

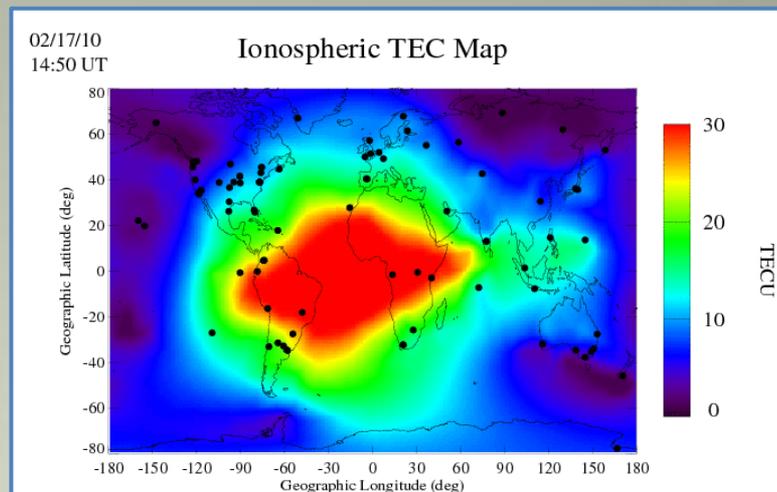
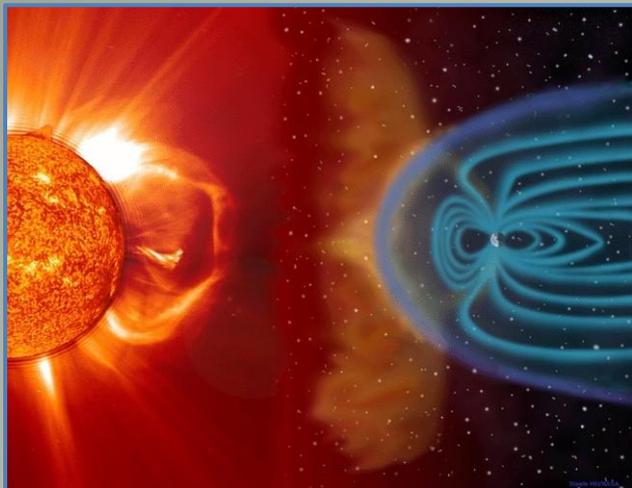
Développements récents de l'étude de l'ionosphère par les techniques radio

Christian HANUISE
LPC2E / CNRS / Université d'Orléans

grâce aux contributions de:

- E. TURUNEN et de l'association EISCAT
- M. LESTER et des groupes SuperDARN
- LOFAR

Pourquoi (encore) étudier l'ionosphère ?



- Accès à la magnétosphère et à ses interactions avec le vent solaire,
- Effet de la variabilité à court terme du Soleil sur l'environnement terrestre (géospace),
- Rôle dans le transfert d'énergie de et vers la basse atmosphère,
- Influence dans le système global Soleil – Terre,
- Influence sur les activités humaines (météorologie de l'espace),
- ...

Principales techniques radio actuelles



Radars à diffusion incohérente

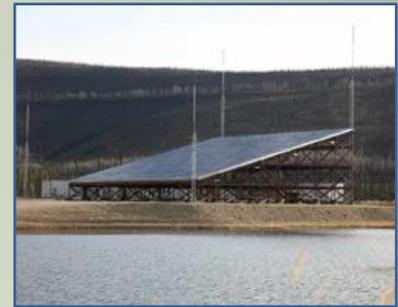
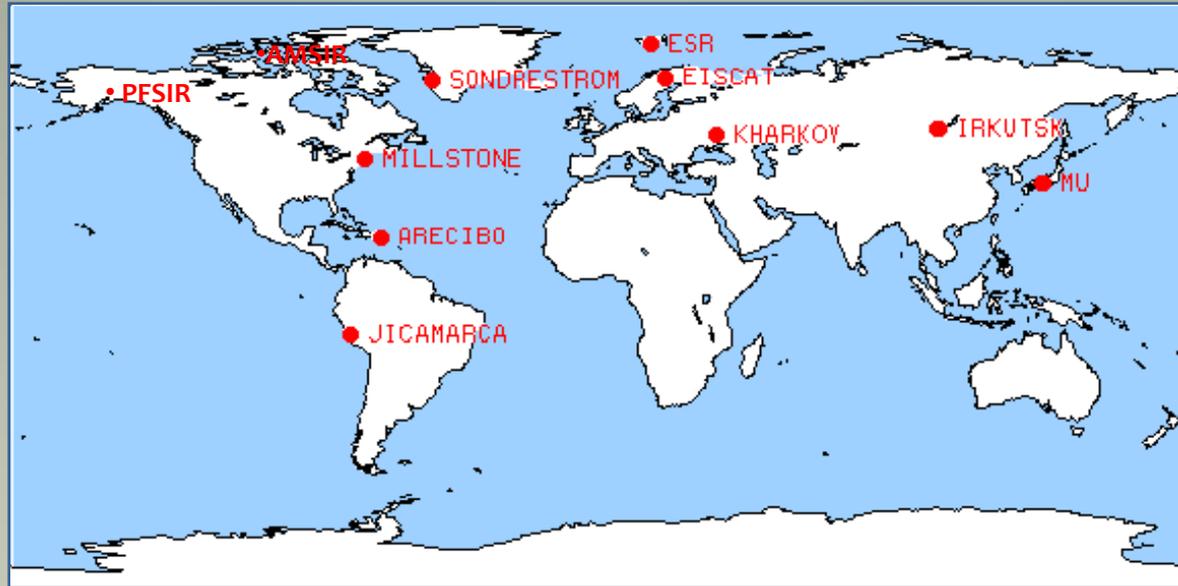
Radars cohérents



