

# Perspectives en modélisation de l'ionosphère

***Aurélie Marchaudon, Pierre-Louis Blelly, Maxime Grandin (\*),  
Mikel Indurain, Baptiste Chide***

***IRAP, CNRS et UPS***

***(\* ) aussi à Sodankylä Geophysical Observatory, Finlande***

# Plan

## *Introduction*

*Quelques moyens disponibles à l'IRAP*

*Moyens à adapter / développer*

*Perspectives à court et moyen terme*

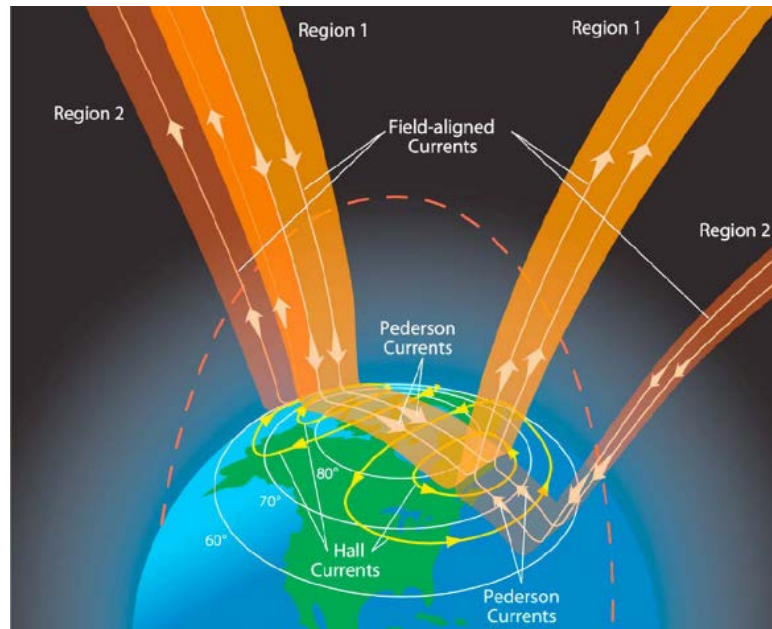
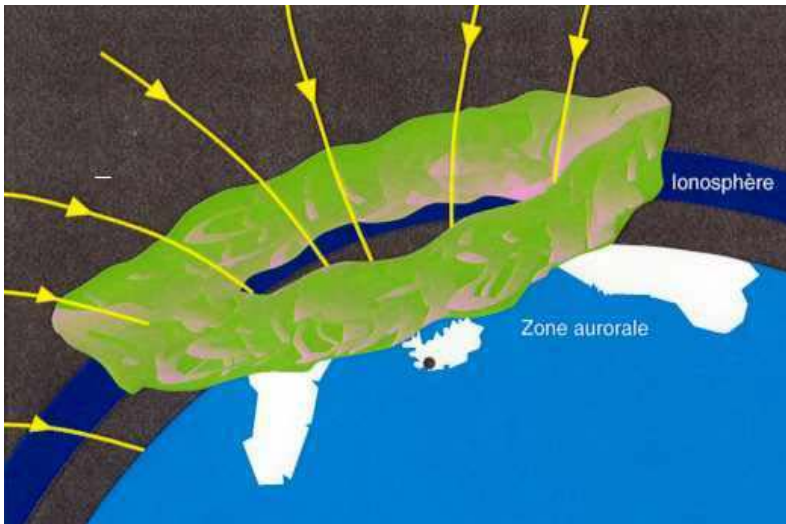
# Rôle fondamental de l'ionosphère en Météorologie de l'Espace

→ **Lieu de convergence** des mécanismes d'interaction entre le soleil et l'environnement terrestre

- Fermeture des systèmes de courants magnétosphériques
- Dissipation de l'énergie (chauffage Joule, précipitation)
- Contre-réaction de l'ionosphère
- Grande variabilité spatio-temporelle

→ **Effets critiques sur les activités humaines**

- Propriétés dispersives sur les ondes électromagnétiques (perturbation et/ou blackout des communications radios)
- Production de patches et de bulles (scintillations des signaux GNSS)
- Courants induits dans la croûte terrestre (induisant des pannes du réseau électrique)



# Différents enjeux dans la caractérisation du milieu ionosphérique

## 1. Modèles scientifiques

→ comprendre l'ionosphère, en particulier *lors des événements solaires extrêmes* :

- le couplage magnétosphère-ionosphère à travers l'électrodynamique des régions de haute et basse latitudes
- les échanges interhémisphériques pour sonder la magnétosphère interne
- la physico-chimie du milieu

*Moyens disponibles à l'IRAP*

- Modèle d'ionosphère **IRAP Plasmaphere-Ionosphere Model (IPIM)**  
toutes latitudes et  $90 \text{ km} < z < 22\,000 \text{ km}$  (plasma-pause)
- Modèle photochimique **IONOS**  
toutes latitudes et  $60 < z < 90 \text{ km}$

