



ICAO

UNITING AVIATION

NO COUNTRY LEFT BEHIND



# Rendani Nndanganeni

*Chercheur en météorologie de l'espace (SANSA)*

## **Incidences de la météorologie de l'espace sur l'aviation : PPT 03**

Réunion virtuelle/28 juillet 2021



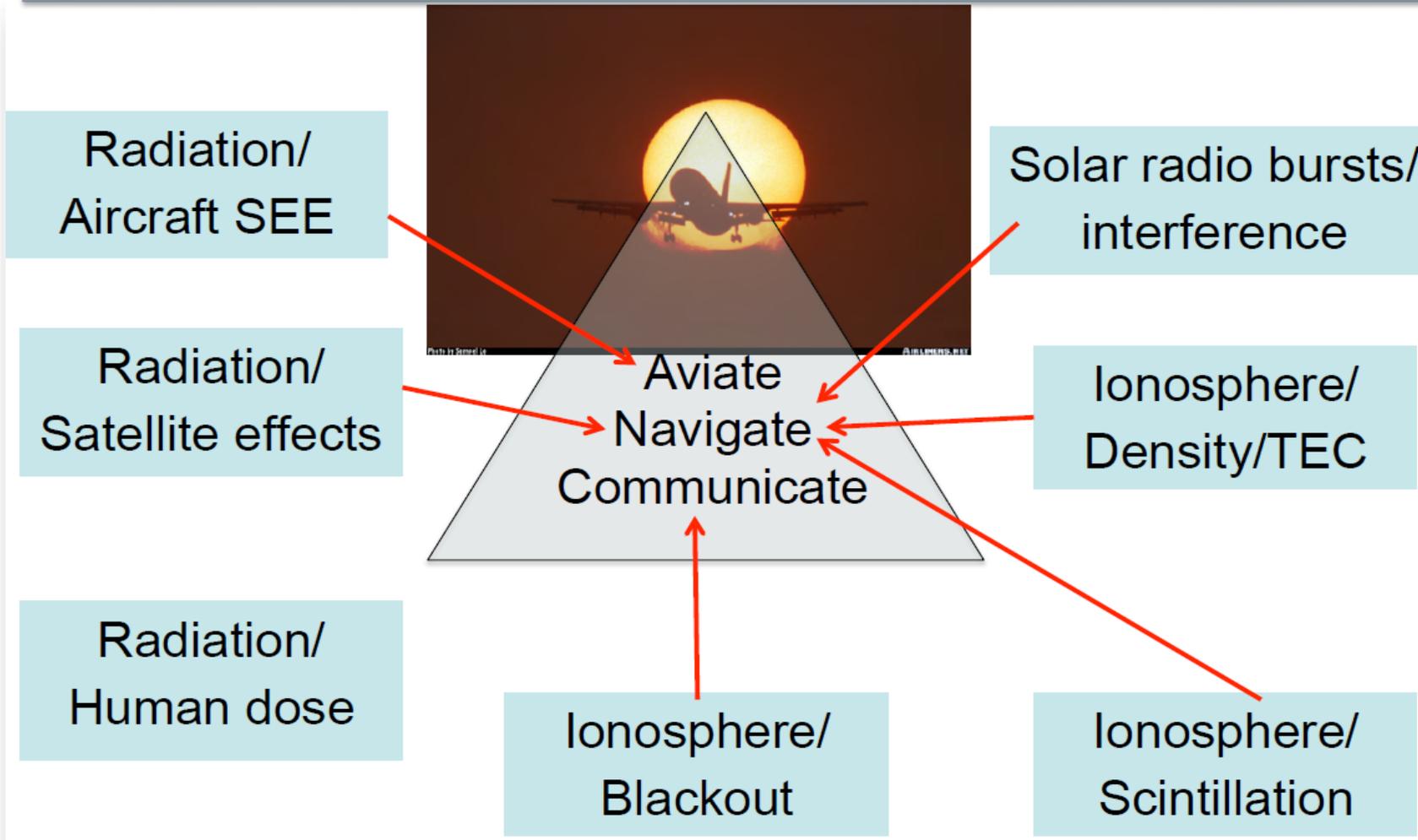


# Aperçu général

- Pourquoi l'aviation doit se préoccuper de la météorologie de l'espace ?
- Phénomènes de météorologie de l'espace qui ont des incidences sur l'aviation
- Incidences sur les communications HF
- Incidences sur les aides à la navigation
- Exposition aux rayonnements



## Pourquoi l'aviation (compagnies aériennes) doit se préoccuper des phénomènes de météorologie de l'espace





L'Organisation de l'aviation civile internationale (OACI) est l'institution spécialisée des Nations dont la mission est de promouvoir un transport aérien sûr et ordonné. Elle a identifié les éruptions et les tempêtes solaires comme étant de potentiels dangers pour les communications, la navigation, les équipages d'aéronef et les passagers. Elle a demandé que des alertes précoces soient diffusées sur les phénomènes de météorologie de l'espace.

Incidences de la météorologie de l'espace sur l'aviation dans les domaines suivants :

- Communications HF,
- Satellites (perte de verrouillage, scintillation, dégâts sur les équipements électroniques),
- GPS/GNSS
- Exposition aux rayonnements.