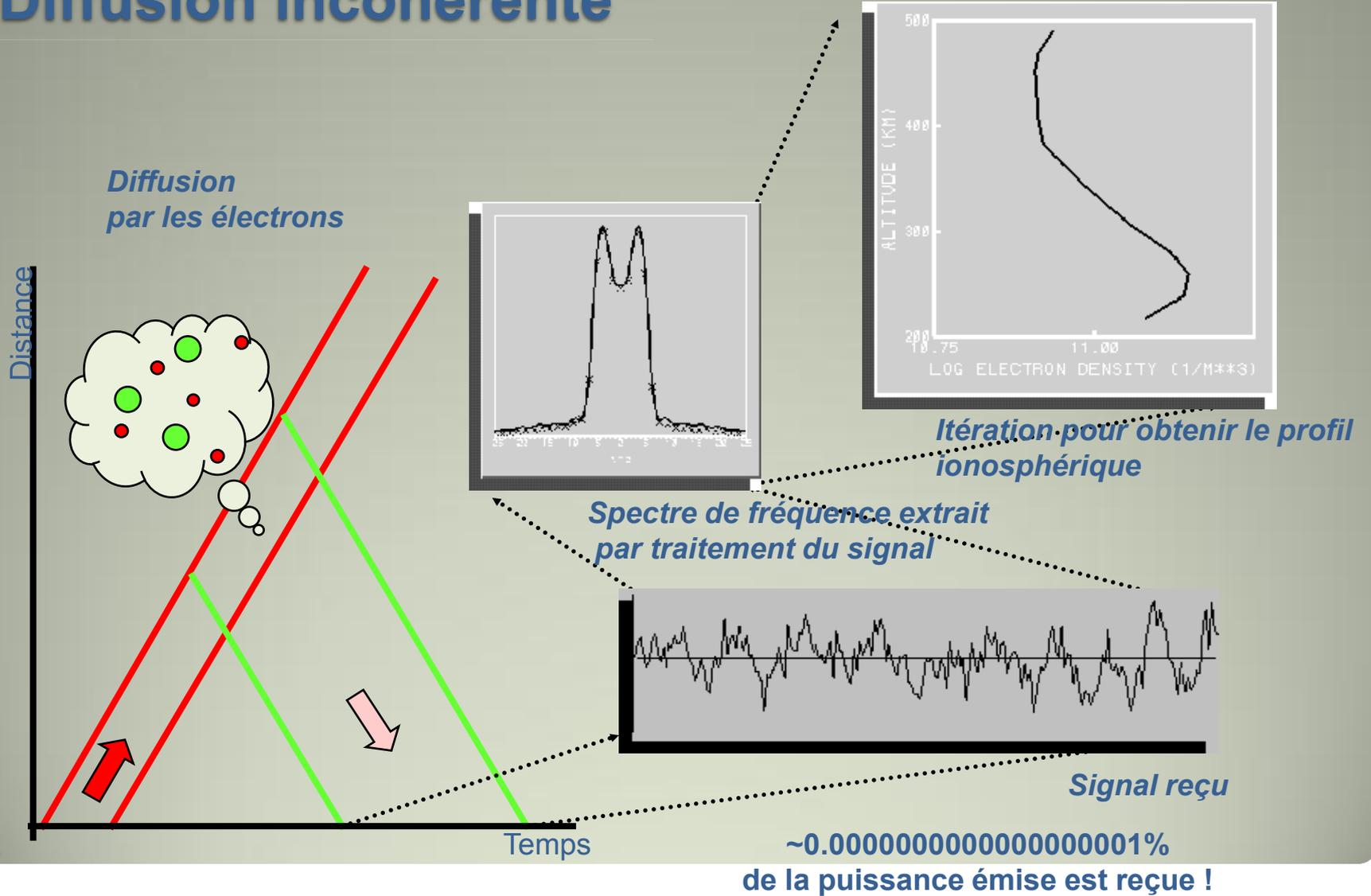
GPS



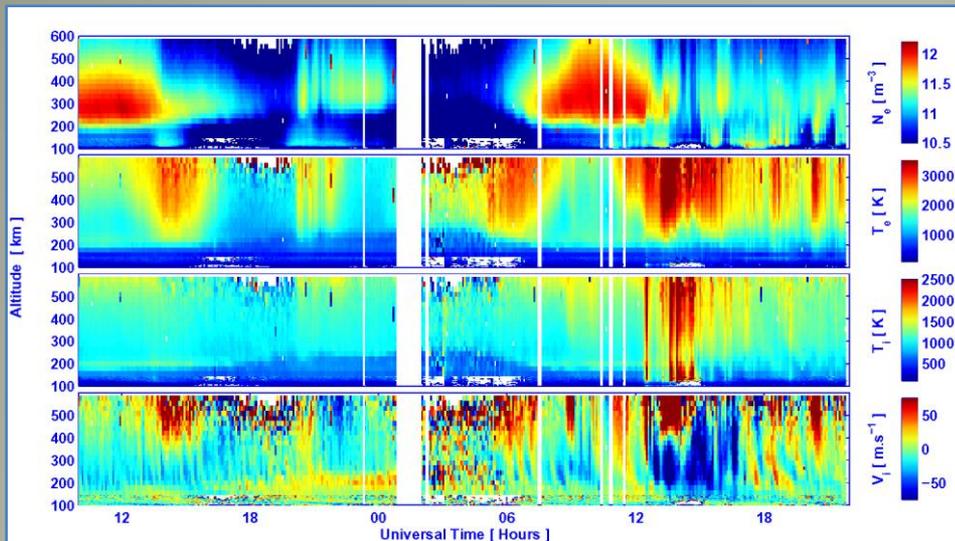
Radars à diffusion incohérente



Diffusion incohérente



Paramètres primaires

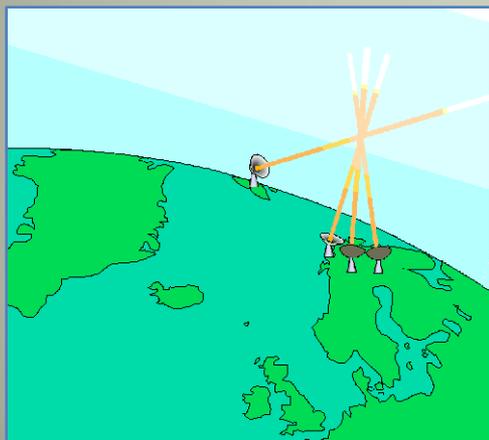


Densité électronique

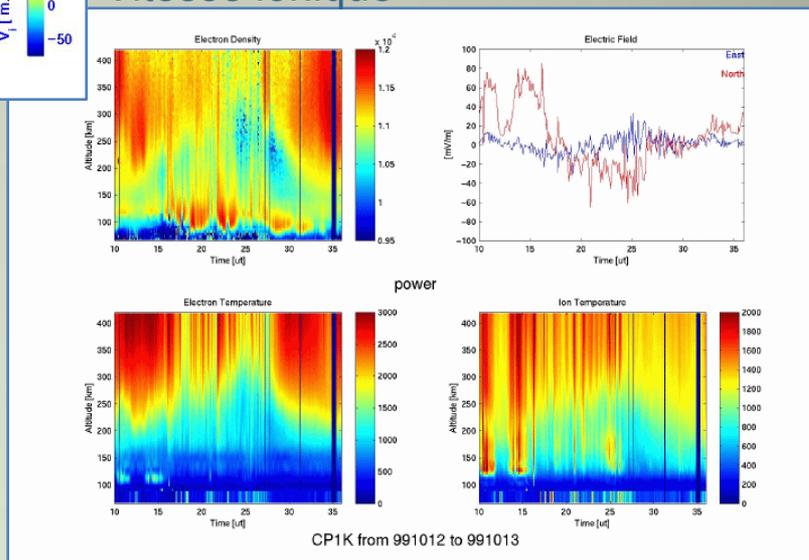
Température électronique

Température ionique

Vitesse ionique

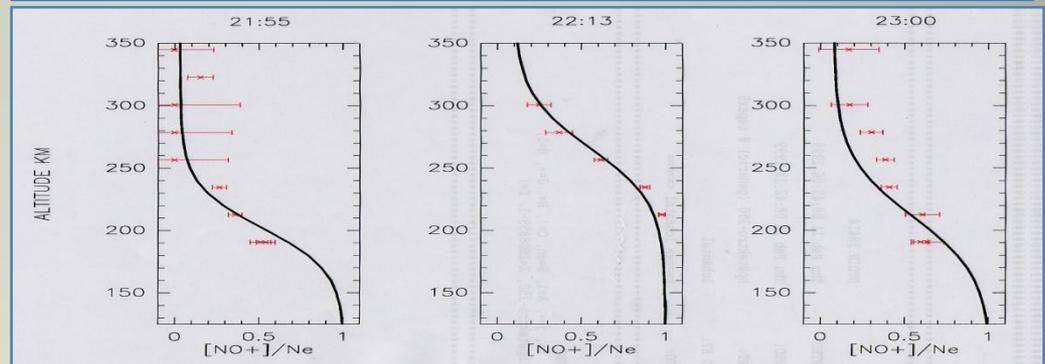
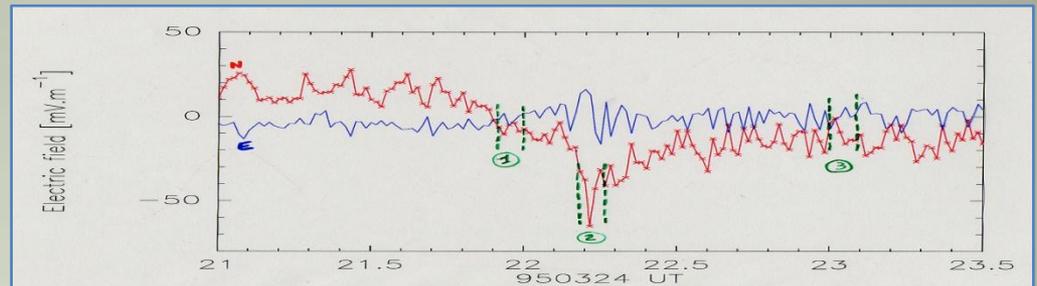
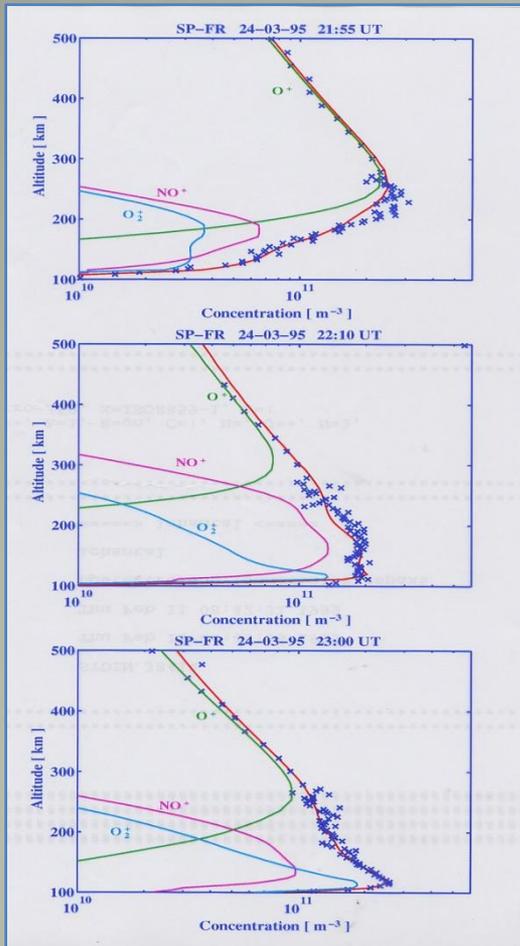


Champ électrique
3D



Composition de l'ionosphère

L'analyse non-Maxwellienne des données permet d'accéder à la composition de l'ionosphère



Développements

- Réseaux d'instruments
 - Imagerie 3D et séparation temps-espace
 - Modèles et assimilation de données
 - But final est la prévision
-
- Couplage mésosphère – stratosphère
 - Basses altitudes
 - Météores et débris spatiaux
 - Météorologie de l'espace
 - Liens avec le climat
 -
-
- Radars à synthèse d'ouverture



Couplage Thermosphère - Stratosphère

- stratospheric warming is recently seen to be connected with large temperature variations in thermosphere by the Millstone Hill radar.

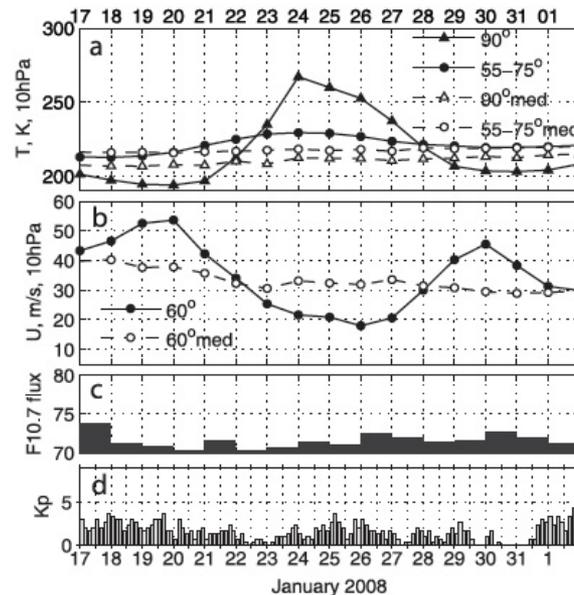


Figure 1. Stratospheric winter of January 2008 (solid lines) in comparison with 30-year mean January conditions (dashed lines). (a) NCEP zonally averaged stratospheric temperatures at 10hPa (~30 km) in different latitude bands. A SSW event occurred in late January 2008, with peak warming at 10hPa level on January 24–25, 2008. (b) Abatement in the zonal mean zonal flow at 60°N. The stratospheric warming occurred during (c) low solar flux and (d) quiet geomagnetic conditions.

