fut très peu actif durant plusieurs décennies. Cette période est connue sous le nom de Minimum de Maunder, son découvreur. On a constaté un refroidissement de la température moyenne contemporaine (le « petit âge glaciaire »). On sait, par examen de la concentration en isotopes cosmogéniques ^{14}C ou ^{10}Be , formés par l'impact des rayons cosmiques sur l'atmosphère terrestre remonter dans le passé et identifier d'autres minima, comme ceux de Spörer, Wolf ou Oort (fig. 3).

La concentration en ^{14}C est plus faible en période de maximum solaire car les particules cosmiques sont déviées par les champs magnétiques. Solanki et al (Nature, 2004) suggèrent, à l'échelle de 10000 ans, que l'activité actuelle serait en moyenne depuis 1950 particulièrement élevée.

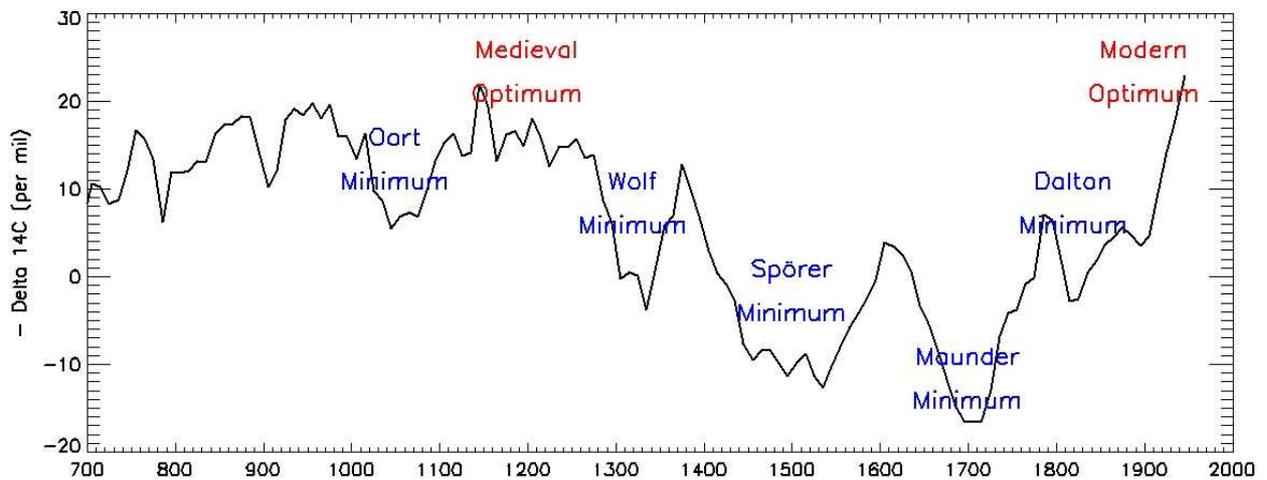


Fig. 3 : la concentration atmosphérique décennale en isotope ^{14}C mesurée dans les anneaux de croissance des arbres (selon les données Intcal98, Quaternary Isotope Laboratory) donne une indication sur l'activité solaire ancienne

L'anomalie de 2008 et le nouveau cycle

Le précédent maximum remonte à l'an 2000. Le récent minimum de 2008 a été plein de surprises : pendant 266 jours, aucune tache n'a été vue sur le Soleil et il faut revenir cent ans en arrière pour retrouver une telle situation. Le flux radio centimétrique et la pression du vent solaire n'y ont jamais été aussi faibles depuis 50 ans et le cycle a été particulièrement long (12 ans 7 mois). L'irradiance totale au minimum solaire mesurée en orbite a également décliné (-0.02%, fig. 4). L'activité solaire est néanmoins repartie à la hausse en 2010, mais les méthodes de prévision des cycles suggèrent que le maximum de 2013 (cycle 24) sera moins fort que le précédent (fig. 5), donnant crédit à la modulation de l'amplitude des cycles sur une période centennale.