*Moyens à adapter / développer*

- Modèles électrodynamiques hautes latitudes (adaptation du modèle IMM) et équatorial (à développer) → modèle unique
- Modèle cinétique prenant en compte le miroir magnétique et le champ de polarisation

# Différents enjeux dans la caractérisation du milieu ionosphérique

## 2. Modèles applicatifs

→ modèles réalistes mais simplifiés

→ à vocation opérationnelle et temps-réel

- via l'assimilation de données disponibles (GNSS, SuperDARN, ionosondes, radars incohérents, satellites ...)
- via la modélisation directe (ex: ondes gamme HF et VHF) pour reproduire les observations

### *Moyens disponibles à l'IRAP*

- Reconstruction atmosphère neutre et ionosphère martiennes via la radio-occultation
- Reconstruction atmosphère neutre par correction des profils ionosphériques de radars incohérents

### *Moyens à développer*

- Modèle d'assimilation électrodynamique avec IMM (SuperDARN, AMPERE, OVATION)
- Tomographie (GNSS, SuperDARN) par modélisation directe des ondes
- Modèle statique et global d'ionosphère

# Plan

*Introduction*

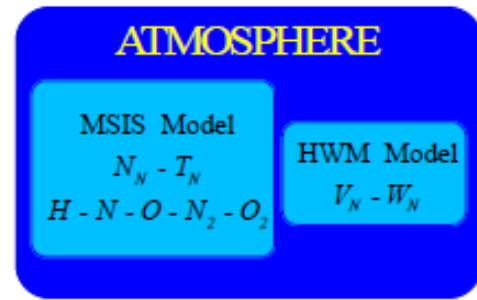
*Quelques moyens disponibles à l'IRAP*

*Moyens à adapter / développer*

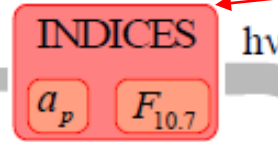
*Perspectives à court et moyen terme*

# Synopsis du modèle couplé IPIM

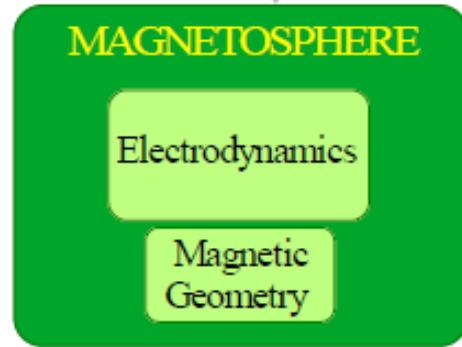
Entrées d'atmosphère



Proxys pour l'activité solaire et magnétique



Transport des espèces thermiques

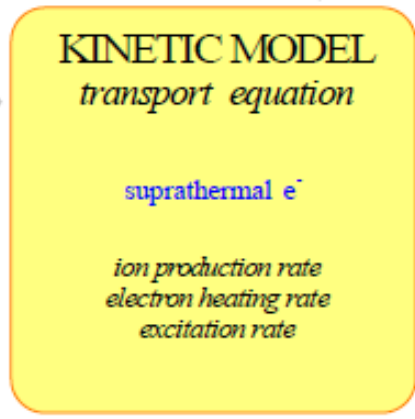
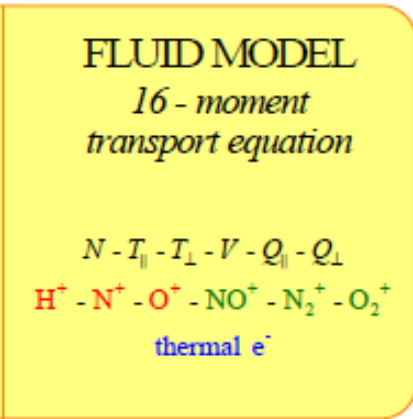
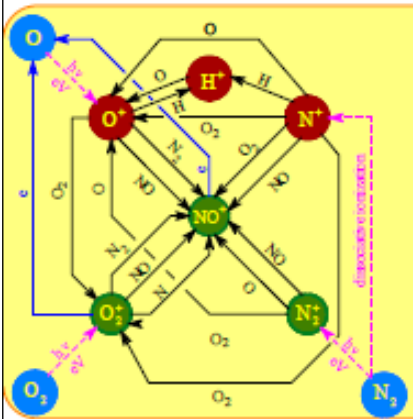


Entrées électrodynamiques à développer (hautes latitudes et équateur)