# PHENOMÈNES SPATIOMETEOROLOGIQUES AYANT DES INCIDENCES SUR L'AVIATION



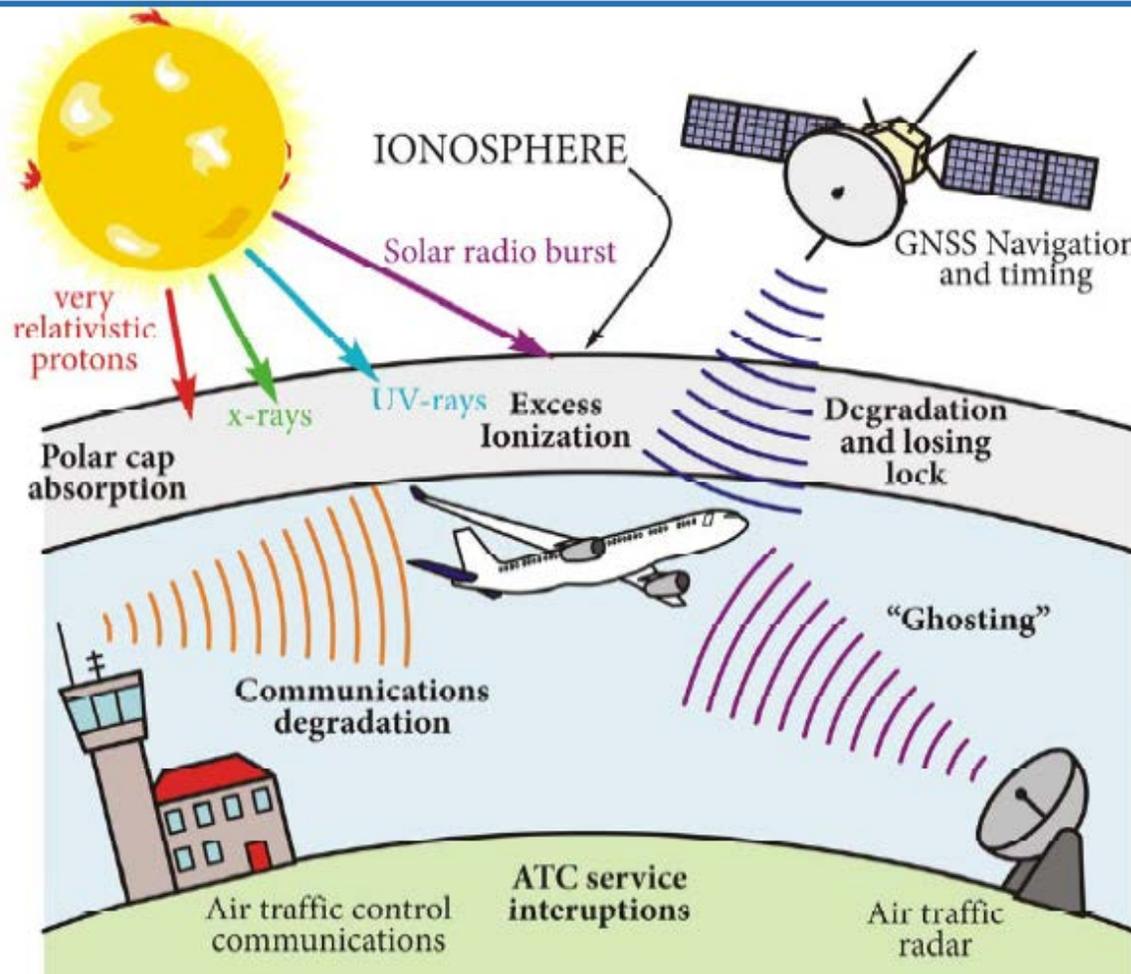
SOLAR EVENT	Solar Flare				CME		Solar Wind	Galactic Cosmic Rays	
	X-Ray Emissions	Ultraviolet emissions	Radio Bursts	Solar Energetic Protons (SEPs)	Plasma	Solar Energetic Protons (SEPs)	Enhances Radiation Belts		
	Increase Ionosphere Density	Ionospheric disturbances			Geo-magnetic Storms		Aurora	Radiation	Ionospheric Scintillation
<b>Passengers/Crew (Biological)</b>				X	X	X		X	
<b>Avionics</b>				X		X		X	
<b>HF Communication</b>	X	X		X	X	X			
<b>GPS/WAAS</b>	X	X	X	X	X	X	X		X
<b>Satellites (Navigation, Communication)</b>	X	X	X	X	X	X	X	X	X
<b>Low Frequency Communication</b>	X		X		X				
<b>ATC facilities</b>		X			X				

- Interruption brusque de communication, liaison voix/données HF, à savoir, les communications contrôleur-pilote par liaison de données (CPDLC) sur les routes où ce mode de communication est utilisé ;
- Performances insuffisantes ou inutilisables des communications par satellite ;
- Dégradation des performances de la navigation et de la surveillance fondées sur le GNSS et anomalies la surveillance dépendante automatique en mode diffusion (ADS-B) et/ou de la surveillance dépendante en mode automatique en mode contrat (ADS\_C) ;
- Pertes de verrouillage intermittentes du GNSS, surtout près de l'Équateur et après le coucher du Soleil ;
- Performances anormales imprévisibles des équipements électroniques de bord entraînant des redémarrages et des anomalies ; problèmes liés à l'exposition des équipages et des passagers aux rayonnements.

Avec l'aimable autorisation de <https://www.gwu.edu>



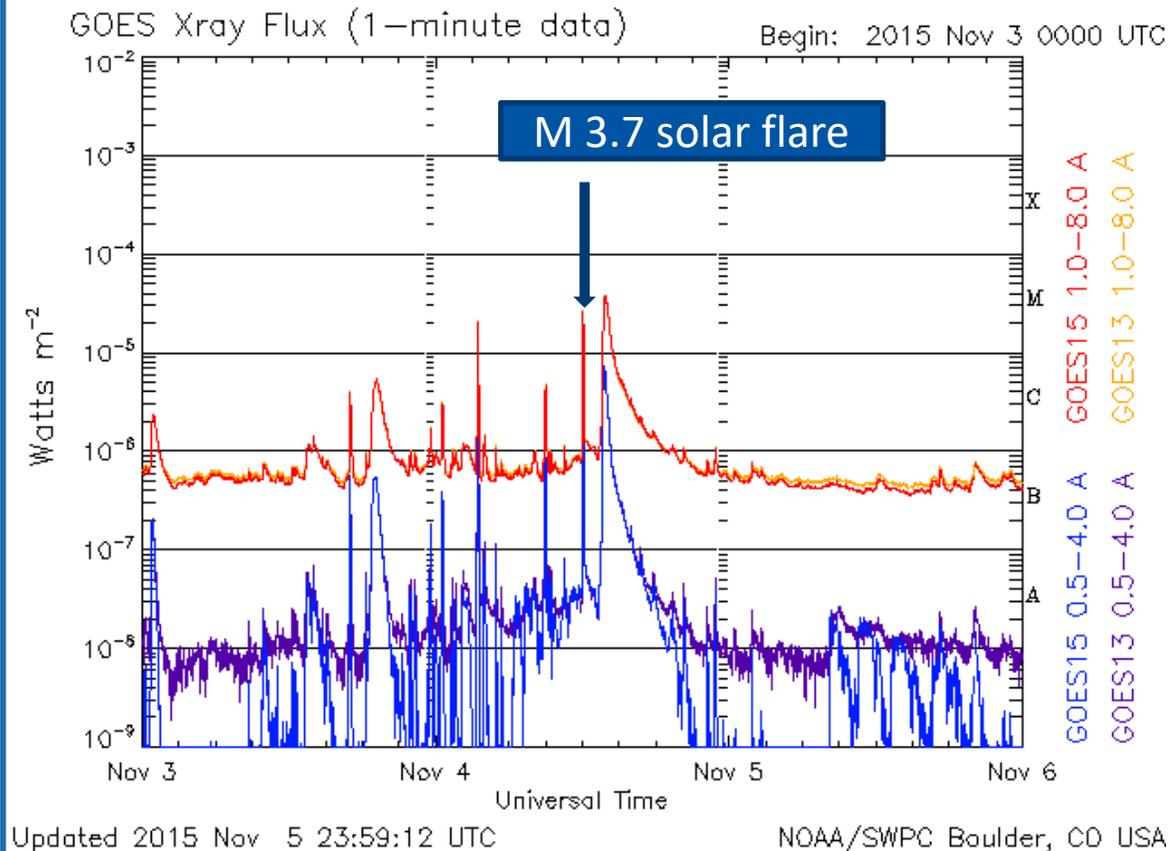
**Aperçu général des nombreuses voies par lesquelles les phénomènes de météorologie de l'espace peuvent affecter l'aviation.**