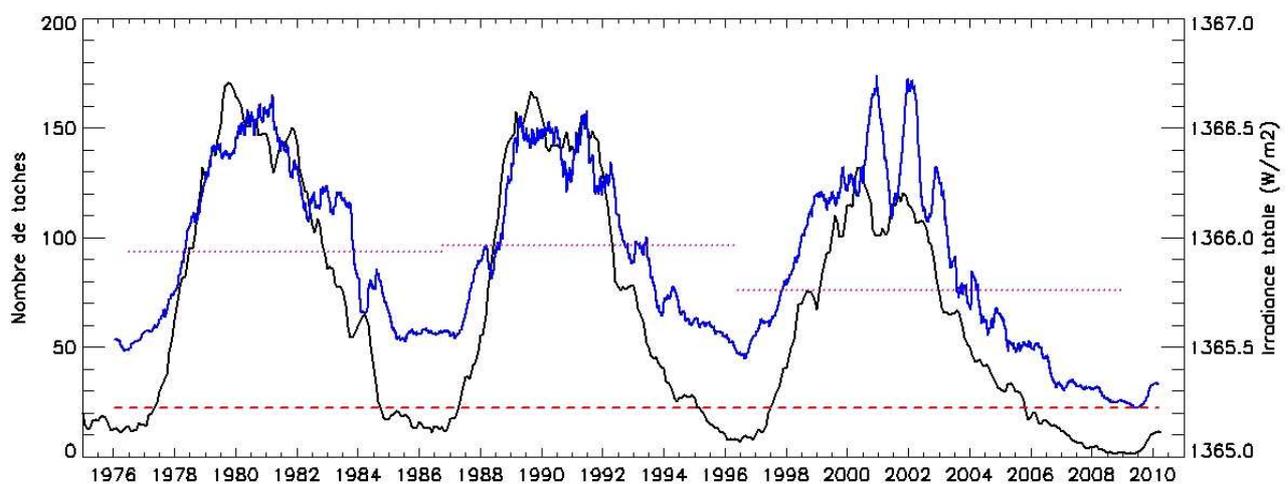


Fig. 4 : Indice des taches de Bruxelles (noir) et irradiance solaire totale 1976-2010 (bleu, d'après les données de C. Fröhlich, version d41_62_1003, PMOD/WRC, Davos, Suisse)

