

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

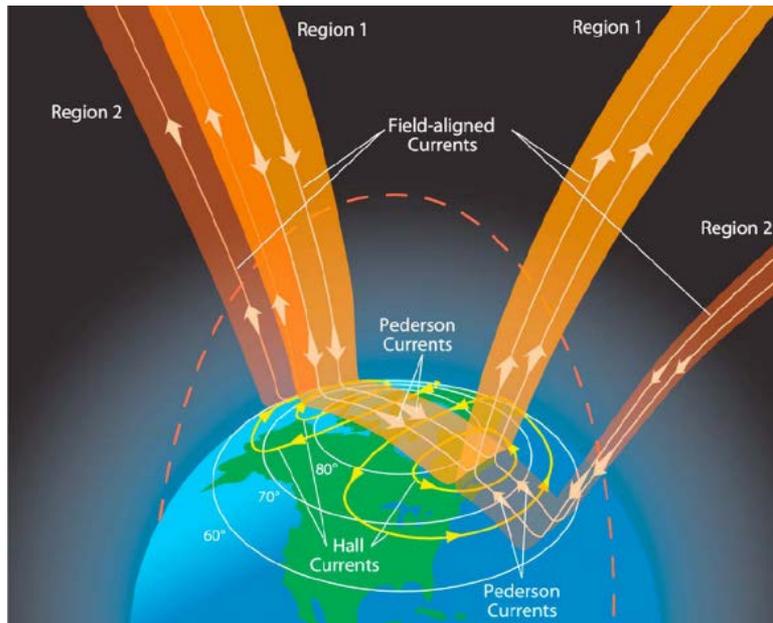
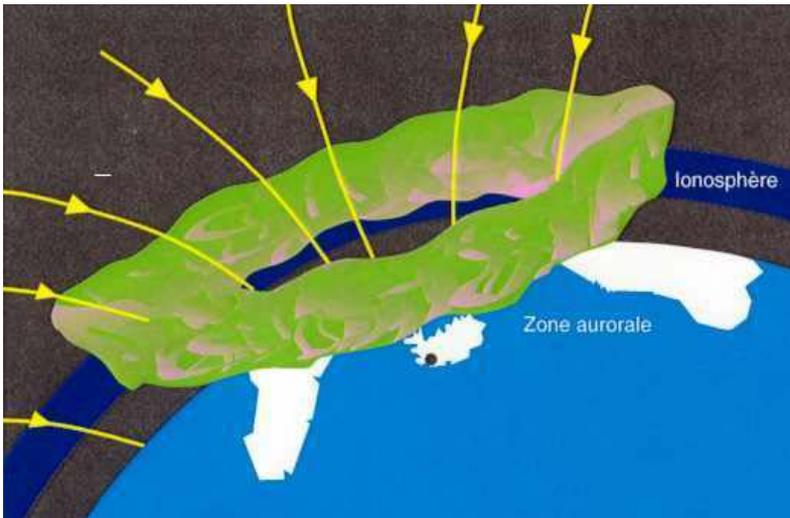
Rôle fondamental de l'ionosphère en Météorologie de l'Espace