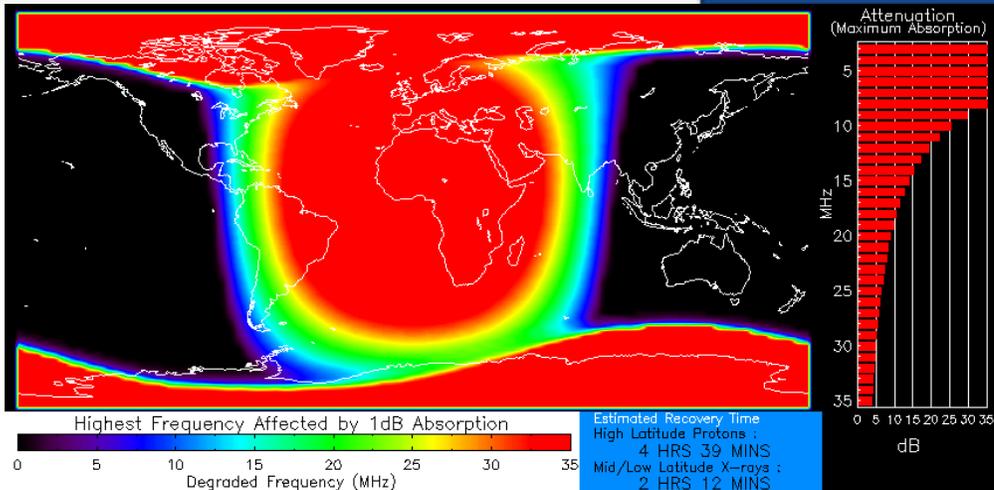
## Exemple d'incidences sur le système radar

- Le 4 novembre 2015, plusieurs organismes européens de gestion de la circulation aérienne ont annoncé qu'ils rencontraient des difficultés avec les systèmes radar au coucher du Soleil, ou à son approche
- Belgocontrol, l'organisme de contrôle de la circulation aérienne en Belgique avait signalé des problèmes avec un radar A/C secondaire.
- De faux échos représentant des avions inexistantes étaient enregistrés uniquement dans la direction du Soleil à deux périodes : des perturbations du trafic aérien avaient été enregistrées ce jour-là dans la partie Sud de la Suède, entraînant une fermeture partielle de facto de l'espace aérien et des retards dans les départs et les arrivées, selon la presse (*The Local*, 2015) .
- Si l'on se fie aux informations rendues publiques par l'organisme suédois de gestion de la circulation aérienne (Luftverket ; ci-après LFV), les systèmes de radar secondaire ATC ne pouvaient pas fournir des informations adéquates aux contrôleurs aériens, ce qui avait obligé les autorités à réduire les mouvements d'aéronefs, afin de préserver la sécurité (*Luftfartsverket*, 2015).
- **A.J. Andersson, 2017** indique qu'à cause de ce phénomène, une série de perturbations du système radar ATC s'étaient produites en même temps sur plusieurs sites en Suède vers 14 h 19 TU.
- Le 4 novembre 2015 à 14 h 49 TU, un avion de Air Greenland atterrissant à la Base aérienne de Thulé (Groenland) a connu des problèmes techniques à plus de 4 000 pieds d'altitude à cause d'un rapport antagonique entre un radiophare d'alignement de piste (à 109.6 MHz) indiquant un alignement correct avec la piste et l'autopilote incapable de rester sur ces mêmes informations de position. L'atterrissage s'était déroulé sans complications majeures. Après le vol, les équipements du radiophare avaient été contrôlés, mais aucune panne n'y avait été décelée.





# Incidences sur les communications HF



Strong X-ray flux  
Product Valid At : 2017-09-06 12:00 UTC

Minor Proton Flux  
NOAA/SWPC Boulder, CO USA

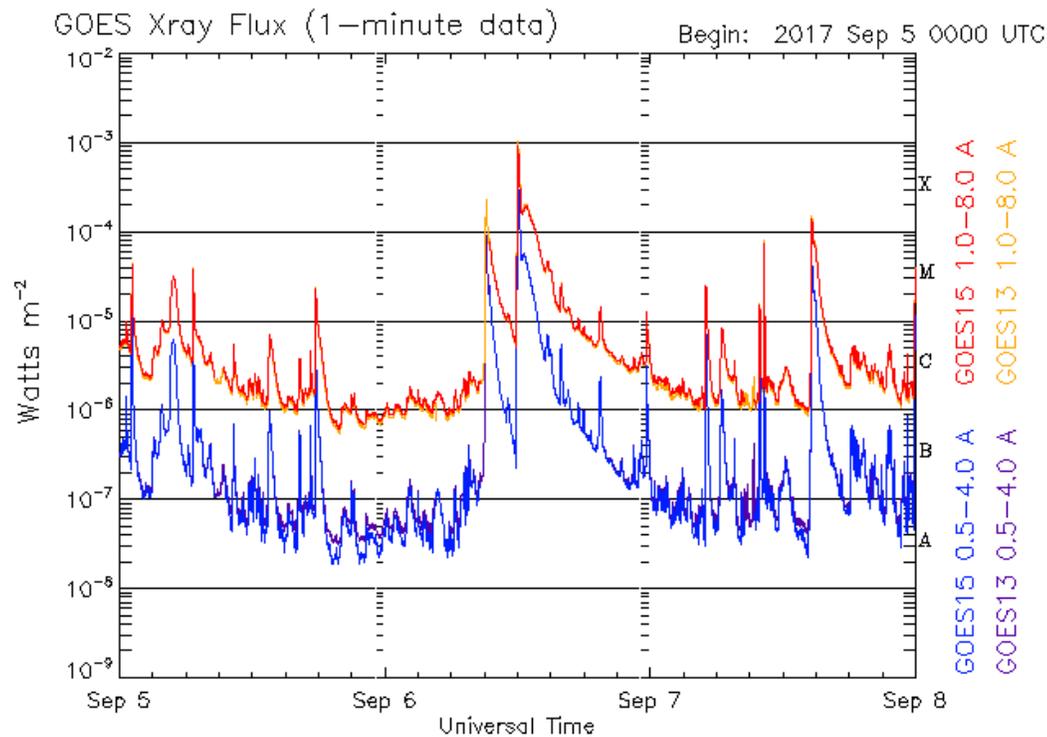
- Exemple d'éruption solaire de classe X9.3 observée le 6 septembre 2017 vers 12 h 4 TU, 15 h 4, heure locale. Cet exemple montre une interruption totale des radiocommunications au-dessus de l'Europe, de l'Afrique et de l'Océan Atlantique .

## Absorption des ondes par la couche D de l'ionosphère (D-RAP)

➤ La couche D de l'ionosphère a la plus forte incidence sur les communications hautes fréquences (HF) et les systèmes de navigation à basses fréquences (LF). La carte montre une zone de la couche D de l'ionosphère pendant une éruption solaire, ainsi que le temps estimatif de retour à la normale.