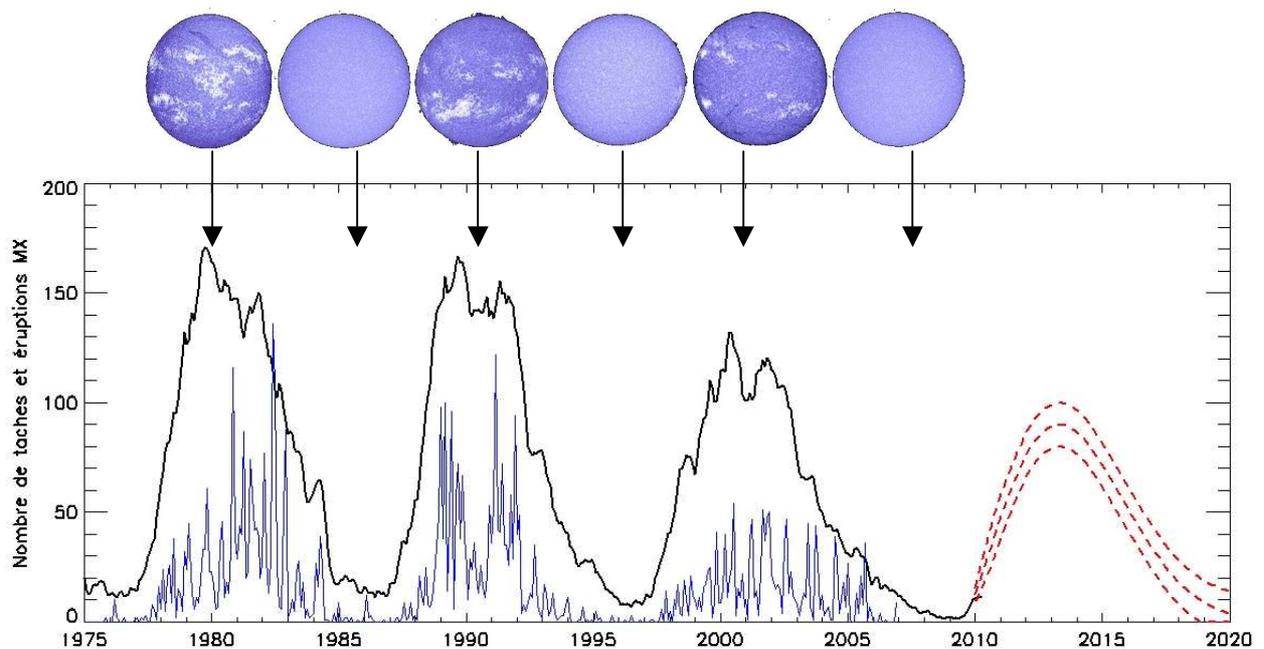


Fig. 5 : Cycles 21, 22, 23 (nombre de taches en noir, nombre d'éruptions de classe M et X en bleu) et prévision du cycle 24 (en rouge, source NOAA), avec l'aspect du Soleil dans la raie CaII K3 393.4 nm (Observatoire de Meudon)

2010 : SDO, PICARD et la variabilité solaire

De nombreux instruments se sont succédé dans l'espace depuis 20 ans. YOHKOH (SolarA-JAXA) a étudié le cycle en rayons X ; SOHO (« Solar and Heliospheric Observatory » ESA/NASA) surveille depuis 1996 la couronne solaire en Ultra Violet (UV) ; le « Transition Region And Coronal Explorer » (NASA) a complété SOHO en 1999. Depuis 2006, STEREO (« Solar Terrestrial Relations Observatory » NASA) apporte avec ses deux sondes une vision 3D des phénomènes éruptifs et HINODE (SolarB-JAXA) fournit un pouvoir séparateur sans précédent ($0.2''$) sur les centres actifs. En 2010, deux nouvelles expériences sont programmées : « Solar Dynamics Observatory » (SDO, NASA, <http://sdowww.lmsal.com/suntoday#>) surveille depuis Mai le Soleil en UV et l'évolution des champs magnétiques vectoriels en mode Soleil entier avec une cadence inédite (fig. 6).

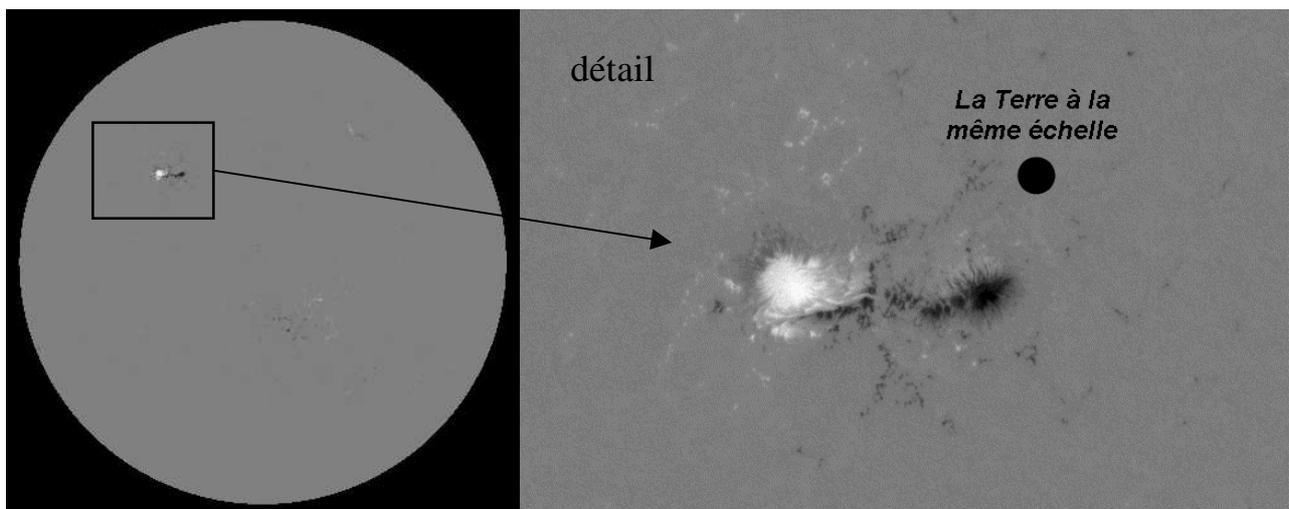


Fig. 6 : premier magnétogramme longitudinal de HMI/SDO ($0.5''/\text{pixel}$), Avril 2010, NASA

PICARD (CNES, <http://smc.cnes.fr/PICARD/Fr/>), à la mémoire de l'abbé Picard, l'un des premiers académiciens de l'Observatoire de Paris, est un microsatellite de météorologie qui va s'attaquer (lancement mi 2010) à l'étude des variations des paramètres fondamentaux que sont le diamètre et l'irradiance solaire durant la montée du cycle 24 (2010-2013). Tout est à apprendre des fluctuations du diamètre solaire (fig. 7) !