→ **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

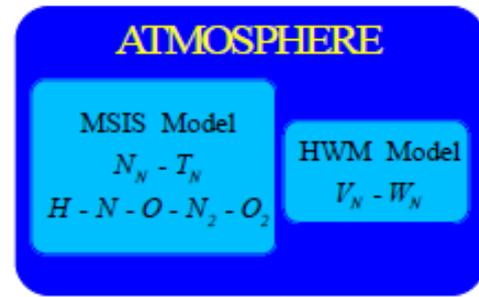
Quelques moyens disponibles à l'IRAP

Moyens à adapter / développer

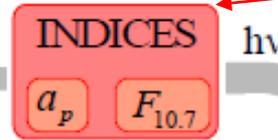
Perspectives à court et moyen terme

Synopsis du modèle couplé IPIM

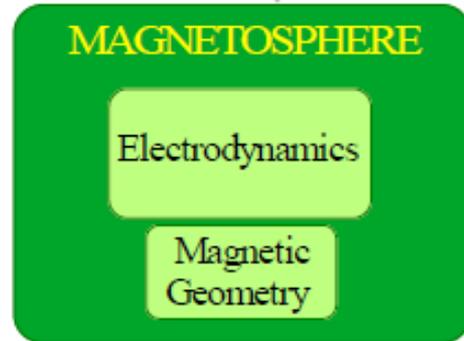
Entrées d'atmosphère



Proxys pour l'activité solaire et magnétique



Transport des espèces thermiques

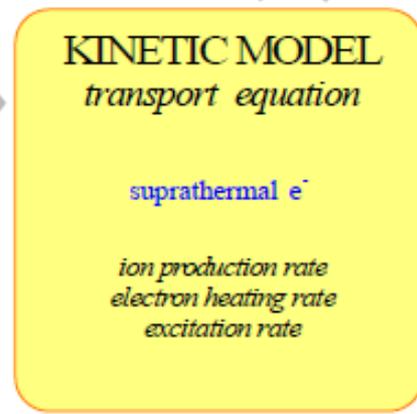
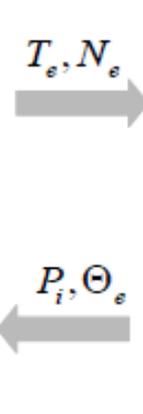
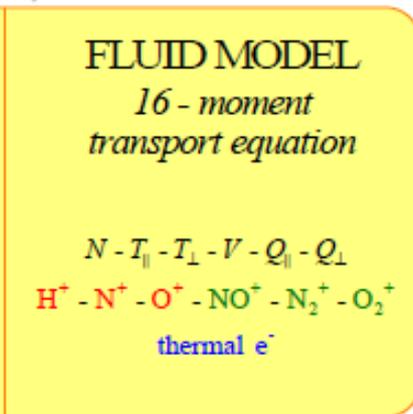
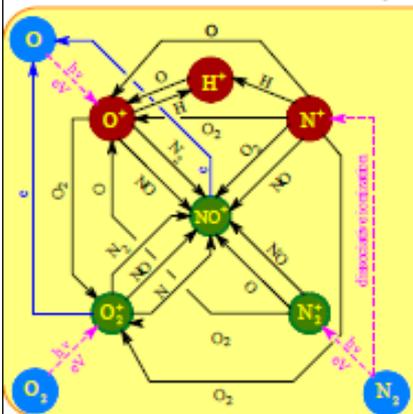


Entrées électrodynamiques à développer (hautes latitudes et équateur)

Module chimique

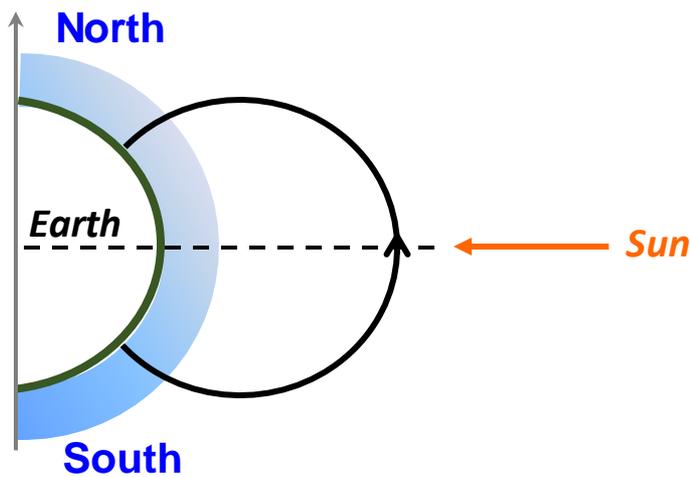
$\bar{E}_\perp, \bar{J}_\parallel$
 \bar{B}