➤ Une éruption solaire sur la partie ensoleillée de la Terre dégrade les radiocommunications HF pendant quelques minutes ou quelques heures.

➤ Selon la NOAA, en 2017 pendant un tel événement, les ondes radio HF utilisées par l'aviation, le transport maritime, les radio amateurs, et d'autres bandes d'urgence, étaient indisponibles pour une période allant jusqu'à huit heures. Par exemple, l'aviation civile a signalé une interruption des communications avec un avion cargo

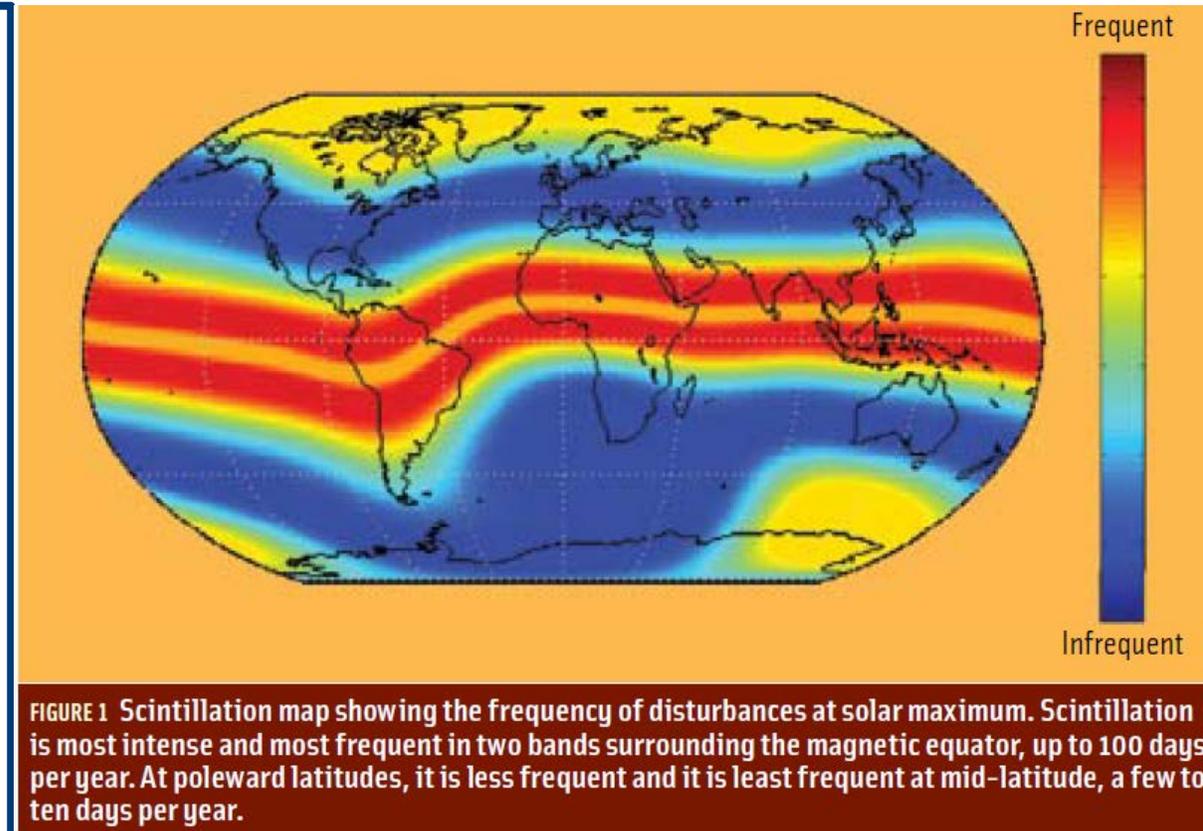


Updated 2017 Sep 7 23:59:12 UTC

NOAA/SWPC Boulder, CO USA



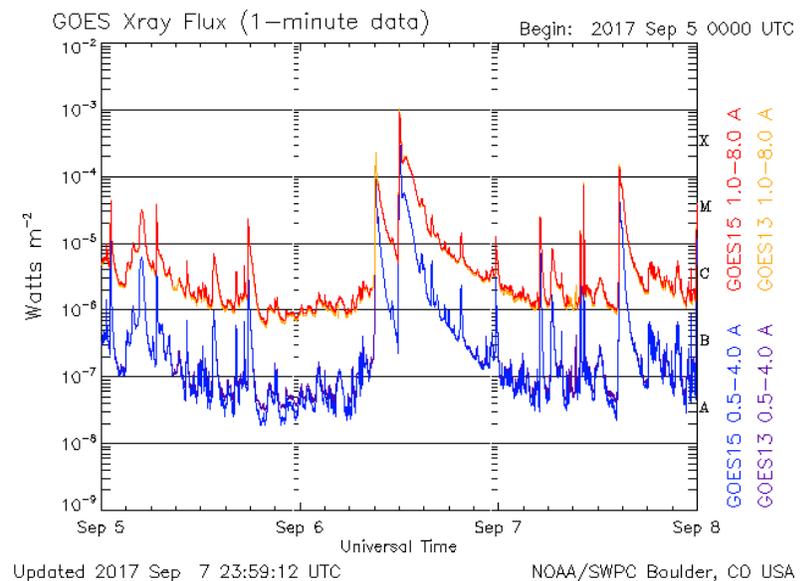
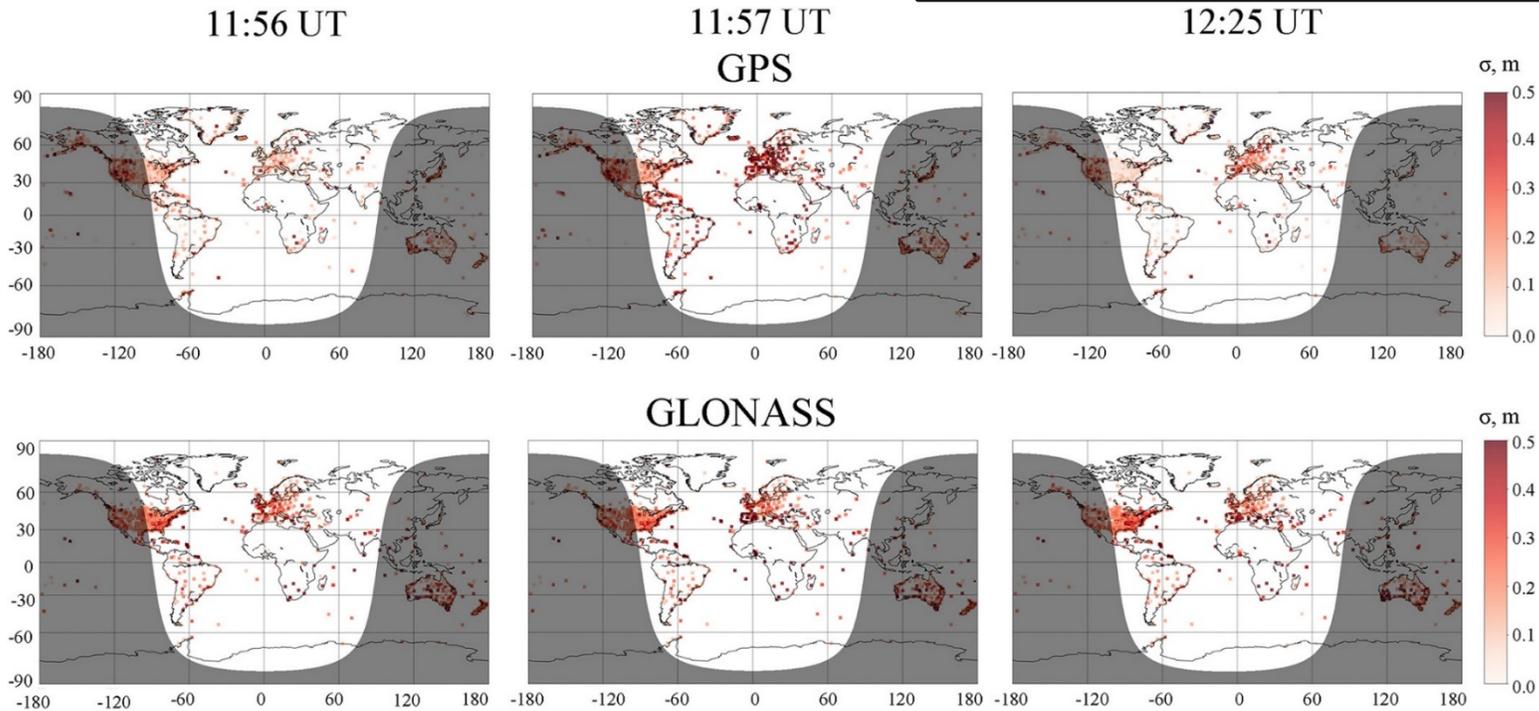
- La scintillation ionosphérique est l'atténuation des ondes radio due à la présence de structures de petite taille dans l'ionosphère (de quelques dizaines de mètres à des dizaines de kilomètres). Les phénomènes de scintillation sont liés aux tempêtes géomagnétiques, mais cette relation est complexe !
- Les scintillations intenses peuvent empêcher un récepteur GPS de verrouiller (c.-à-d., perte des informations sur la position et l'heure).
- Si la perte de verrouillage se produit avec plusieurs satellites, le service de positionnement sera indisponible. **Conker et al. (2003)**
- Les événements de scintillation moins intenses réduisent la précision de la position et peuvent avoir une incidence sur les systèmes de communication à très hautes fréquences (UHF).