Module chimique

$\bar{E}_\perp, \bar{J}_\parallel$   
 $\bar{B}$

$\bar{F}, \bar{E}$   
 $\bar{B}$

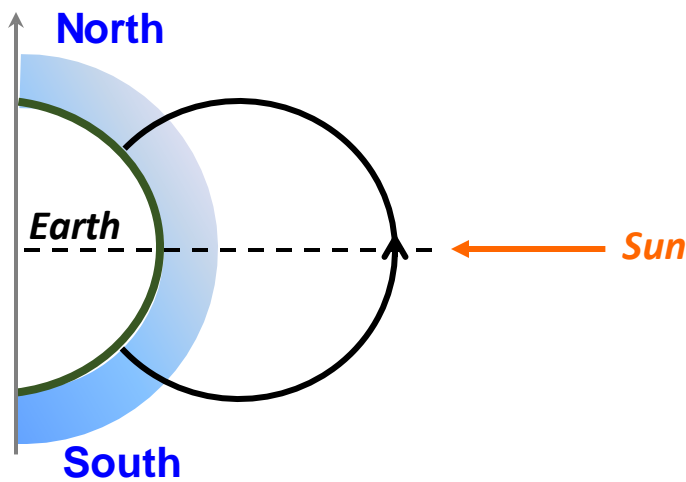


Transport des électrons de haute énergie

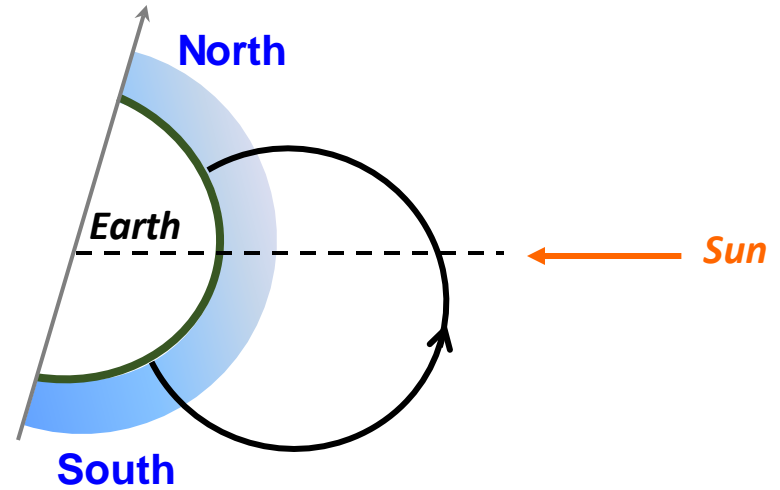
$T_e, N_e$

$P_i, \Theta_e$

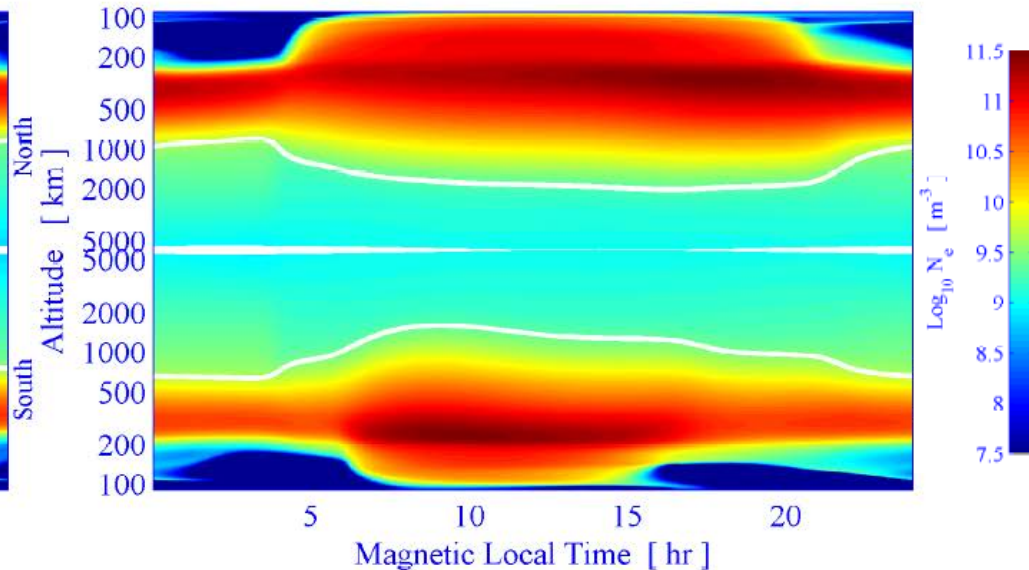
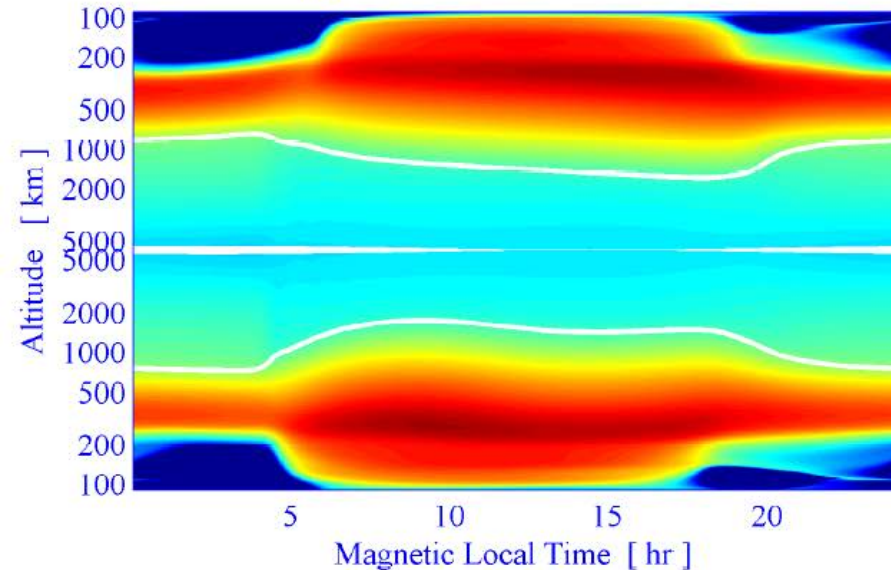
# Exemple de résultats d'IPIM : densité électronique le long d'un tube à $L_{\max}=2$ fn du MLT pour équinoxe et solstice