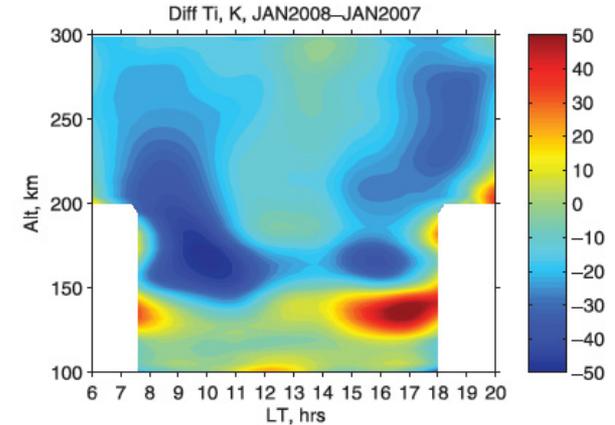
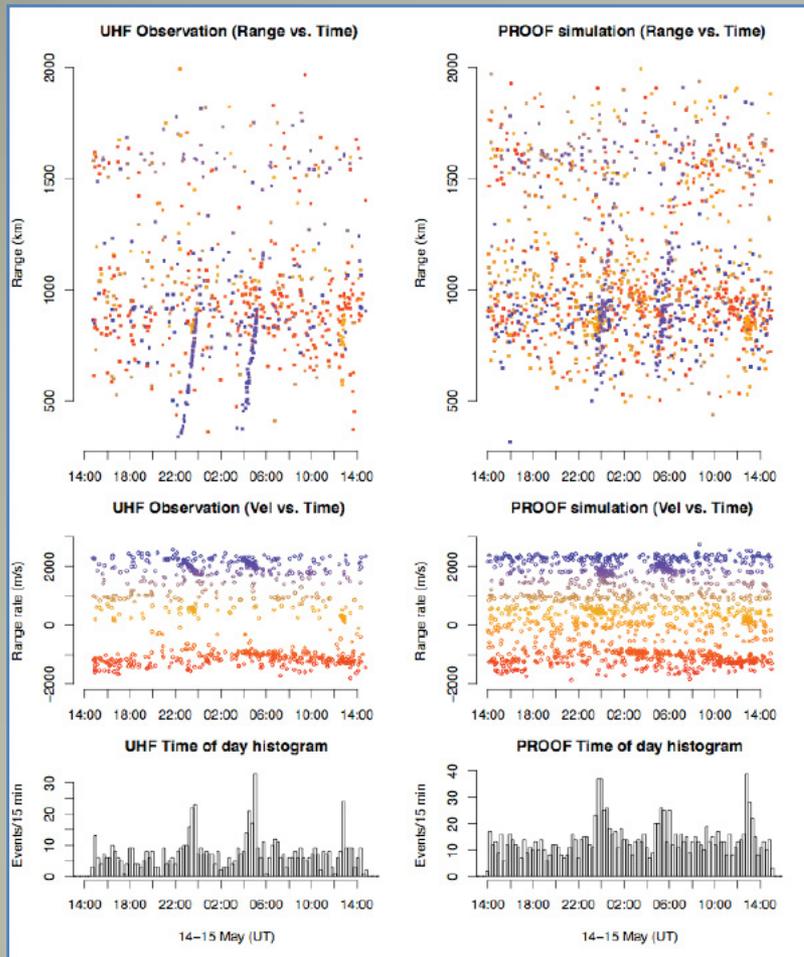


Figure 2. Difference field of ion temperature between mean January 2008 data and mean January 2007 data. A 20–50K decrease in temperature is observed above ~140 km in the morning hours (7–11LT) and afternoon hours (15–19LT). A narrow area of warming is observed in the lower thermosphere at ~120–140 km.

from: *Goncharenko et al., GRL, VOL. 35, L21103, doi:10.1029/2008GL035684, 2008, "Ionospheric signatures of sudden stratospheric warming: Ion temperature at middle latitude"*

Détection des débris satellitaires

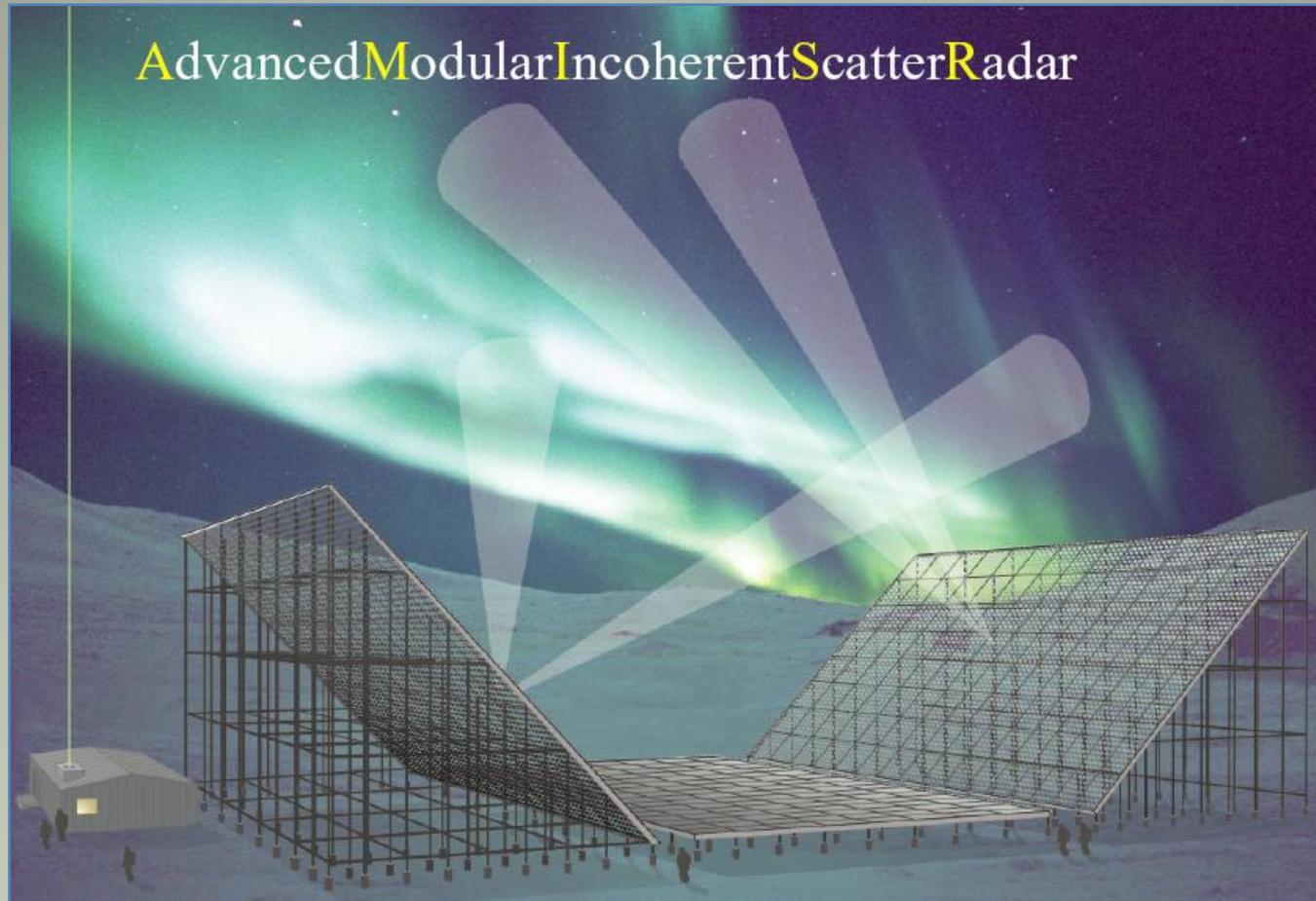


Space debris detected using the EISCAT UHF system on May 14-15th 2009, a few months after the Iridium-Cosmos satellite collision. The Iridium cloud orbital plane passes are visible at about 00:00 and 13:00 UT; and the Cosmos cloud pass at about 00:00 and 06:00 UT. The figure also compares the measurement with a statistical debris model called PROOF.

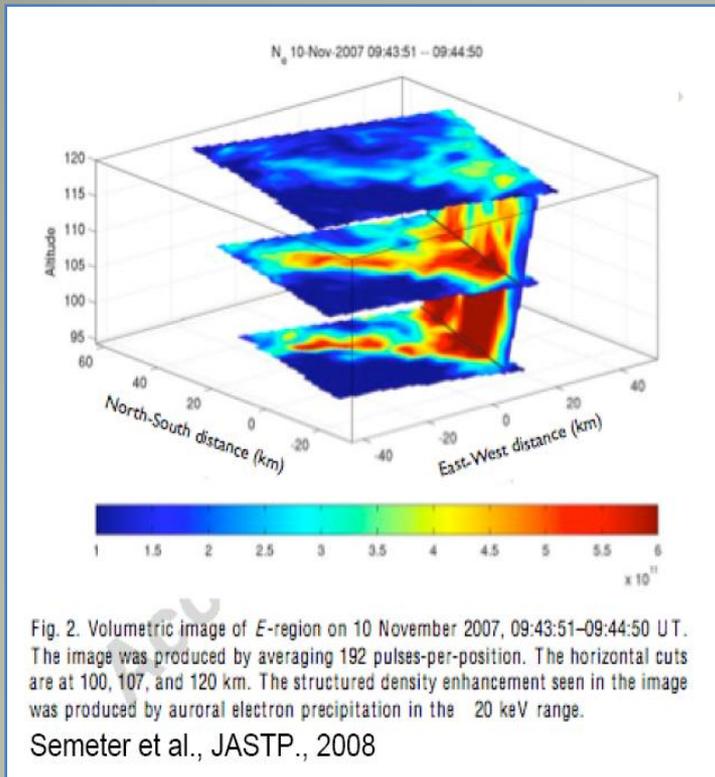
Differences show that the model could be improved by using the EISCAT measurements.