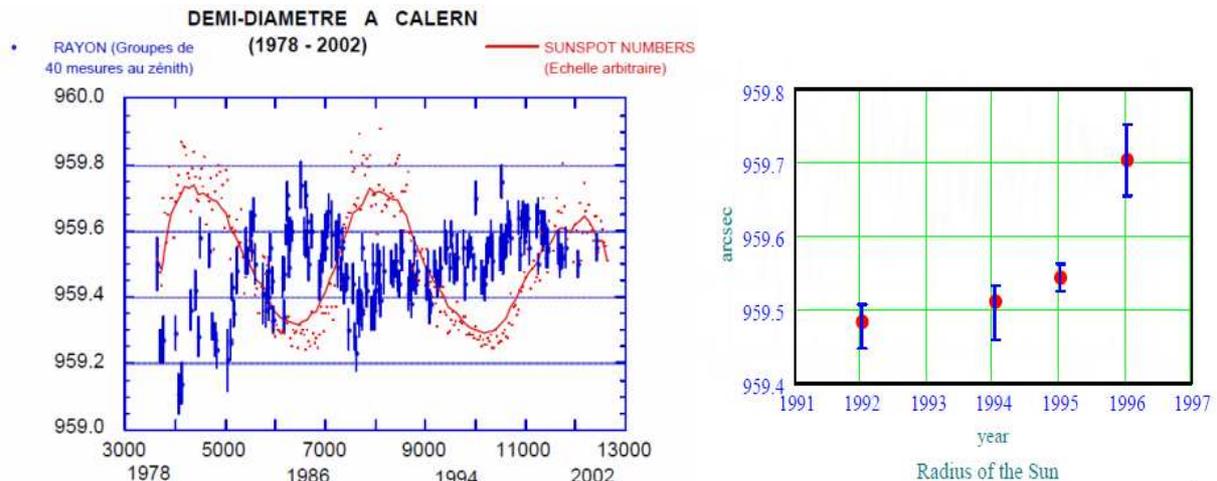


Fig. 7 : certaines mesures du diamètre solaire au sol (astrolabe de Calern, Observatoire de la Côte d'Azur, Ch. Delmas, F. Laclare) et en ballon (« Solar Disk Sextant », Yale University, S. Sofia) suggèrent une anti corrélation avec le cycle : PICARD est conçu pour éclaircir ce mystère (*Advances in Space Research*, 35, 2005, 329, G. Thuillier, PI de PICARD)

La météorologie spatiale

L'étude et la prévision des effets de l'activité solaire sur la Terre et ses impacts sur les activités humaines sont en plein essor. Les agences spatiales ont besoin de prévisions fiables lorsqu'il s'agit de procéder au lancement d'une fusée (« Space Weather Prediction Center » de la NOAA, <http://www.swpc.noaa.gov/>). L'Agence Spatiale Européenne (ESA) a lancé le programme « Space Situational Awareness », la NASA « Living With a Star ». Ce sont les particules accélérées par les éruptions qu'il faut prévoir en surveillant le Soleil quotidiennement. Les observations systématiques menées à Meudon ou au Pic du Midi y contribuent (<http://bass2000.obspm.fr>), ainsi que les moniteurs à neutrons de Kerguelen et de Terre Adélie (<http://previ.obspm.fr>). Les effets les plus connus de l'activité solaire sur l'environnement terrestre sont :

- les aurores polaires, observées également sur d'autres planètes comme Mars, Jupiter, Saturne et Uranus ;
- la dégradation des satellites artificiels par les bombardements de particules chargées ;
- l'irradiation, pouvant mettre en danger la vie des astronautes et contaminer les personnels navigants des vols aériens circulant dans les zones polaires (système de contrôle SIEVERT) ;
- les phénomènes inductifs dans les lignes à haute tension, risquant d'endommager les transformateurs des usines électriques et provoquer des coupures d'alimentation ;
- la corrosion des pipelines ;
- les perturbations des communications radio utilisant la propriété de réflexion des ondes sur l'ionosphère.