$L_{\max} = 02.00$  for equinox conditions



$L_{\max} = 02.00$  for solstice conditions

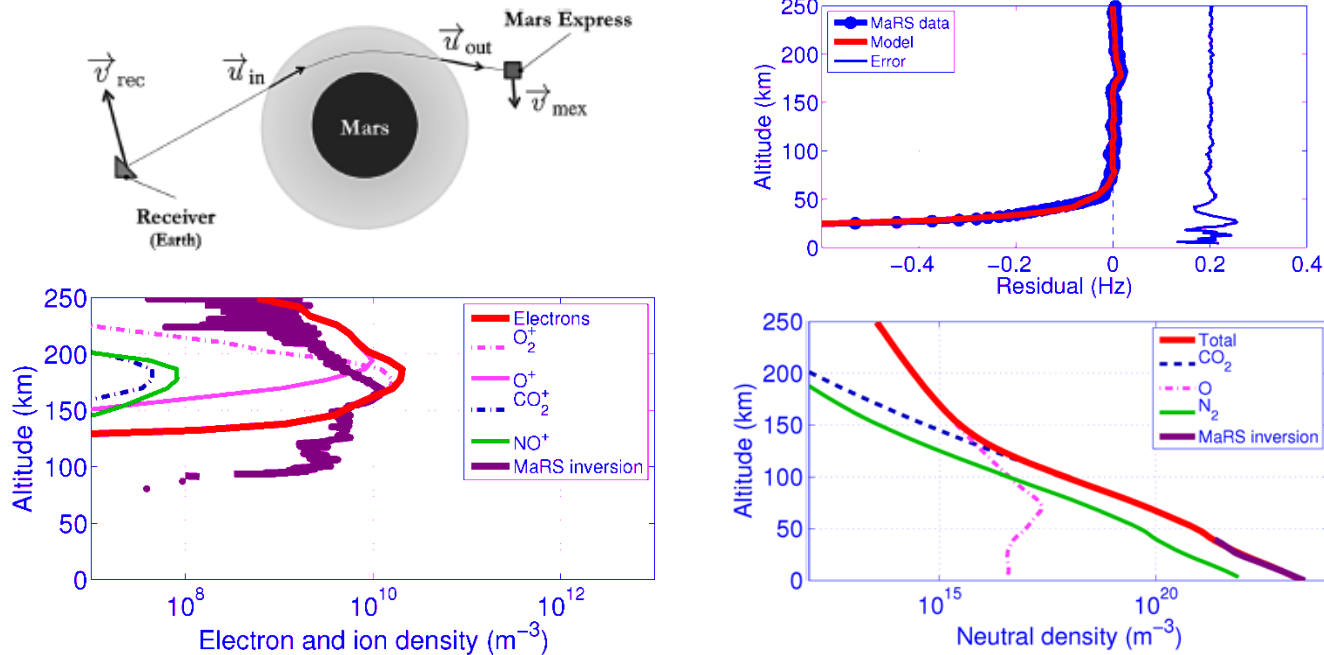




# Radio-occultation : apport de la modélisation

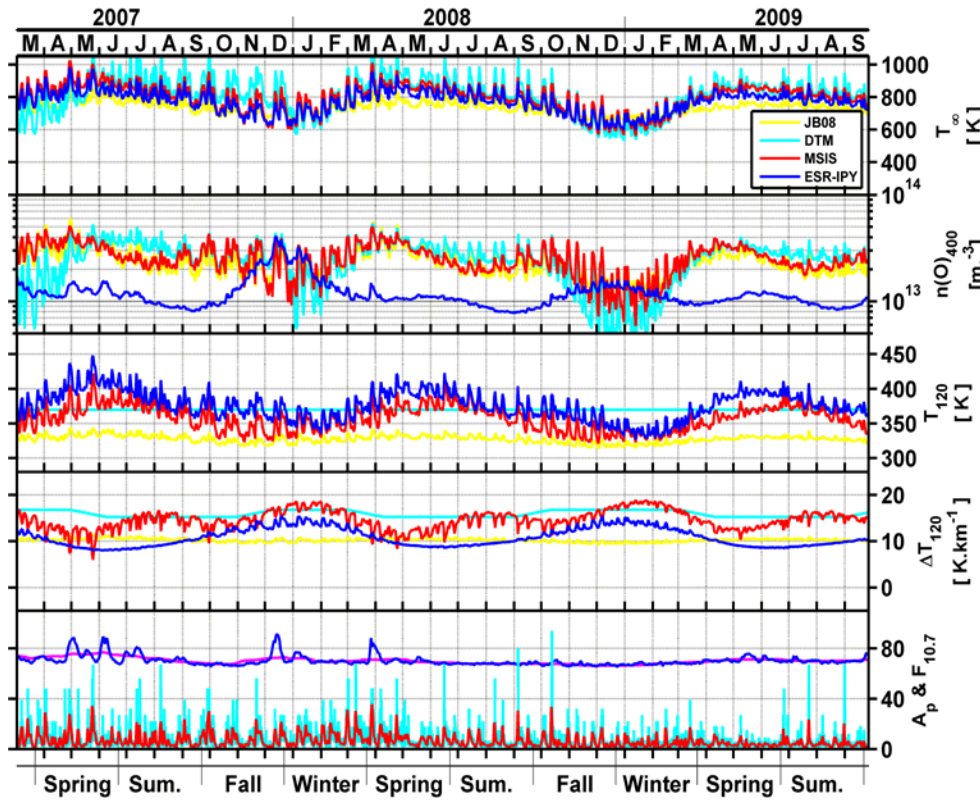
- **Méthode innovante pour analyser les atmosphères planétaires**
  - Simulation directe vs. résolution d'un problème inverse
    - Traitement de la donnée primaire : doppler résiduel vs. réfractivité
    - Levée des contraintes (symétrie sphérique, profil de Chapman)
- Inclusion d'un modèle numérique permettant une analyse « full profile » atmosphère + ionosphère

→ « *Composition* » de l'environnement : Neutres et Ions