(from J. Vierinen et al., 2009)

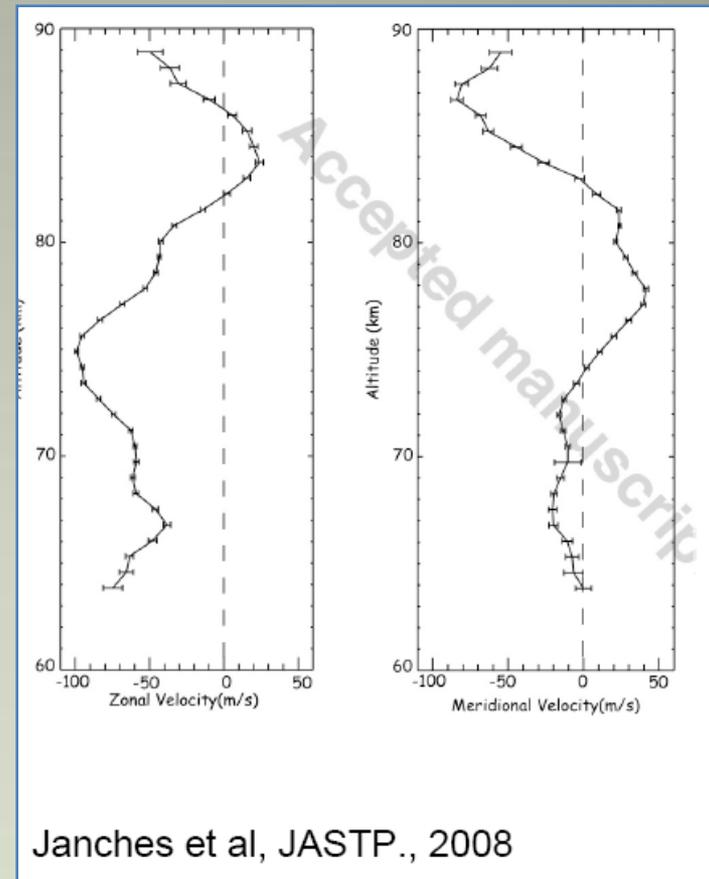
Poker Flat et Rankin Inlet



Poker Flat PFISR

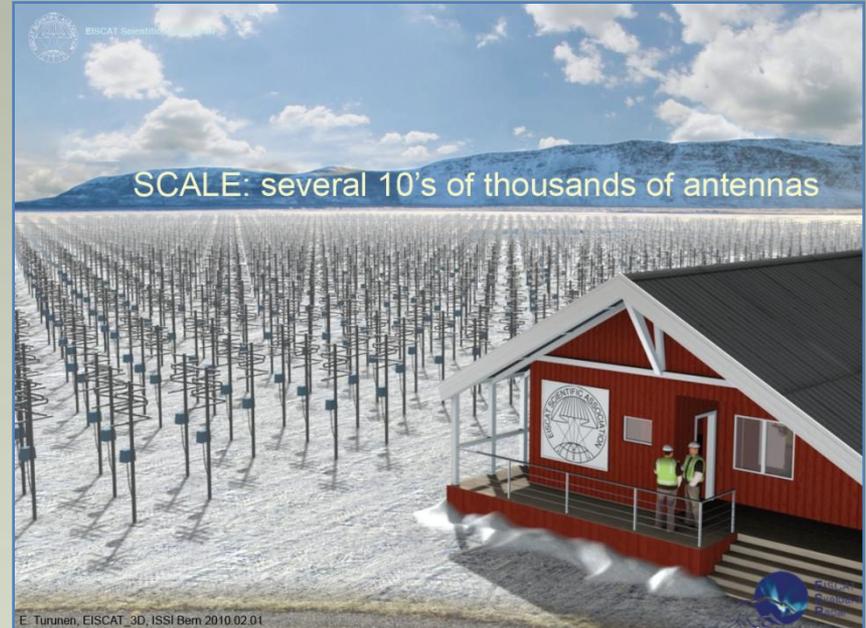
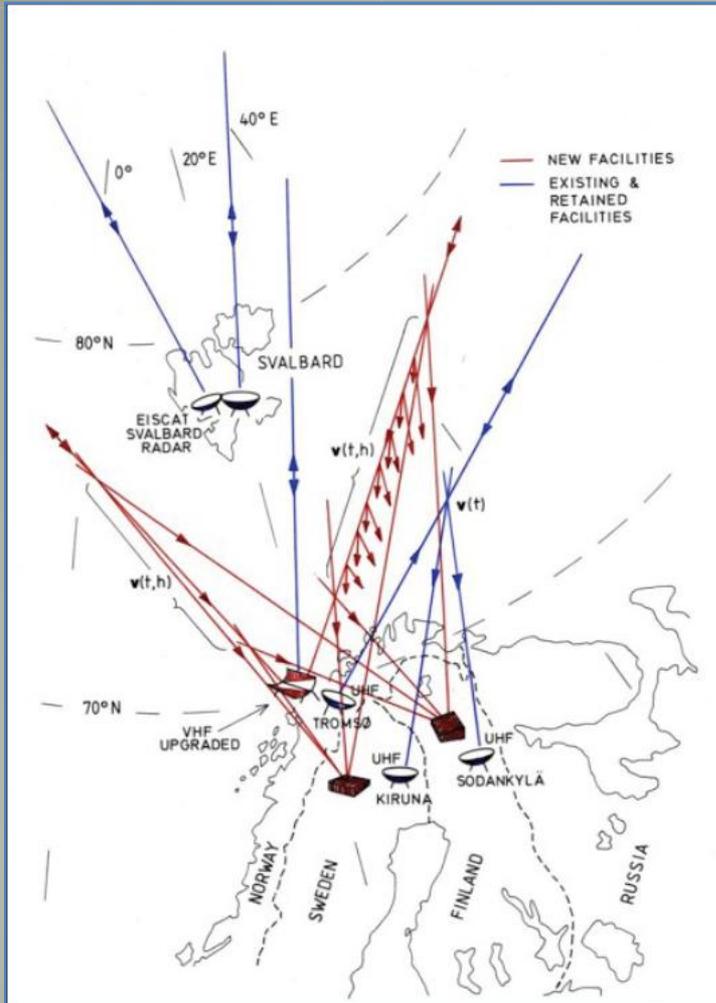