Kintner et al., Inside GNSS, Aug. 2009



**Exemple d'erreurs de positionnement du GPS duee à une éruption solaire survenue le 6 septembre 2017**



- La Figure 11 montre la répartition mondiale des erreurs de positionnement survenues lors de l'éruption X9.3. On peut voir que lors de cette éruption, l'erreur de positionnement s'est accrue à la fois pour les systems GPS et GLONASS . Cet effet est observé sur la partie ensoleillée de la Terre : dans la majeure partie de l'Afrique et de l'Europe, mais aussi (mais de façon moins prononcée) en Amérique du Sud et en Amérique du Nord). À 11 h 56 TU, avant l'éruption, les erreurs moyennes de PPP dans cette zone (-30:30°N, -30:60°E) étaient de ~0.17 et ~0.47 m pour le GPS le GLONASS, respectivement. Ces valeurs ont fortement augmenté atteignant 0.46 et 0.56 m après le début de l'éruption. Cette détérioration du positionnement a duré environ 30 min , jusqu'à vers 12 h 25 TU. Les résultats moyens d'erreurs de PPP enregistrées durant cette période dans cette zone (-30:30°N, -30:60°E) se sont situées entre ~0.57 et ~0.56 m, pour le GPS et le GLONASS. Globalement, nos résultats montrent que la qualité du positionnement pour le GPS a diminué d'environ trois fois pendant l'éruption.
- Durant cette période, l'erreur de positionnement du GPS a été trois fois supérieure au niveau habituel.



## Exemple d'incidences sur les systems mondiaux de navigation par satellite :

- Lors des tempêtes de 2003, le système de renforcement à couverture étendue (WAAS) du GNSS qui couvre l'Amérique du Nord, perdit la capacité de navigation pendant plusieurs heures, et les performances des systèmes différentiels furent considérablement perturbées (NSTB/WAAS Test and Evaluation Team, 2004). Le Système de renforcement à couverture étendue (WAAS) des États-Unis avait été également affecté. Durant 15 heures le 29 octobre et pendant 11 heures le 30 octobre, l'ionosphère a connu tellement de perturbations que la limite d'erreur verticale a été dépassée et le WAAS était devenu inutilisable pour les approches de précision.
- Tempêtes solaires d'Halloween 2003. Pendant la phase descendante du cycle solaire, le Soleil est entré subitement en grande activité. Un groupe de tâches solaires très larges et complexes avaient entraîné des éjections de masse coronale et des éruptions solaires. Ce qui avait produit des orages géomagnétiques qui avaient entraîné des pannes des systèmes de communications à hautes fréquences (HF), des fluctuations des réseaux électriques et des incidences mineures à graves sur les systèmes de satellites. Notamment deux satellites d'Inmarsat (utilisés par l'aviation) dont l'un avait nécessité une intervention manuelle afin de corriger son orbite et le contact de l'autre a été perdu à cause de pannes du processeur central. Il ne s'agissait là que de deux des 47 satellites qui avaient connu des interruptions de service ayant duré entre quelques heures et une journée.