# Correction des profils ionosphériques de radars incohérents

I.P.Y. EISCAT Svalbard Radar March 2007 to September 2009

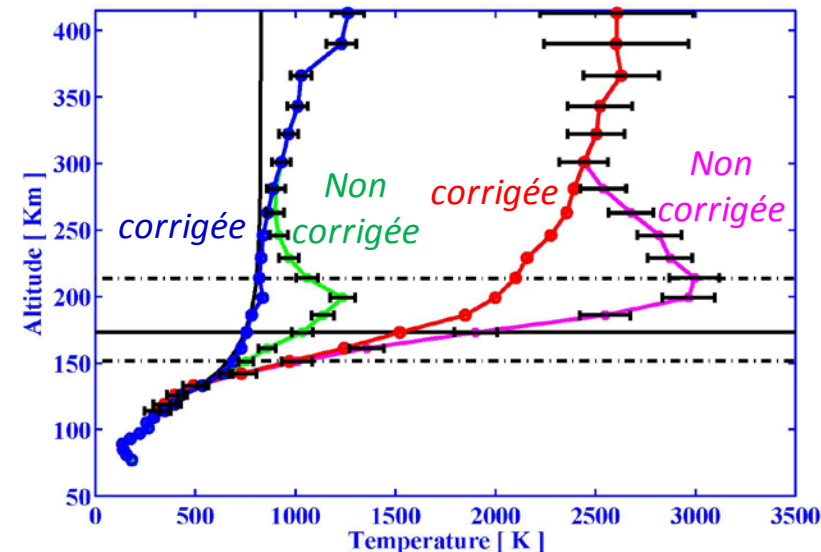


- Méthode d'analyse de l'atmosphère neutre et de l'ionosphère (données ISR)
- fournir l'environnement neutre :  
température exosphérique  
concentration atmosphérique à une altitude de référence (400 km)
- corriger les erreurs d'analyse et proposer un modèle de composition ionosphérique

- Correction en temps réel des données ISR
- Constitution d'une base de données
- Fourniture de ces paramètres atmosphériques pour les modèles d'atmosphère (DTM, MSIS...)