Données volumétriques



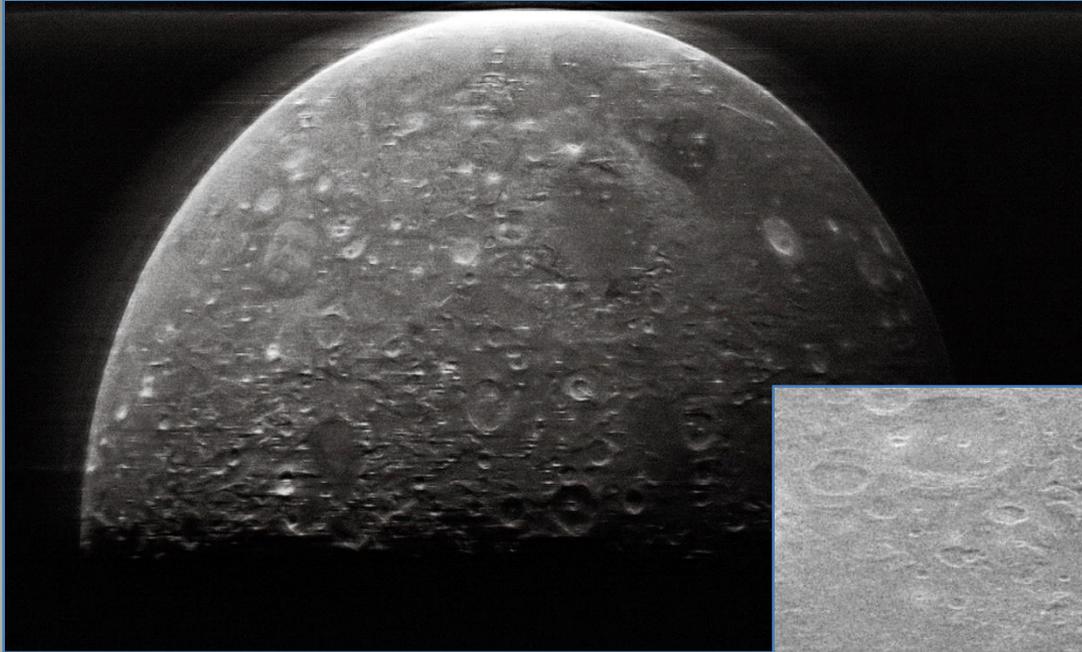
Région D

EISCAT 3D



Voir présentation de F. PITOUT

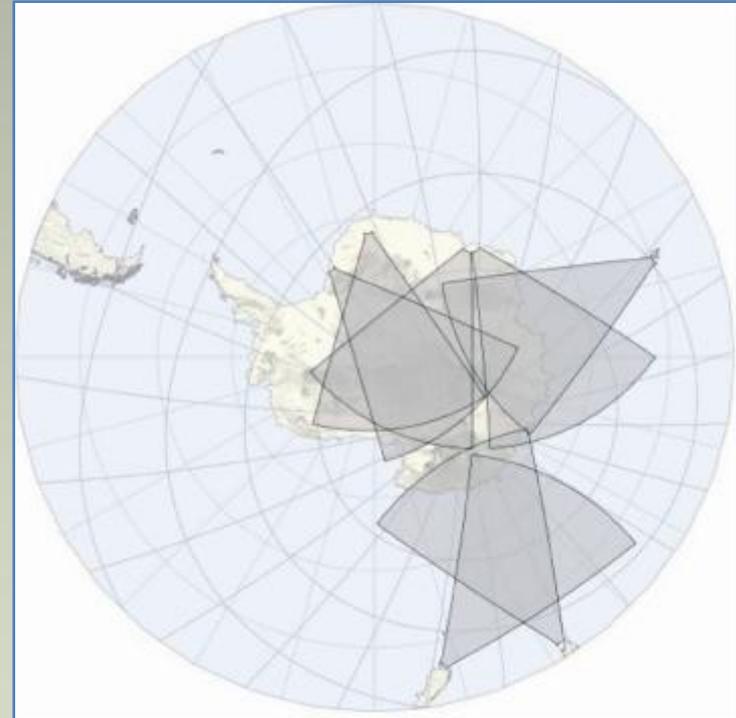
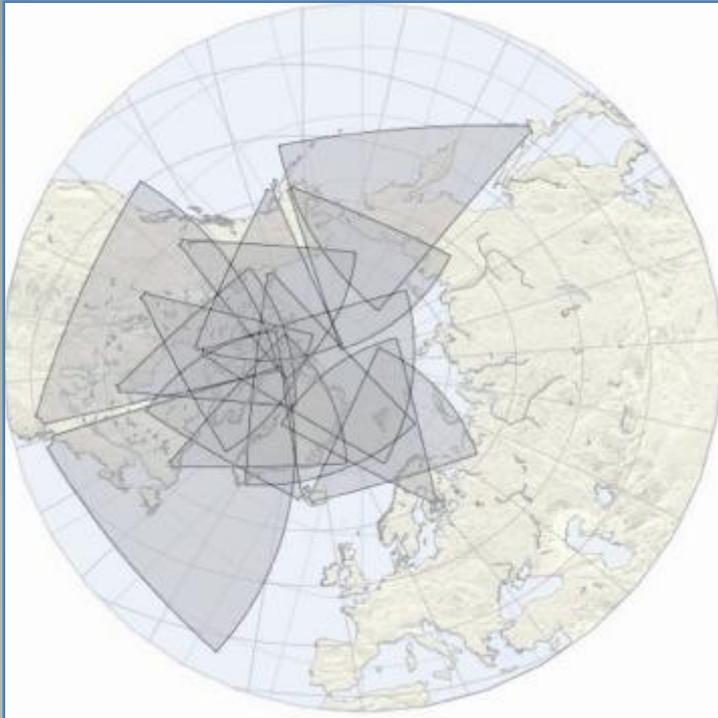
Image radar de la lune (EISCAT)



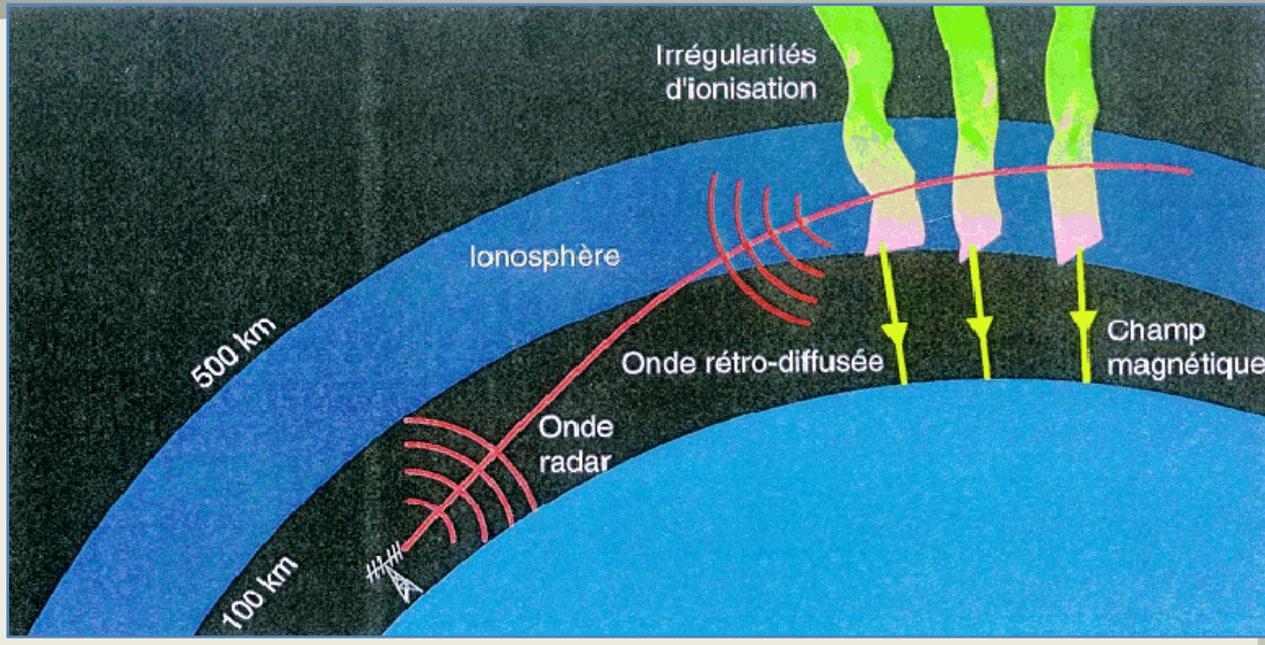
Résolution ~ 600 m



Radars cohérents: SuperDARN

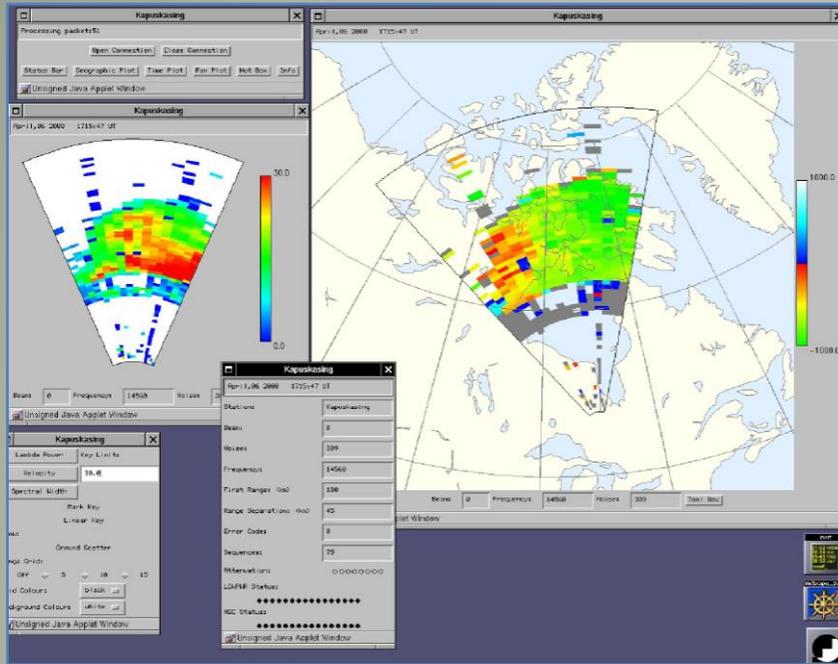


SuperDARN : Principe de mesure

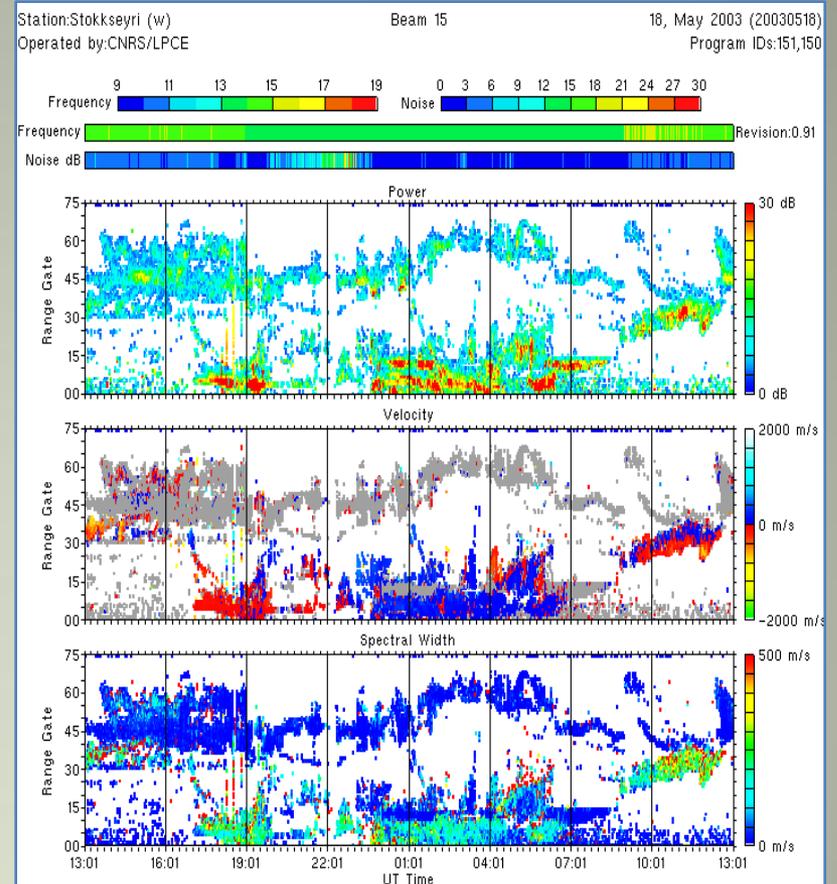


- Diffusion de Bragg sur les irrégularités d'ionisation alignées le long du champ magnétique
- Contraintes : Présence d'irrégularités – Conditions de propagation
- Paramètres mesurés : - Vitesse Doppler radiale (convection ionosphérique)
- Largeur spectrale (mécanismes d'instabilités de plasma et couplage ionosphère/magnétosphère).