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

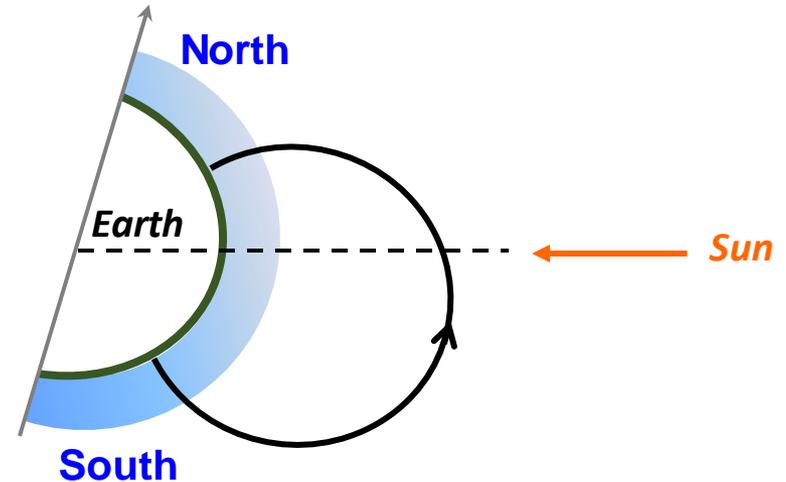


Transport des électrons de haute énergie

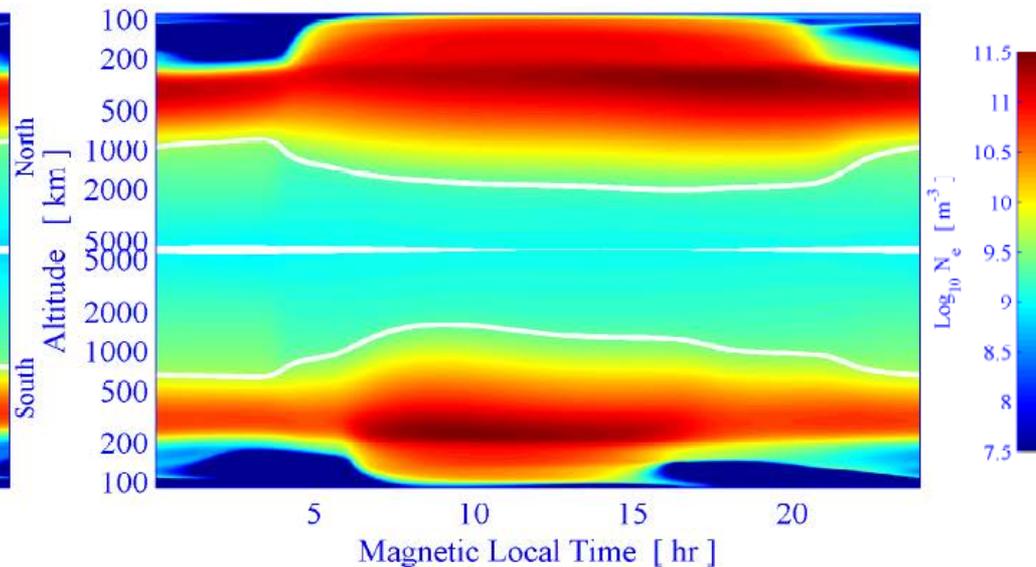
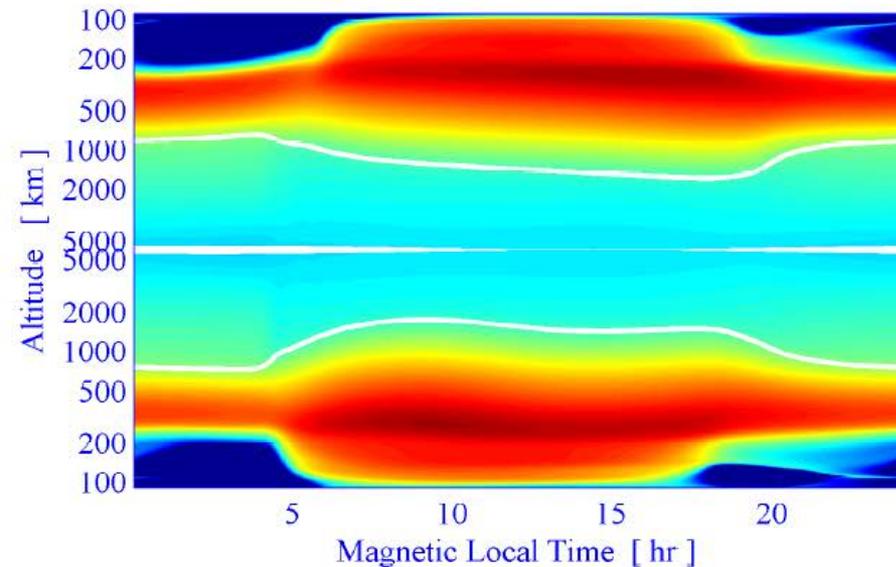
Exemple de résultats d'IPIM : densité électronique le long d'un tube à $L_{\max}=2$ fn du MLT pour équinoxe et solstice