ICAO

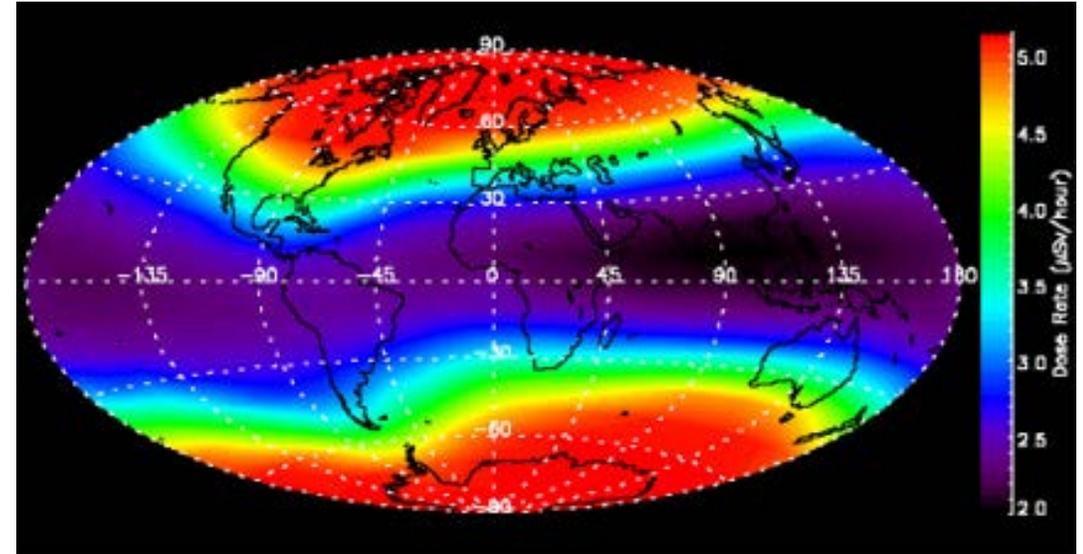
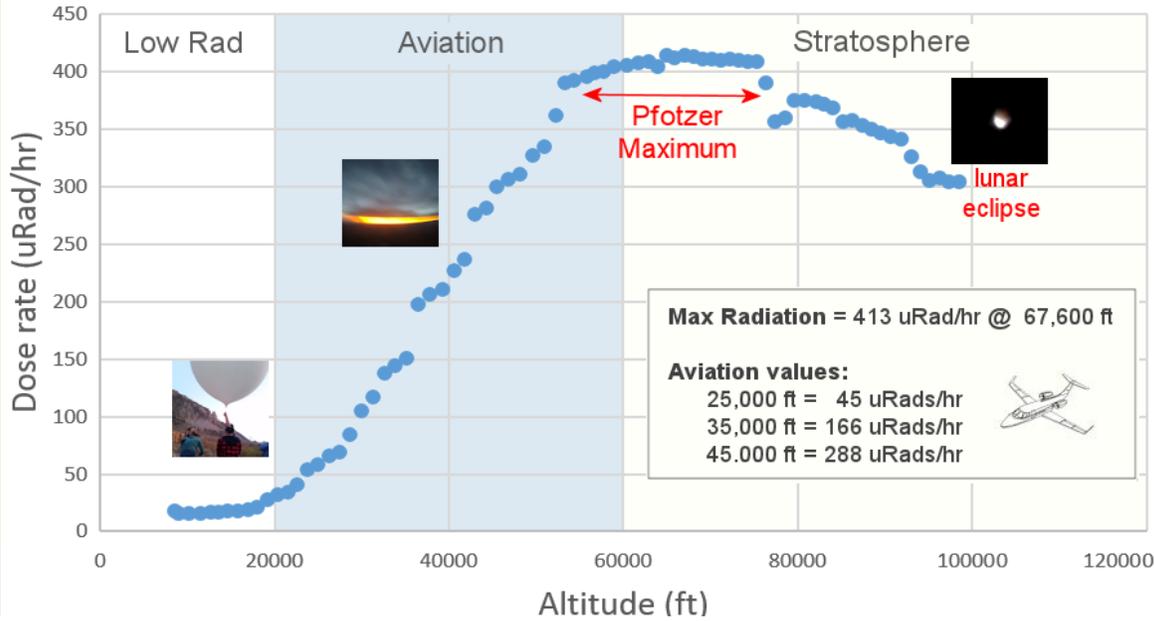
U

# Exposition au rayonnement : incidences sur la santé humaine et l'avionique

EHIND



### Radiation vs. Altitude -- September 27, 2015



Dose moyenne de rayonnement de fond: avec l'aimable autorisation de 19hubbl01

ALTITUDE (feet)	HOURS AT LATITUDE 60 N	HOURS AT EQUATOR
27,000	630	1330
30,000	440	980
33,000	320	750
36,000	250	600
39,000	200	490
42,000	160	420
45,000	140	380
48,000	120	350

- La dose de rayonnement de fond dans les régions polaires avec une activité solaire normale, est d'environ 3 à 5 fois supérieure à celle des régions équatoriales .
- Pour des raisons pratiques, le Tableau 2 présente le nombre d'heures de vol nécessaires par an pour atteindre une dose de 1 mSv à certaines altitudes et latitudes.



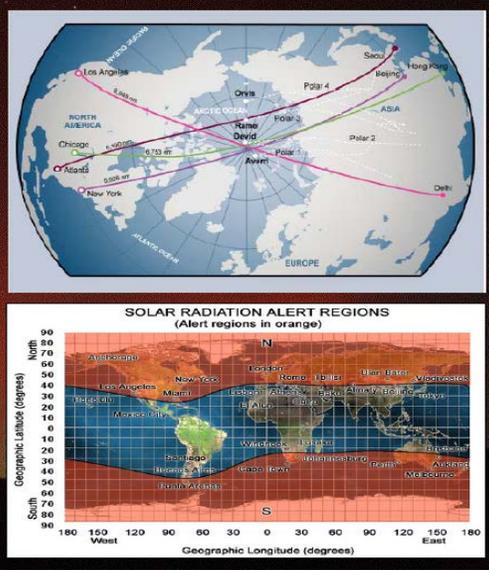
Airlines avoid polar routes during Radiation Storms due to both exposure and communications concerns

Low latitude concerns also exist:

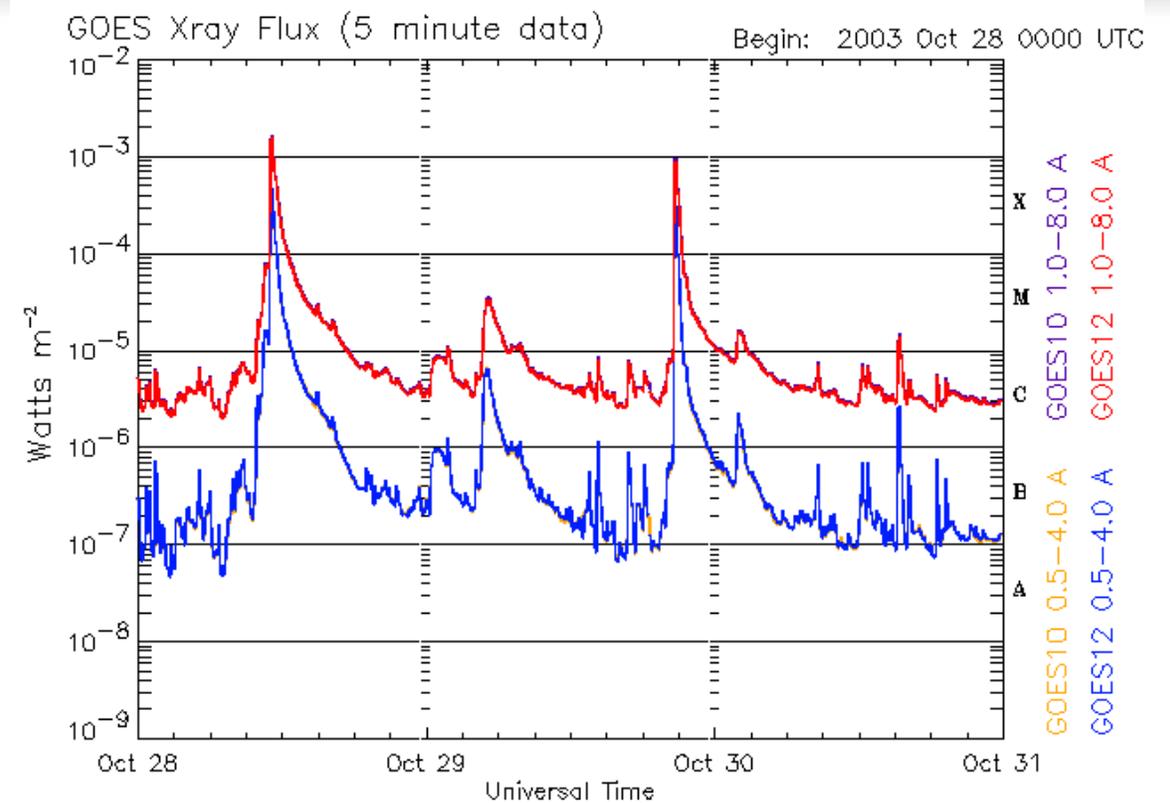
**ALERT:** Solar Radiation Alert at Flight Altitudes Conditions Began: 2003 Oct 28 2113 UTC