SuperDARN: Paramètres primaires

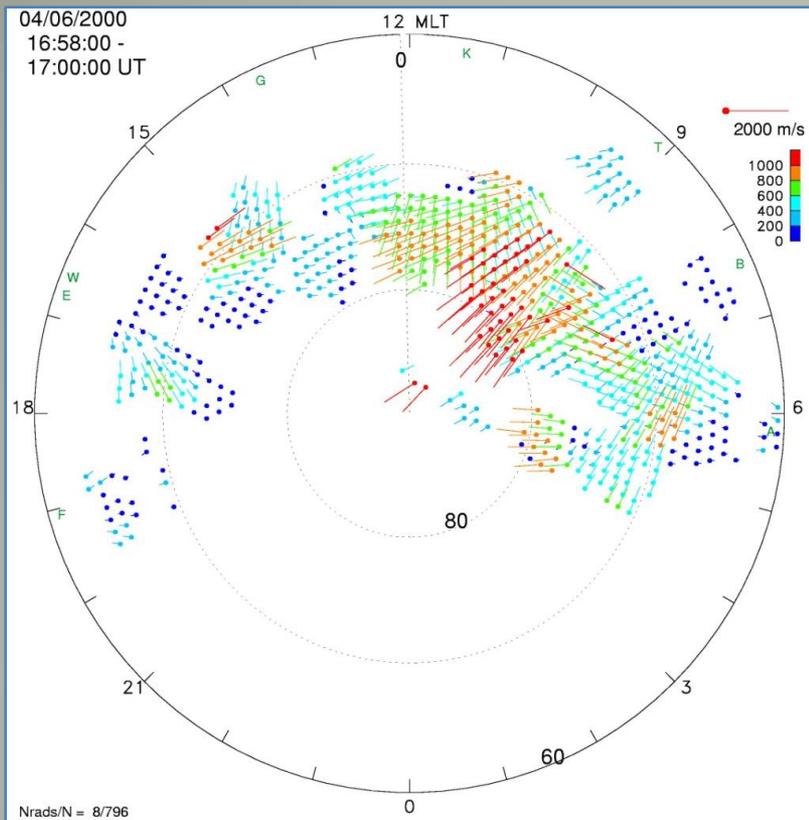


Kapuskasing, 6 avril 2000 1714-1716 UT

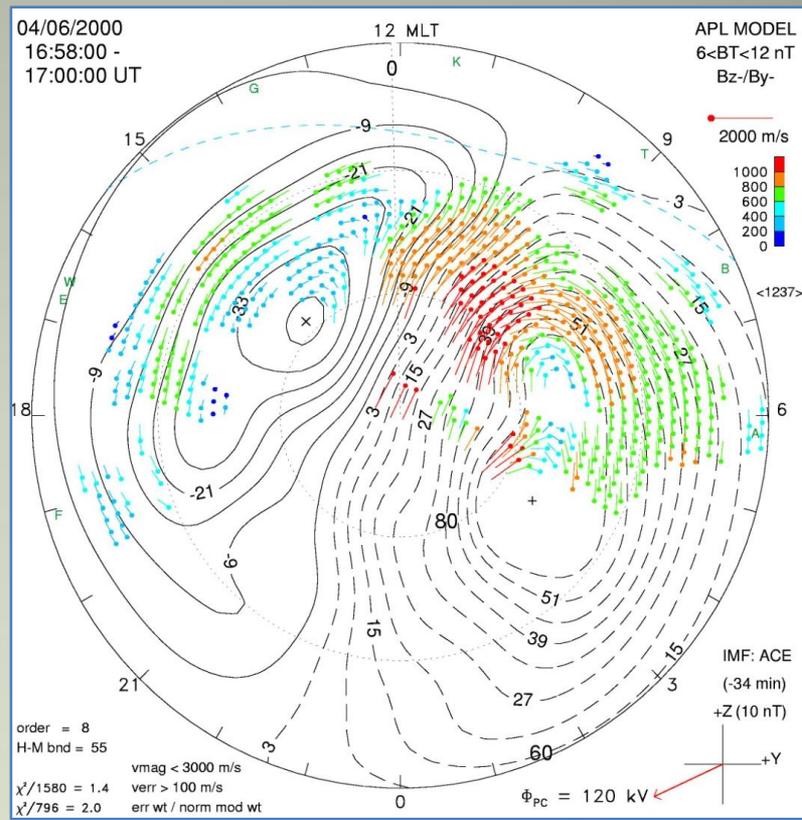


Cartographie de la convection globale

Vitesses radiales



Carte de convection



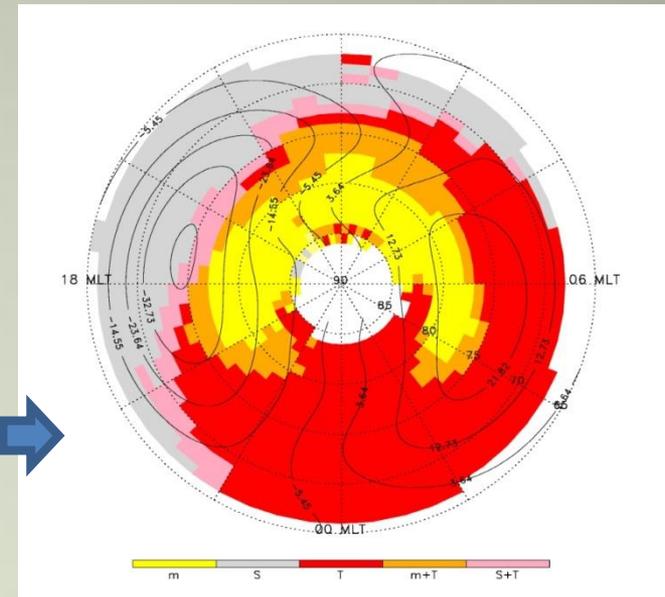
[Ruohoniemi and Baker, 1998; Shepherd and Ruohoniemi, 2000]

<http://superdarn.jhuapl.edu/rt/map>

Thématiques scientifiques

- Couplage vent solaire – magnétosphère,
- Couplage ionosphère – magnétosphère,
- Instabilités de plasma – naturelles et artificielles,
- Ondes ULF,
- Echos météoriques et vents mésosphériques
- Sous-orages magnétosphériques,
- Ondes de gravité atmosphériques,
- Echos mésosphériques polaires (PMSE),
- Orages magnétiques,
- Météorologie de l'espace,
- ...

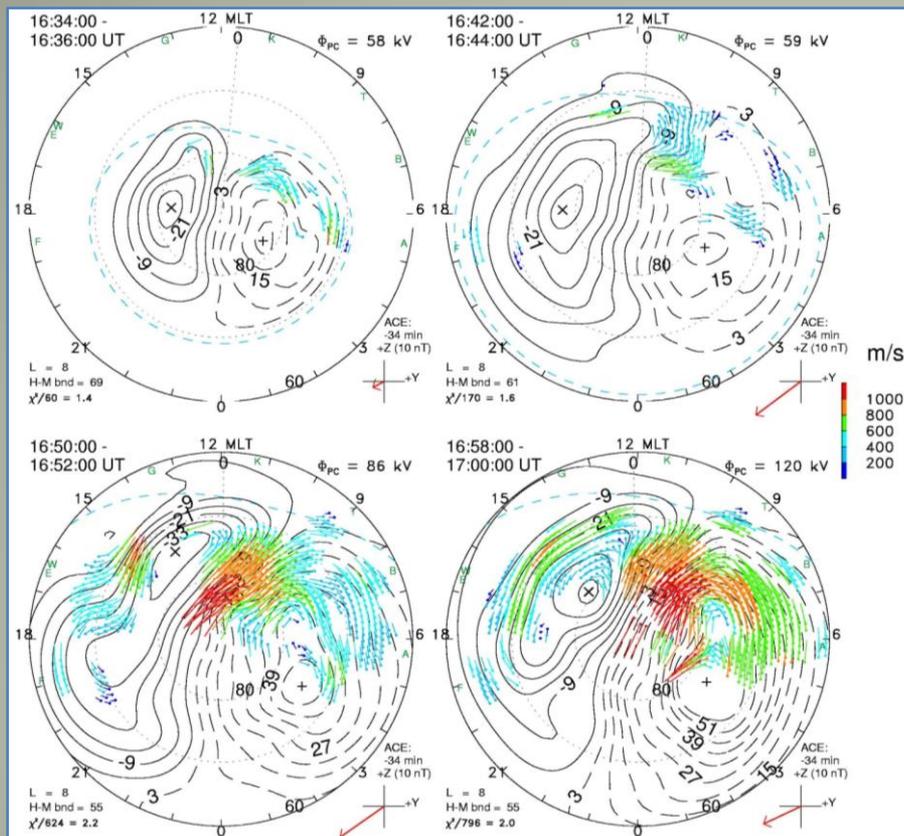
Caractérisation des frontières magnétosphériques



[André et al., 2002]