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



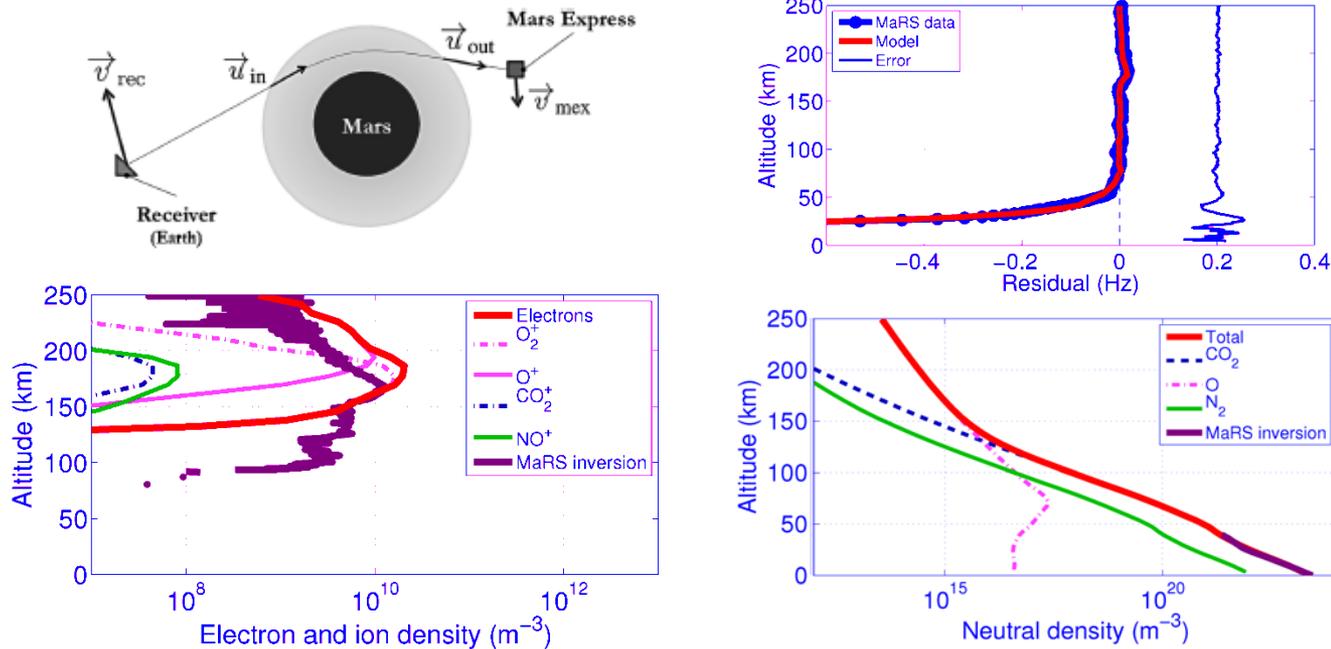
$L_{\max} = 02.00$ for solstice conditions