I.P.Y. EISCAT Svalbard Radar – 27-Jun-2007 01:11:00

$N_m F_2 = 2.31 \times 10^{11} \text{ [m}^{-3}\text{]}$     $H_m F_2 = 230 \text{ [km]}$     $Z_{50} = 173 \text{ [km]}$



# Plan

*Introduction*

*Quelques moyens disponibles à l'IRAP*

*Moyens à adapter / développer*

*Perspectives à court et moyen terme*

# Modélisation de l'électrodynamique

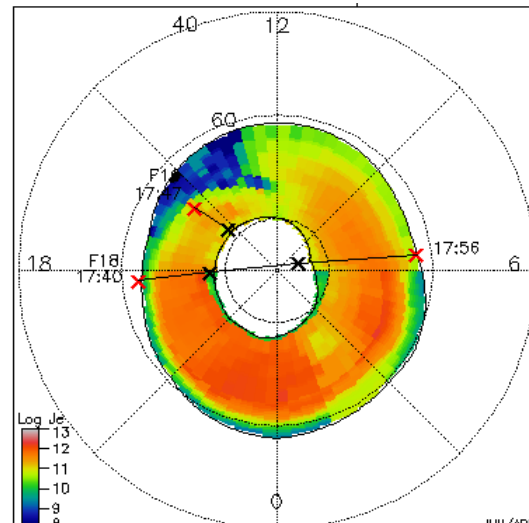
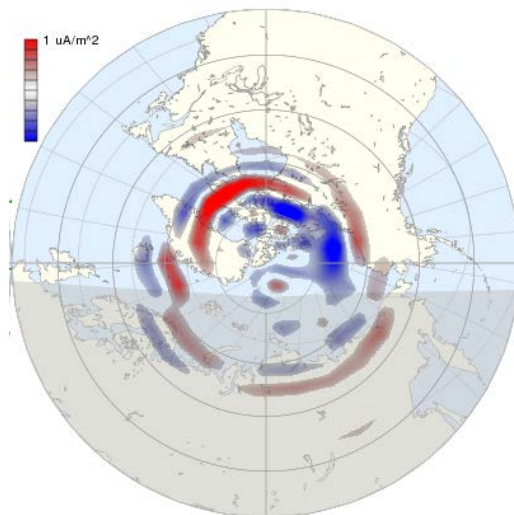
- **Assimilation de données dans un modèle électrodynamique (type IMM pour zones aurorales)**

- ajustement des entrées-sorties magnétosphériques pour « fitter » au mieux les observations (cartes de convection ionosphérique SuperDARN, distribution des courants parallèles et des précipitations)

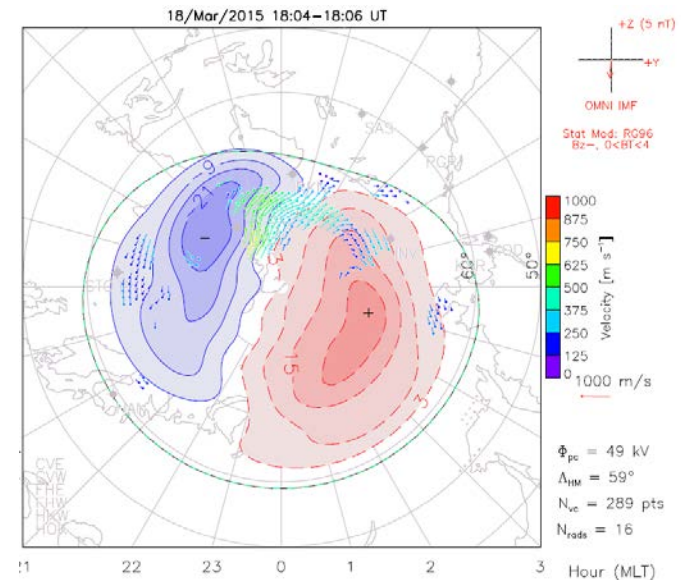
→ remonter à des paramètres électrodynamiques cohérents non accessibles directement (conductivités, courants ionosphériques)

→ avoir les entrées d'électrodynamique dans IPIM

- **Version temps-réel : paramètres disponibles → AMPERE, OVATION, SuperDARN**



Normalized B2i = 61 Flux = 271 MWb  
Equivalent Kp = 3.7 Global e- E-Flux = 30.4 MW

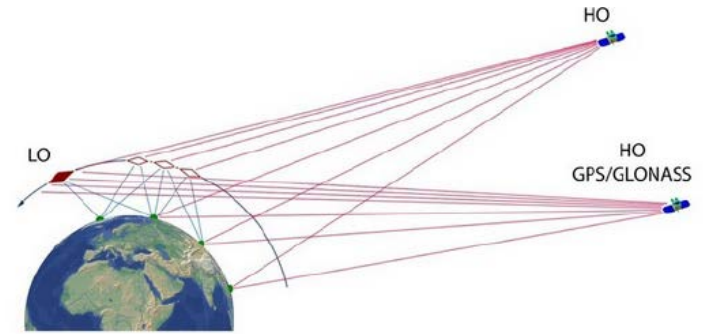


$\Phi_{pc} = 49$  kV  
 $\Lambda_{IMM} = 59^\circ$   
 $N_{vc} = 289$  pts  
 $N_{rads} = 16$