Réponse de l'ionosphère à une CME

06/04/2000

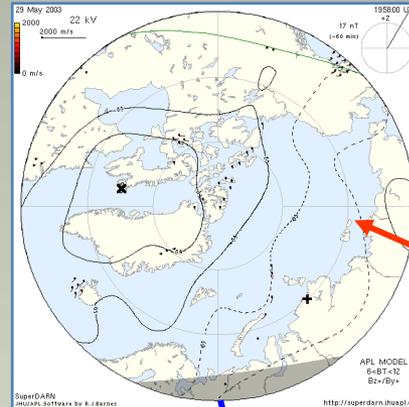
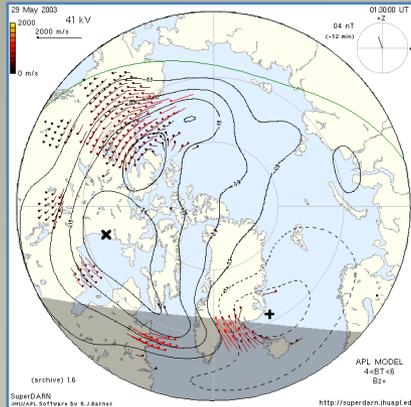


[Ruohoniemi et al., 2001]

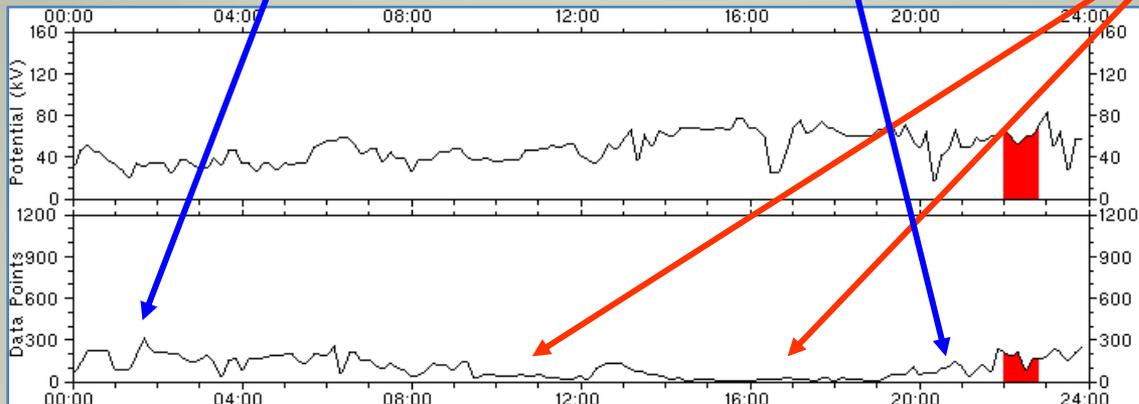
- Intensification de la convection
- Extension de la zone aurorale vers les basses latitudes

Cas d'un orage magnétique intense

28-29 Mai 2003

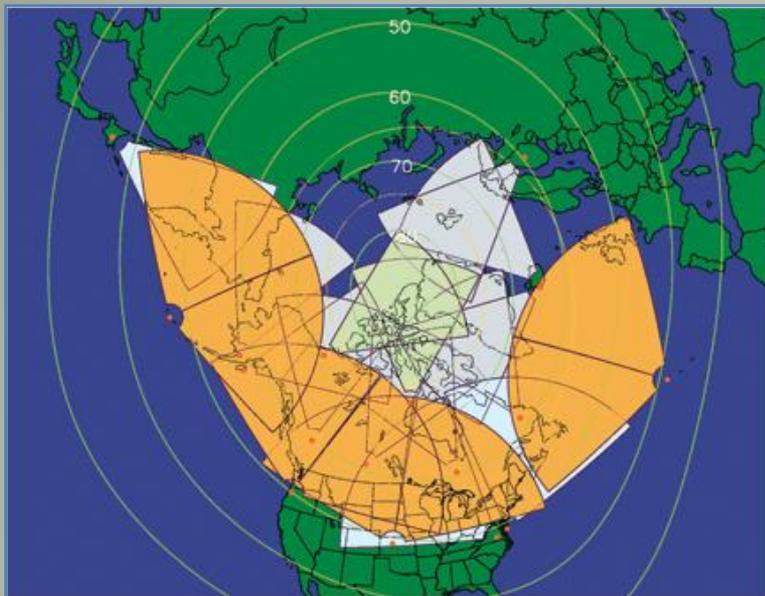


Blackout radio

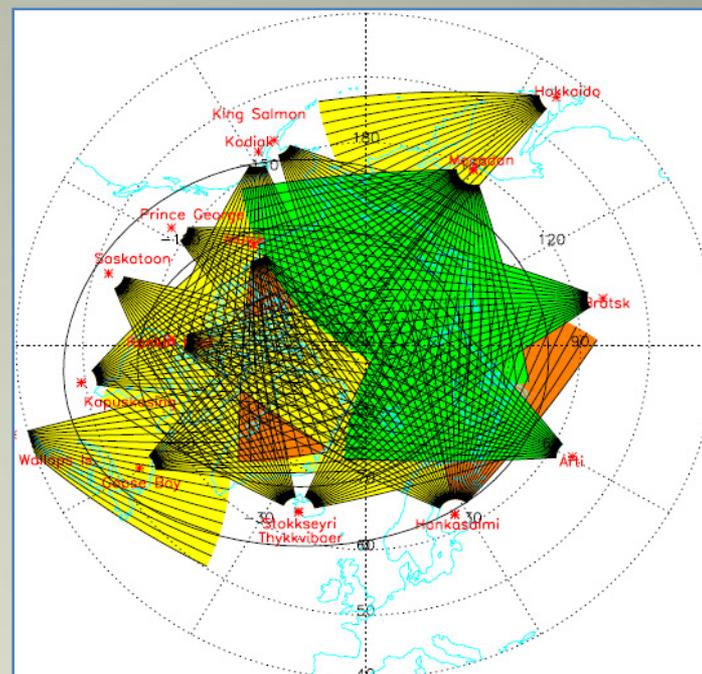


=> Nécessité d'étendre les champs de vue vers les moyennes latitudes

Extension de SuperDARN

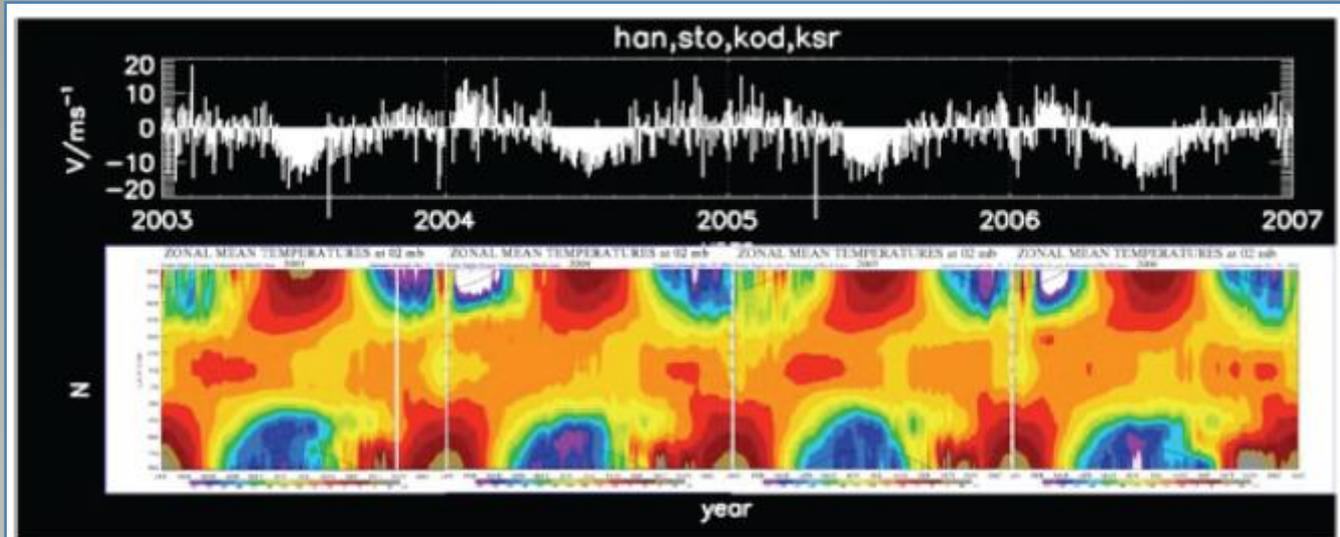


- Réseau en cours de construction (financement NSF)



- Extension prévue en Sibérie (ISTP Irkutsk)

Couplage Mésosphère - Stratosphère



Above: Meridional lower thermospheric winds by 4 SuperDARN radars and Stratospheric temperature at 2mb 2004-2007.

Unpublished data, shown with permission of the author Rob Hibbins, BAS.