Radio-occultation : apport de la modélisation

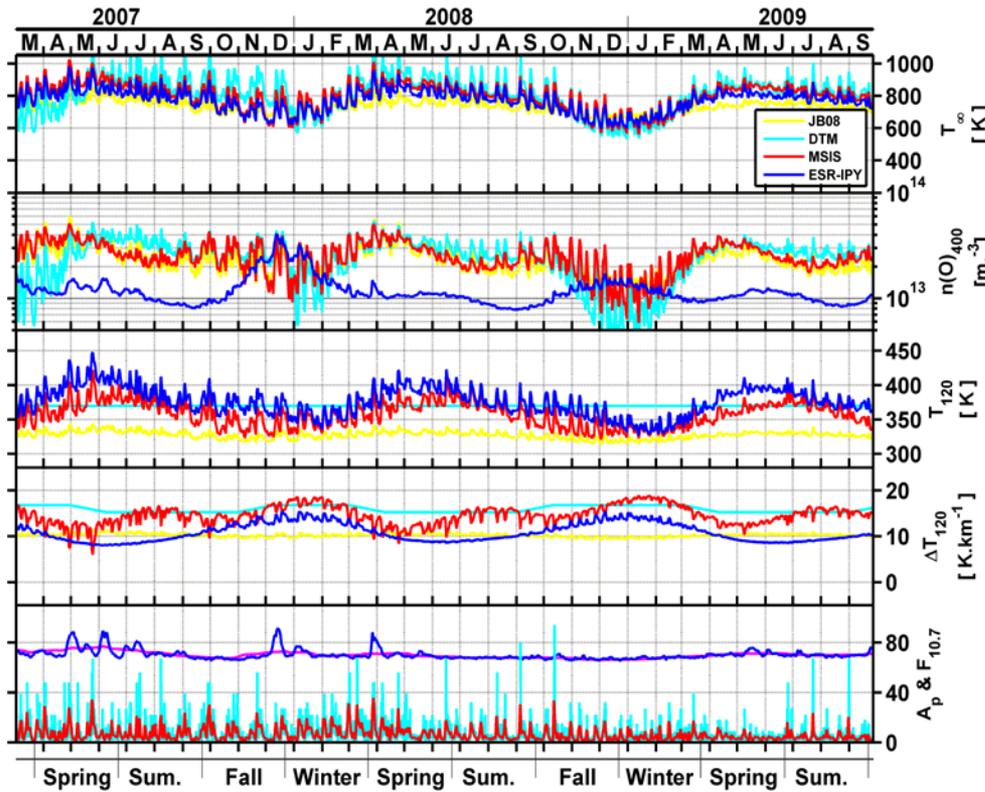
- **Méthode innovante pour analyser les atmosphères planétaires**
 - Simulation directe vs. résolution d'un problème inverse
 - Traitement de la donnée primaire : doppler résiduel vs. réfractivité
 - Levée des contraintes (symétrie sphérique, profil de Chapman)
- Inclusion d'un modèle numérique permettant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

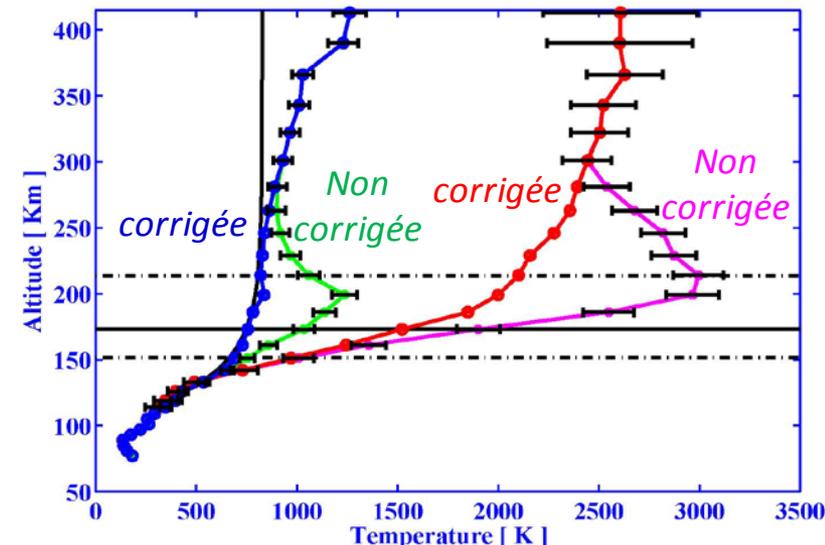


- Correction en temps réel des données ISR
- Constitution d'une base de données
- Fourniture de ces paramètres atmosphériques pour les modèles d'atmosphère (DTM, MSIS...)