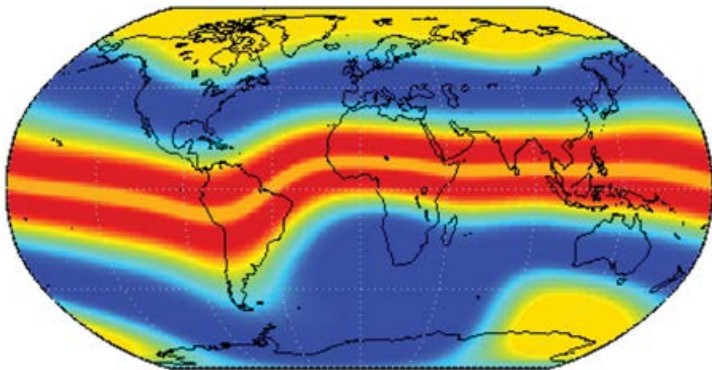
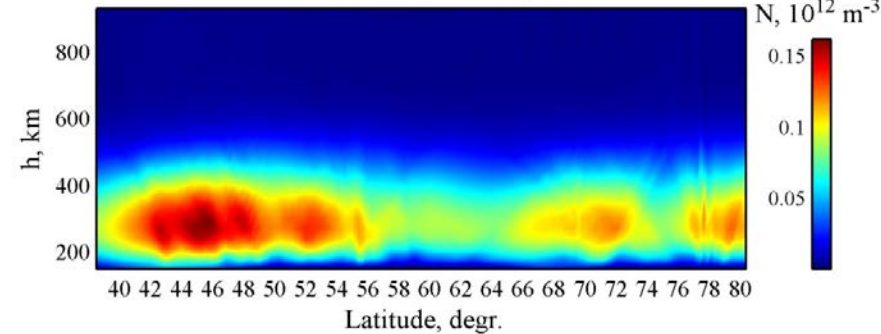
# Tomographie GNSS et modèle d'ionosphère statique

- Analyse et interprétation des signaux GNSS
- Utilisation d'une approche « directe » s'appuyant sur un modèle numérique

→ **Reconstruction de l'état de l'ionosphère et de l'atmosphère** sur une large couverture spatio-temporelle



16.04.2009 (06:20 LT)

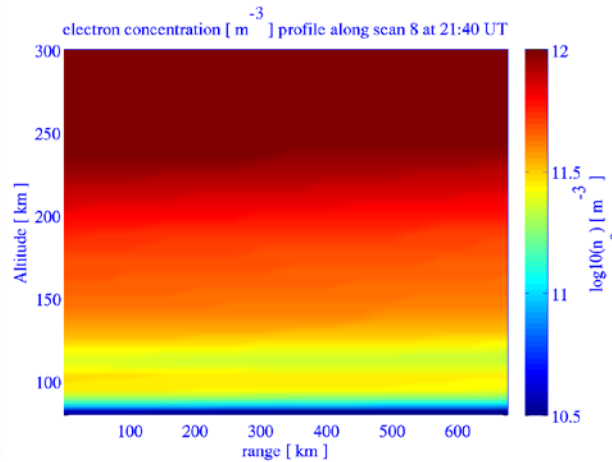
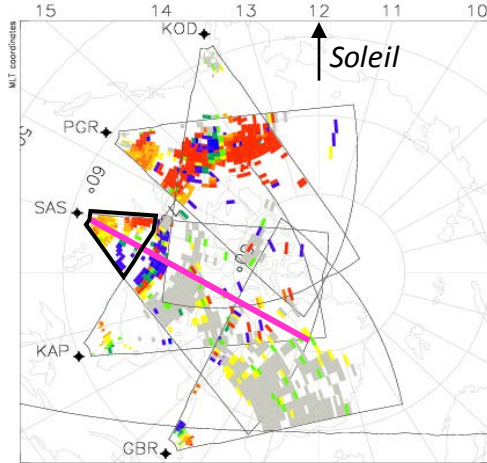


- Construction d'un modèle statique basé sur IPIM avec une grille 3D et avec  $90 < z < 3000 \text{ km}$
- Contraintes sur le modèle par ingestion des données GNSS

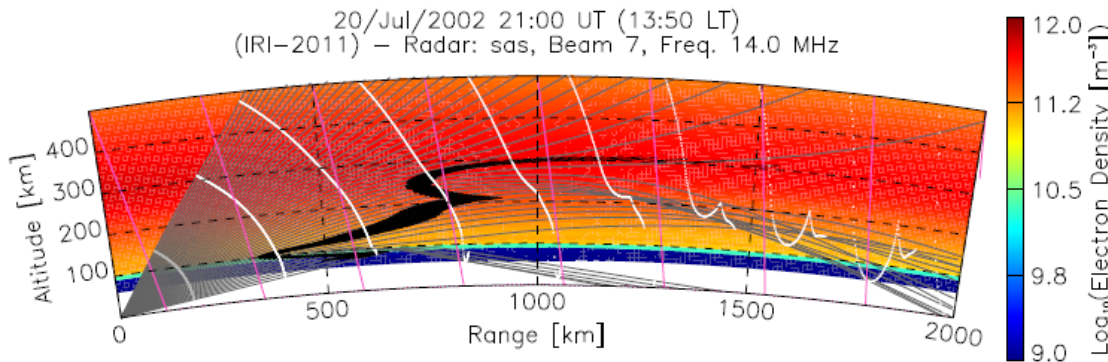
→ **Grand intérêt pour temps réel (ex : Thalès)**