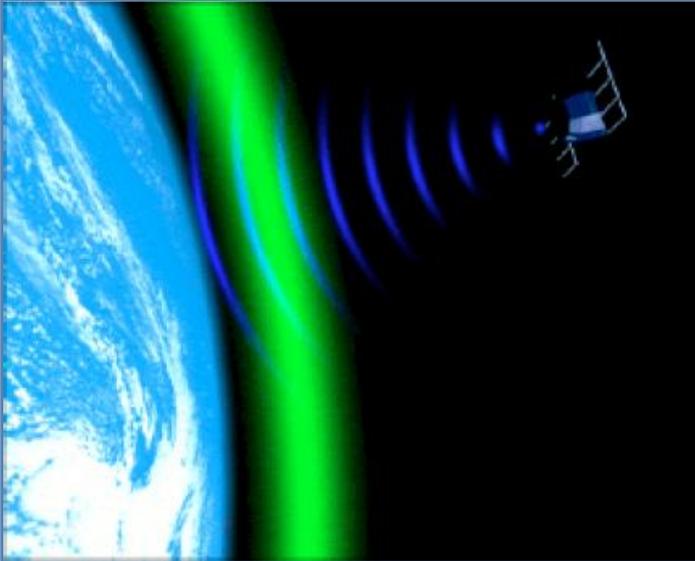
GPS et Ionosphère

- Observations ionosphériques:
 - Mesure du contenu électronique total
 - Calcul du profil 3D de densité électronique
- Effet de l'ionosphère sur le système et ses applications



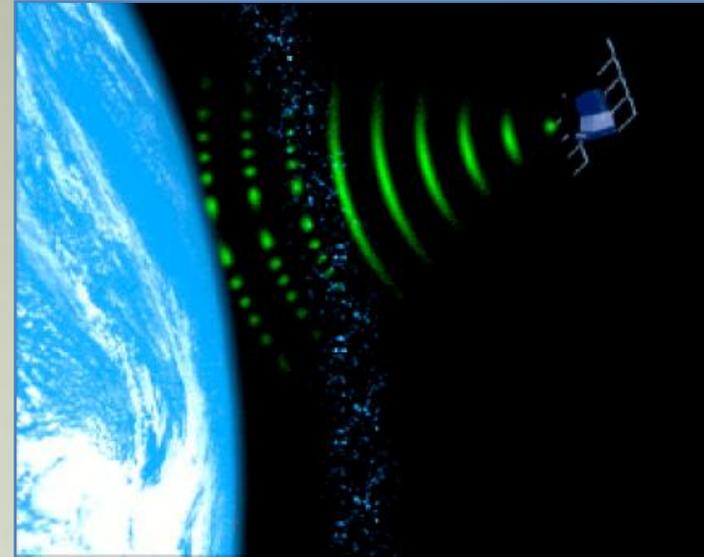
Effet de l'ionosphère sur le GPS

Délai



Perturbation de la vitesse de propagation du signal, proportionnelle au TEC. Erreur de quelques dizaines de mètres au maximum solaire.

Scintillation



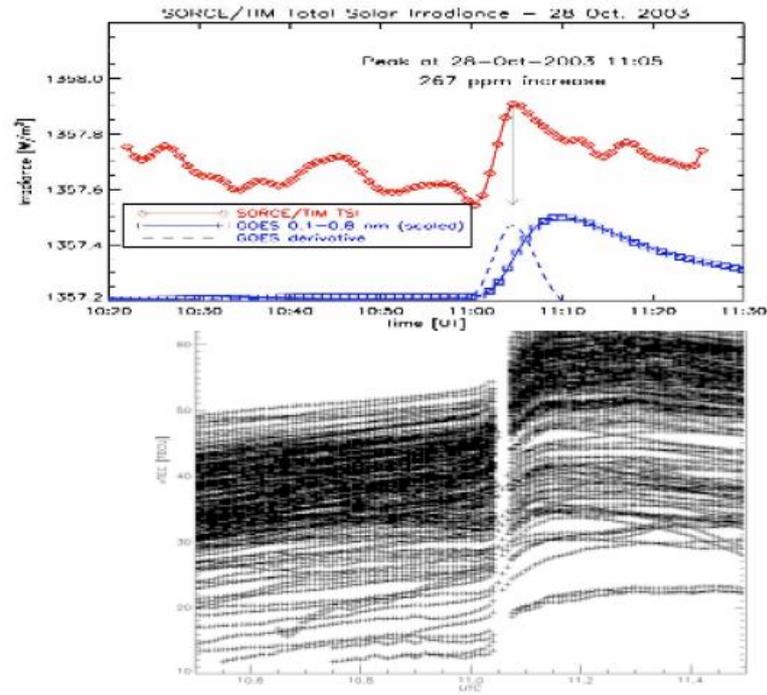
Variations rapide de la phase et de l'amplitude du signal, surtout dans les régions équatoriales et aurorales et pendant les orages.

Exemple de perturbation du signal GPS



Solar flare effect in TEC on 28 October 2003

- Strong solar flare on 28 October 2003 at 11:05 UT
- Total irradiance of the sun enhanced within a few minutes by 267 ppm
- TEC data processing indicates loss of data at numerous GPS links
- The number of usable GPS links for TEC processing was reduced rapidly from more than 30 to only 7



COST 296 Scintillation Workshop, Nottingham, UK, 20-22 February 2008

By: N. Jakowski et al. 4

Mesure du contenu électronique total

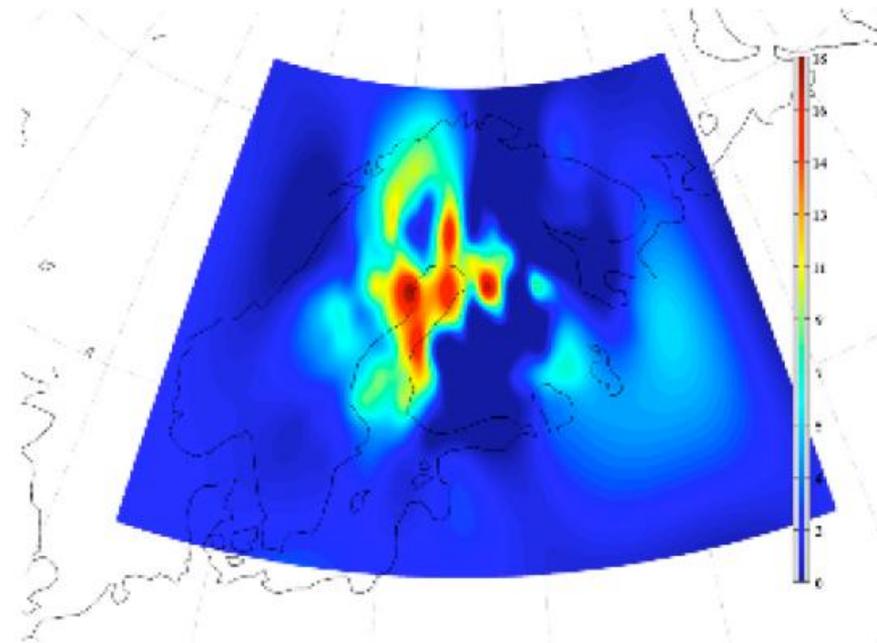
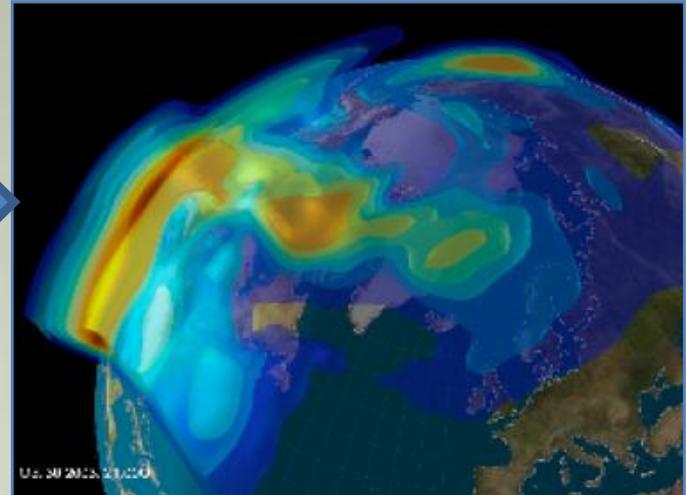
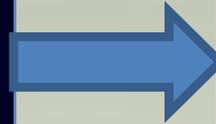
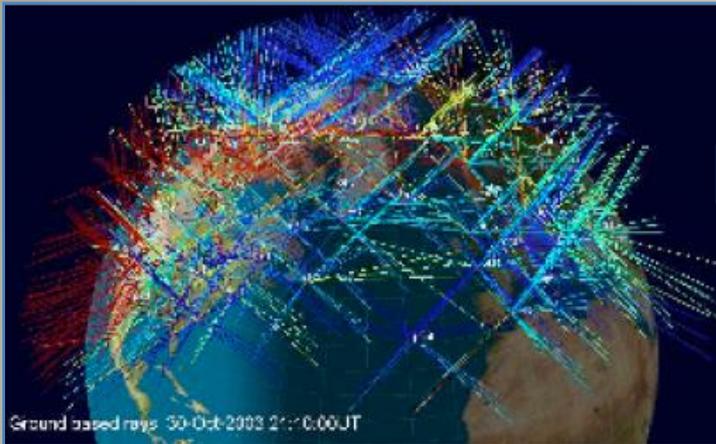


Fig. 1. High resolution TEC map on 15 December 2007 at 02:00 retrieved with the MIDAS algorithm (Luntama et al., 2007). The GPS observations used in the retrieval are from the 86 station GNSS network in Finland operated by Geotrim Ltd. The color bar shows the TEC values in TECU (1 TECU $\equiv 10^{16}$ electrons/m²).

Profil 3D de densité électronique



[Allain et al., 2008]

Une nouvelle utilisation de LOFAR ?



- Réseau interférométrique distribué,
- 36 stations aux Pays-Bas et plusieurs stations en Europe
- Espacement -> 1500 km
- 10-80 MHz et 110-240 MHz
- Faisceaux multiples (-> 32)

- Dans le cadre de la calibration, il est nécessaire de corriger les effets de l'ionosphère,
- Le retard dû à l'ionosphère dépend de la station et est variable en fonction du temps et de la position dans le champ de vue,
- Auto-calibration généralisée dont les résidus donnent une information sur l'ionosphère et ses variations spatio-temporelles sur tout le champ de vue.

=> Création d'un LOFAR KSP sur l'étude de l'ionosphère.