- 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

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

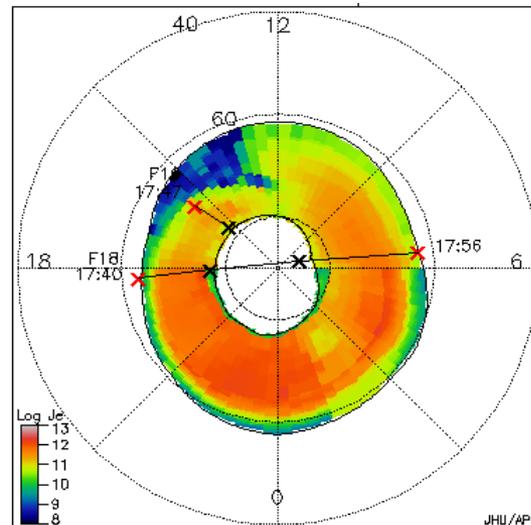
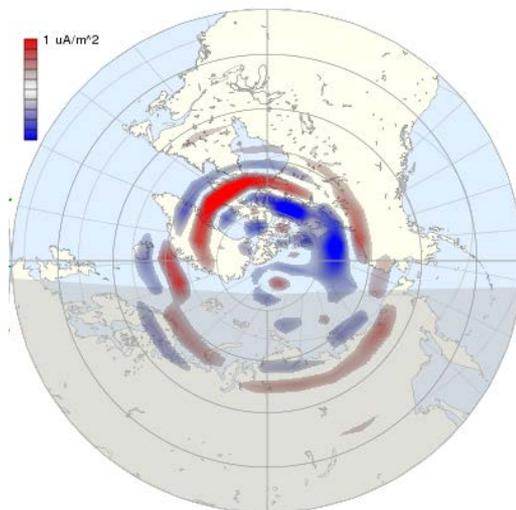
- **Assimilation de données dans un modèle électrodynamique (type IMM pour zones aurorales)**

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

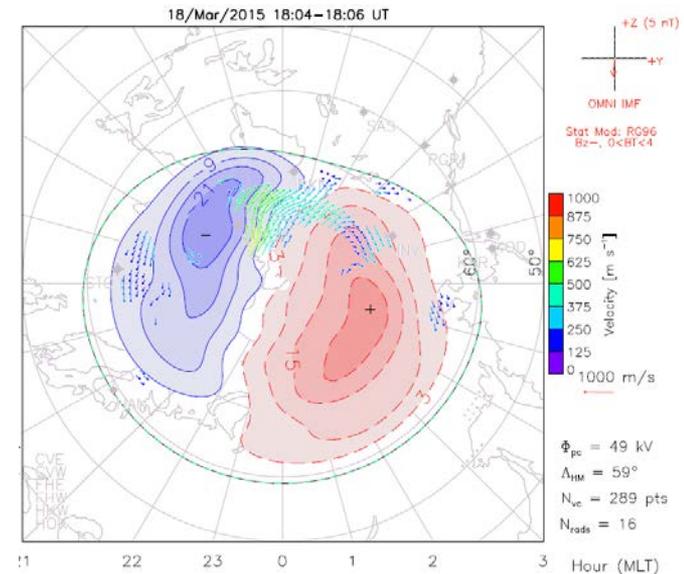
- remonter à des paramètres électrodynamiques cohérents non accessibles directement (conductivités, courants ionosphériques)

- avoir les entrées d'électrodynamique dans IPIM

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



Normalized $B_2^i = 61$ Flux = 271 MWb
Equivalent $K_p = 3.7$ Global e^- E-Flux = 30.4 MW



+Z (5 nT)
+Y
OMNI IMF
Stat Mod: R096
Bz<-, 0<B1<4

1000
875
750
625
500
375
250
125
0
1000 m/s
Velocity [m s⁻¹]

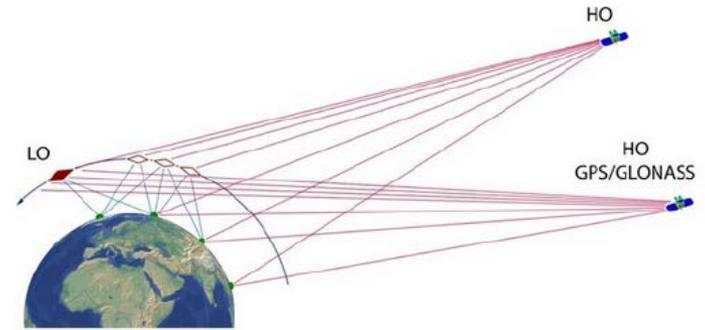
$\Phi_{pc} = 49$ kV
 $\Lambda_{IMM} = 59^\circ$
 $N_{vc} = 289$ pts
 $N_{rads} = 16$