# Modélisation de la propagation des ondes dans l'ionosphère



- Développement d'un modèle numérique de propagation d'ondes HF : **code tracé de rayons**
- Propagation des ondes dans le code d'ionosphère IPIM
- Adaptation des sorties d'IPIM pour coller aux observations HF
- Utilisation possible du modèle statique simplifié pour applications temps-réel (*voir infra*)



→ **Reconstruction de l'état de l'ionosphère** sur une large couverture spatiale avec une résolution temporelle de l'ordre de la minute

# Plan

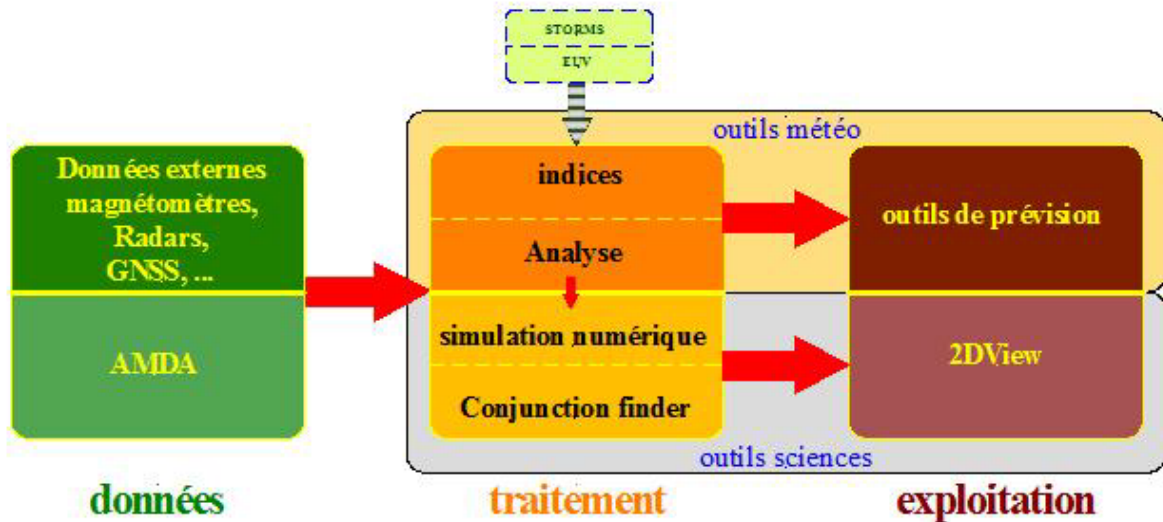
*Introduction*

*Quelques moyens disponibles à l'IRAP*

*Moyens à adapter / développer*

*Perspectives à court et moyen terme*

# Perspectives à court et moyen terme



- Réflexion sur un service dédié « Ionosphère » dans le cadre du SNO-CDPP
- Invitation à participer à la phase 2 du « Virtual Space Weather Modelling Centre » de l'ESA
- Collaboration THALES pour développer des outils temps-réel pour l'aviation civile
- Extension des modèles d'ionosphère (IPIM, IONOS, électrodynamique...) aux autres planètes (Mars, Jupiter, Vénus...) dans le cadre du projet H2020-Europlanet

The screenshot shows the 'Transcar Online' web interface. At the top, there is a logo for 'CDPP' and navigation links for 'Initialisation', 'Run', and 'Export'. Below the logo, there are links for 'Accueil' and 'Fill in form'. The main content area is titled 'Fill in form' and contains several sections for configuration:

- INITIALISATION:**
  - INI:** Initialisation file (text input: 2001014\_51000.ini), Simulation option (dropdown: NEW if new simulation).
  - RES:** Date of simulation (MM/DD/YYYY), Start time (HH:MM:SS) (text input: 01:00:00).
  - SM:** Run duration (HH:MM:SS) (text input: 00:30:00), Time step (s) (text input: 1), Output time interval (s) (text input: 300).
  - ION:** Kinetic call time interval (s) (text input: 60), photoionization (checkbox), Electron precipitation (checkbox).
  - ENV:** Time interval between two tubes (s) (text input: 60), Backward convection (s) (text input: 0).
- multi location definition:** (checkbox)
- GEO:** Coordinate frame (dropdown: GEO if geographic coordin...), Longitude (text input: 18.95), Latitude (text input: 99.99).

A blue 'Send' button is located at the bottom of the form.

*Page Web de Transcar Online multi-tubes avec SuperDARN temps-réel (en cours d'implémentation)*