*Comment: Satellite measurements indicate unusually high levels of ionizing radiation, coming from the sun. This may lead to excessive radiation doses to air travelers at Corrected Geomagnetic Latitudes above 35 degrees north, or south.*

(Federal Aviation Administration)

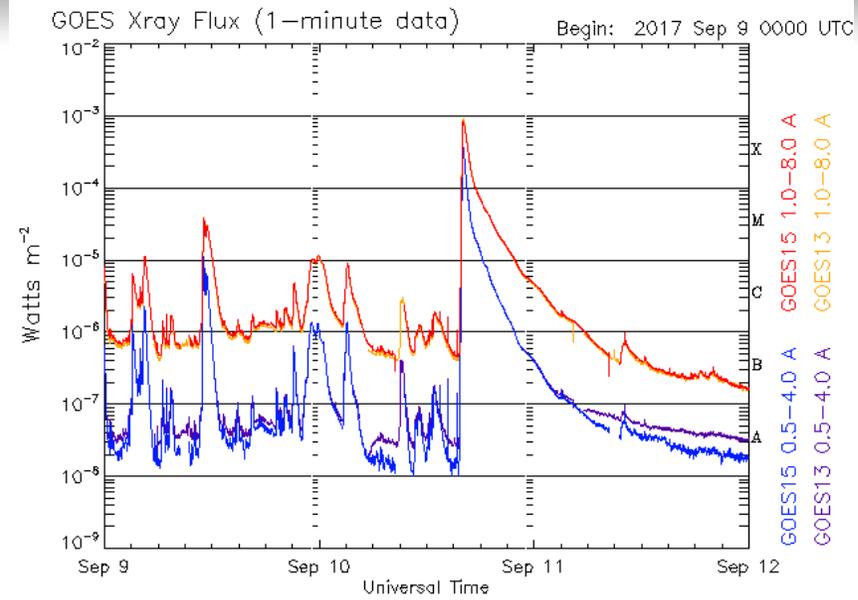
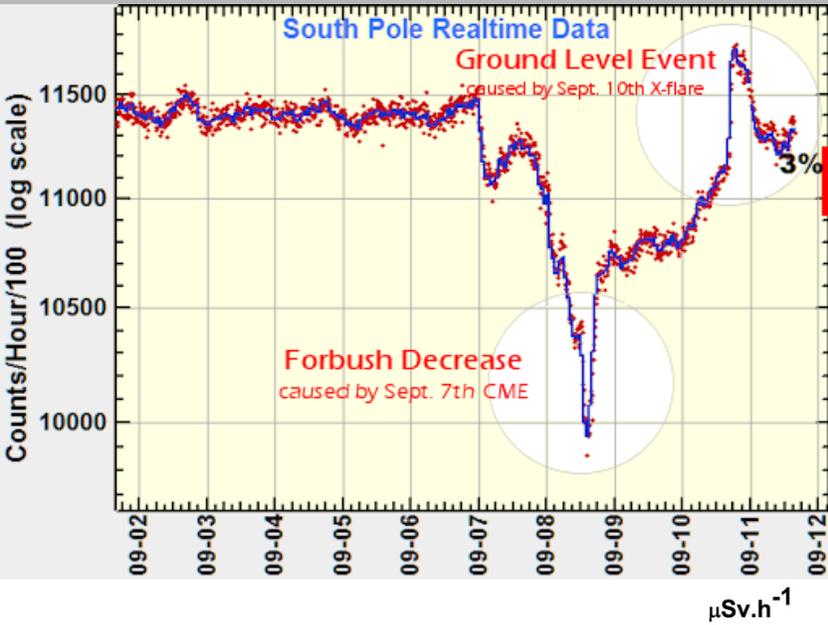


- Les systèmes électroniques de bord d'un aéronef sont soumis à de fortes doses de rayonnement ionisant susceptibles de causer des effets transitoires capables d'endommager les fonctions et les données des systèmes.
- Les effets les plus répandus sont les effets singuliers (SEE) qui sont causés par un flux de neutrons à une altitude de croisière et les effets transitoires (SEU) causés par un rayonnement ionisant dû à des rayons cosmiques galactiques .



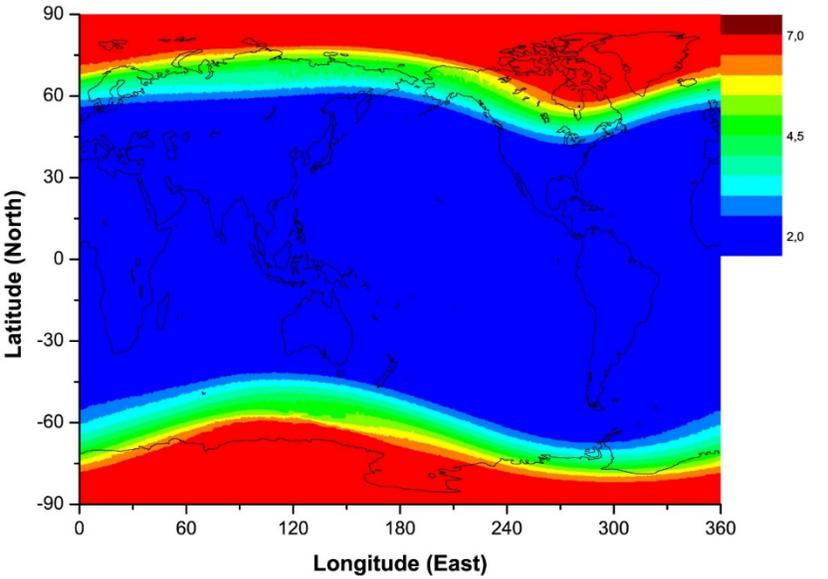
Updated 2003 Oct 30 23:56:05 UTC

NOAA/SEC Boulder, CO USA



Updated 2017 Sep 11 23:59:12 UTC NOAA/SWPC Boulder, CO USA

Évaluation de l'environnement de rayonnement à certaines altitudes de vol des avions de ligne lors du GLE 72 le 10 septembre 2017 à l'aide des données du moniteur de neutrons. "Les niveaux de radiation ont bondi de 6 %", a déclaré Clive Dyer, professeur visiteur au centre spatial de l'Université de Surrey. "Historiquement, il s'agissait d'une irradiation d'intensité relativement faible – mille fois moins puissante que le rayonnement survenu le 23 février 1956, qui le plus intense jamais mesuré". Néanmoins, il a été ressenti à l'altitude de vol des avions de ligne. Selon Dyer "les passagers volant à de hautes altitudes (40 000 pieds) pourraient avoir absorbé 10 microsieverts supplémentaires de radiation", soit environ le double de la dose habituelle sur ce type de vol .