1 22 23 0 1 2 3 Hour (MLT)

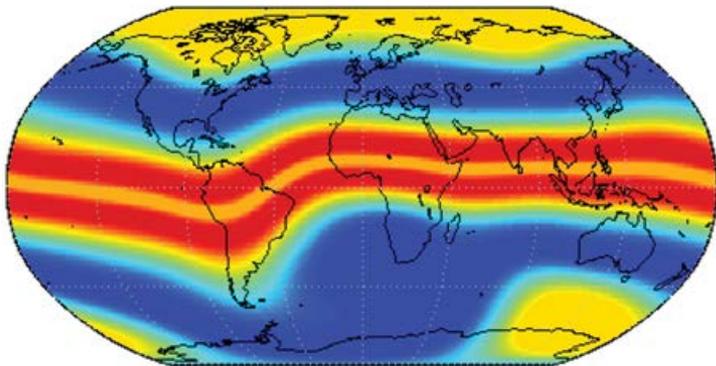
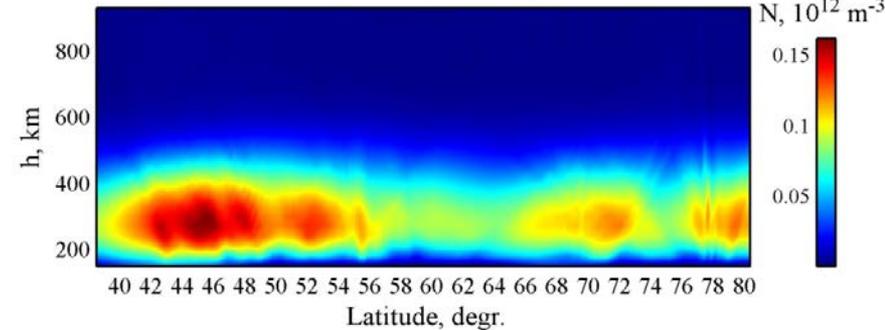
Tomographie GNSS et modèle d'ionosphère statique

- 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



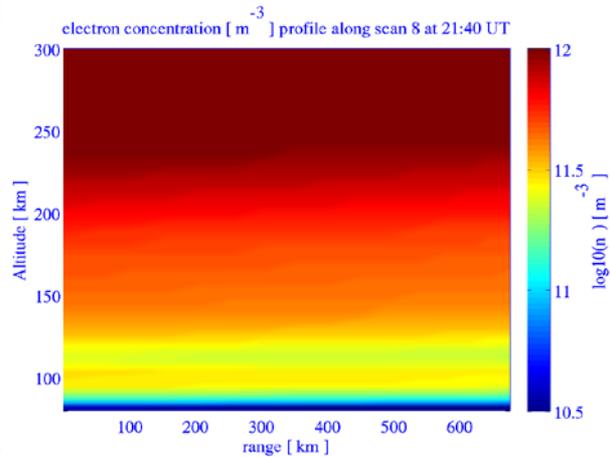
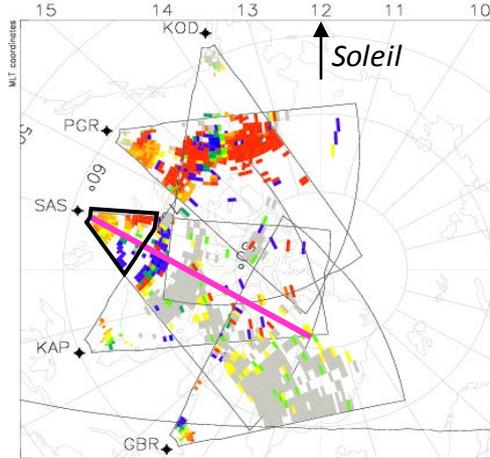
16.04.2009 (06:20 LT)



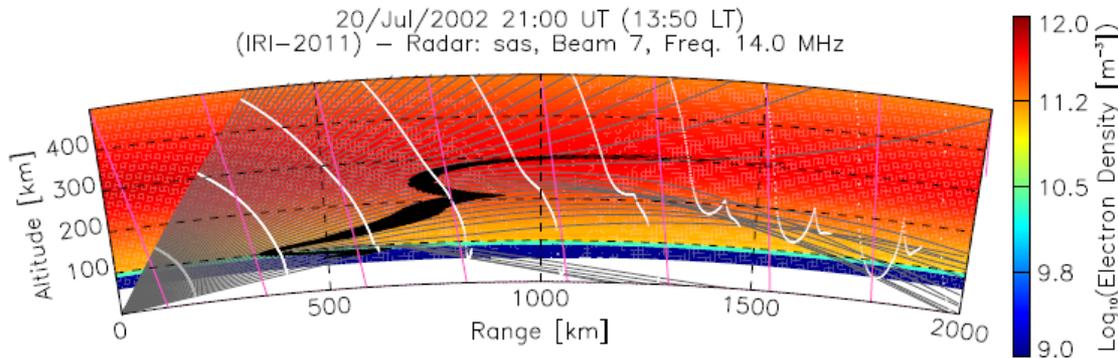
- Construction d'un modèle statique basé sur IPIM avec une grille 3D et avec $90 < z < 3000 \text{ km}$
- Contraintes sur le modèle par ingestion des données GNSS

→ **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

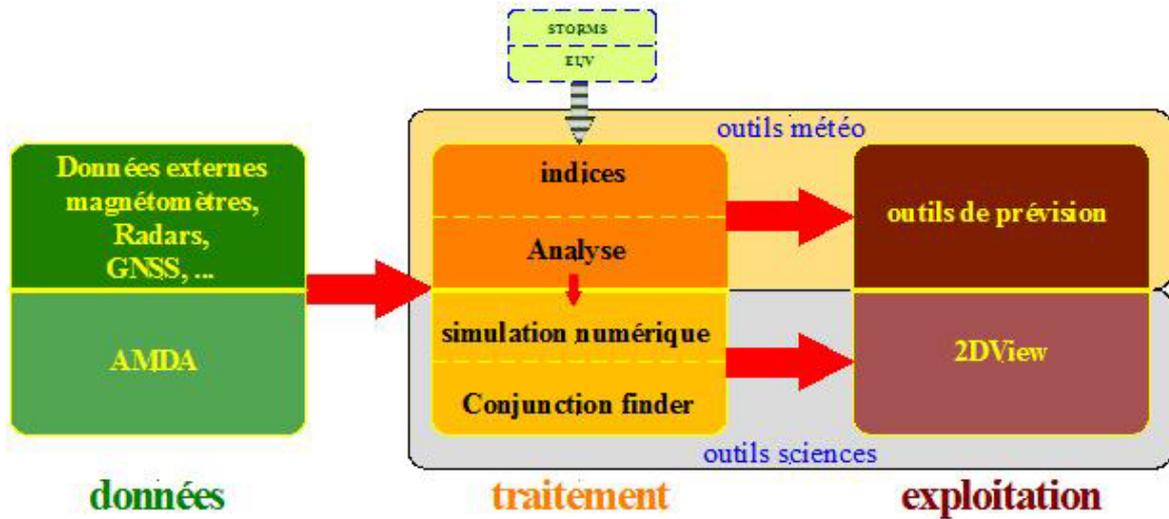
Introduction

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 'INITIALISATION' section of a web interface. At the top, there are tabs for 'INITIALISATION', 'Run', and 'Export'. Below them are links for 'Accueil' and 'Fill in form'. A 'Fill in form' button is also present. The main content area is titled 'INITIALISATION' and contains several sections with input fields and checkboxes:

- INI**: 'Initialisation file' (text input: 2001014_51000.in), 'Simulation option' (dropdown: NEW if new simulation).
- RES**: 'Date of simulation (MMDDYYYY)' (text input), 'Start time (HHMMSS)' (text input: 01:00:00).
- SM**: 'Run duration (HHMMSS)' (text input: 00:30:00), 'Time step (s)' (text input: 1), 'Output time interval (s)' (text input: 300).
- ION**: 'Kinetic cell 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 coordinat...), 'Longitude' (text input: 18.95), 'Latitude' (text input: 99.99).

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

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