Dans le scénario catastrophe où les avions décolleraient quelques instants avant le déclenchement du GLE et se maintiendraient à une haute attitude de croisière à 40 000 pieds (12 kilomètres, les passagers d'un vol Helsinki (Finlande) – Osaka (Japon) recevraient une dose de rayonnement d'environ 90 microsieverts, a conclu l'équipe. Ceux d'un vol Helsinki – New York recevraient reçu une dose un peu plus élevée, soit environ 110 microsieverts. Ces niveaux de rayonnement sont largement inférieurs au niveau d'exposition annuelle d'un Américain aux rayonnements, qui s'élève à un millisievert. Mais, ils restent supérieurs au niveau habituel de rayonnement de fond et pourraient cumulativement présenter un risque pour la santé des équipages et des pilotes qui reçoivent déjà en moyenne trois fois la dose annuelle moyenne de rayonnement. Le rayonnement peut aussi endommager les équipements électroniques de bord sensibles des avions de ligne, ce qui justifie la nécessité de se préparer aux phénomènes extrêmes de météorologie de l'espace. (Space)



## Recommandations 2016 de la Commission internationale de protection contre les radiations (CIPR) 2016 pour le personnel navigant

Plus récemment, la Commission internationale de protection contre les radiations (CIPR) a émis des recommandations spécifiques pour le personnel navigant (CIPR, 2016)

- Aux altitudes de vol habituelles des avions de ligne, la dose de rayonnement se situe généralement entre 2 et 10 mSv h<sup>-1</sup>, en fonction principalement de la latitude, de l'altitude, et du niveau d'activité solaire (ICRU, 2010) .
- En outre, cette publication soutient que l'exposition du personnel navigant des avions au rayonnement cosmique constitue un risque professionnel, par conséquent, les employeurs ont un rôle à jouer dans la protection, même si les options sont limitées dans ce cas.
- **Pour les équipages d'avions** (recommandations pour le personnel navigant (CIPR, 2016)), la Commission recommande aux responsables de l'exploitation des compagnies :
  - i) d'informer individuellement le personnel navigant sur le rayonnement cosmique au moyen d'un programme de sensibilisation ;
  - ii) d'évaluer la dose de rayonnement reçue ;
  - iii) d'enregistrer la dose individuelle et cumulative reçue par le personnel navigant. Ces données devraient être mises à disposition et être conservées pendant une période raisonnable, à savoir, au moins une période comparable avec l'espérance de vie des personnes concernées ;
  - iv) modifier le tableau de service, le cas échéant, en tenant compte la dose de référence sélectionnée et après consultation avec le personnel navigant concerné.

- La Commission recommande aussi aux autorités nationales ou aux compagnies aériennes de diffuser

Ref: ICRP, 2016. Radiological Protection from Cosmic Radiation in Aviation. ICRP Publication 132. Ann. ICRP 45(1), 1–48.



## Stratégies d'atténuation de phénomènes de météorologie de l'espace :

- L'enjeu concret pour une atténuation efficace des phénomènes extrêmes de météorologie de l'espace est de prévoir, détecter de tels phénomènes à temps et fournir des renseignements pertinents sous le format approprié, aux bonnes personnes et au moment approprié.
- Pannes de satellite et applications basées sur le GNSS : Un système auxiliaire aux communications et à la navigation par satellites doit être disponible .
- En fonction de la phase et de la zone de vol et des équipements de l'aéronef, cet auxiliaire peut être un système de communications vocales HF/VHF/SATCOM, la navigation basée au sol, le guidage radar, la navigation par inertie, etc.
- Panne d'électricité : Les centres de contrôle de la circulation aérienne disposent d'une source d'énergie auxiliaire en cas de panne d'électricité afin d'assurer la sécurité de la navigation aérienne.
- Augmentation du niveau de rayonnement : Étant donné que le niveau de rayonnement augmente à des altitudes et des latitudes élevées, une solution possible consiste à diminuer l'altitude et la latitude de l'aéronef. Toutefois, la limite géographique et d'altitude reste à déterminer. Actuellement, les compagnies aériennes ne volent pas sur les routes polaires en temps de tempête solaire .
- Conformément au principe du "droit de connaître", aux termes duquel les individus ont le droit d'être informés sur les risques auxquels ils peuvent être exposés dans leur vie quotidienne, et compte tenu des valeurs éthiques qui sous-tendent l'autonomie, la justice, et la prudence, la Commission encourage les autorités nationales, les compagnies aériennes, les associations de consommateurs, et les agences de voyage à vulgariser les informations générales sur le rayonnement cosmique en aviation. Ces informations doivent être facilement accessibles et actualisées. Ils doivent aussi ainsi sur la protection radiologique aviation, les origines du rayonnement cosmique ; l'influence de l'altitude, de la latitude, et du cycle solaire ; et indiquer les doses habituelles associées à un ensemble de voies aériennes et le risque de recevoir une dose de rayonnement inattendu en cas de GLE rare, mais intense (CIPR, 2016).



## Références

1. CIPR, 2016
2. ICRU, 2010
3. <https://doi.org/10.1029/2018SW001946>, 2018)
4. FAA 2003
5. **10.1029/2020SW002593**
6. Avec l'aimable autorisation de 19hubbl01
7. <https://doi.org/10.1029/2018SW001932>
8. **Conker at al. (2003)**
9. Kintner et al., Inside GNSS, Aug. 2009
10. **Avec l'aimable autorisation de <https://www.gwu.edu>**
11. <https://doi.org/10.1051/swsc/2018029>



ICAO

UNITING AVIATION

NO COUNTRY LEFT BEHIND



<http://www.sansa.org.za>

<http://spaceweather.sansa.org.za>

<http://research.sansa.org.za>

**Je vous remercie**



ICAO

UNITING AVIATION

NO COUNTRY LEFT BEHIND



ICAO

North American  
Central American  
and Caribbean  
(NACC) Office  
Mexico City

South American  
(SAM) Office  
Lima

ICAO  
Headquarters  
Montréal

Western and  
Central African  
(WACAF) Office  
Dakar

European and  
North Atlantic  
(EUR/NAT) Office  
Paris

Middle East  
(MID) Office  
Cairo

Eastern and  
Southern African  
(ESAF) Office  
Nairobi

Asia and Pacific  
(APAC) Sub-office  
Beijing

Asia and Pacific  
(APAC) Office  
Bangkok



THANK YOU