

Comprendre l'environnement spatial proche de la Terre : enjeu aussi bien pour les relations Soleil-Terre et que pour les couplages avec la basse atmosphère

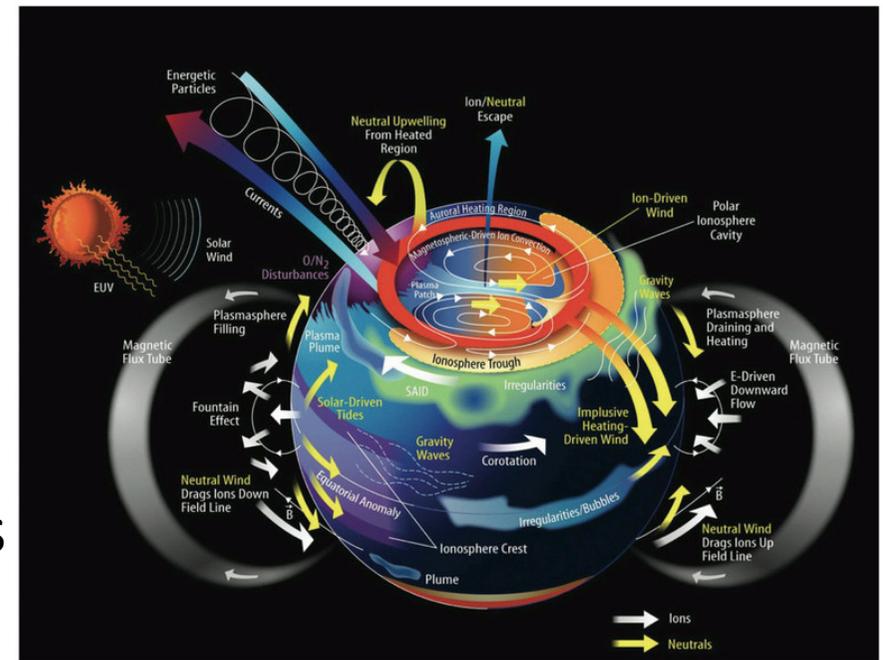
Aurélie Marchaudon

IRAP, CNRS, CNES et Université de Toulouse, Toulouse, France

Equipe ionosphère en France : Pierre-Louis Blelly, Frédéric Pitout (IRAP), Mathieu Barthélémy (IPAG),
Elvira Astafyeva, Pierdavide Coisson (IPGP), Aude Chambodut (EOST), Carine Briand (LESIA)

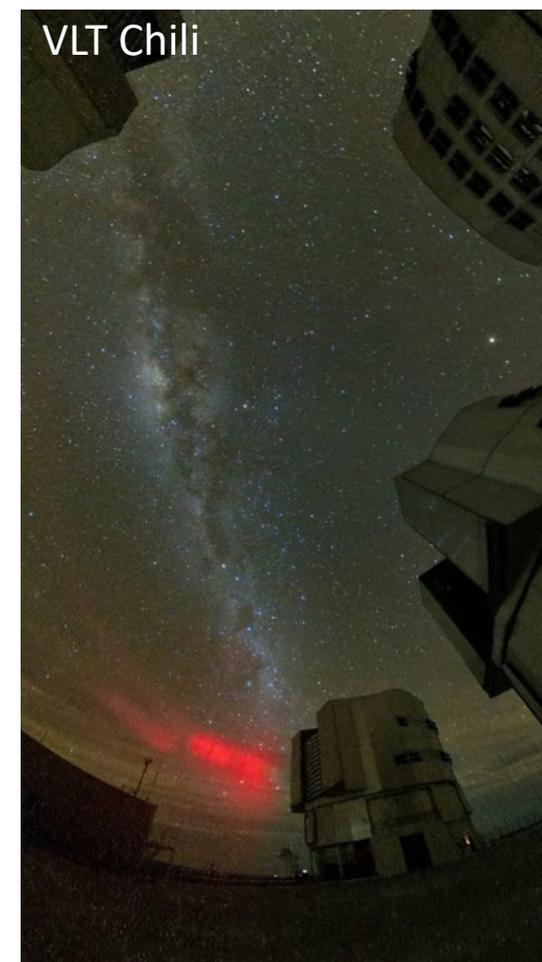
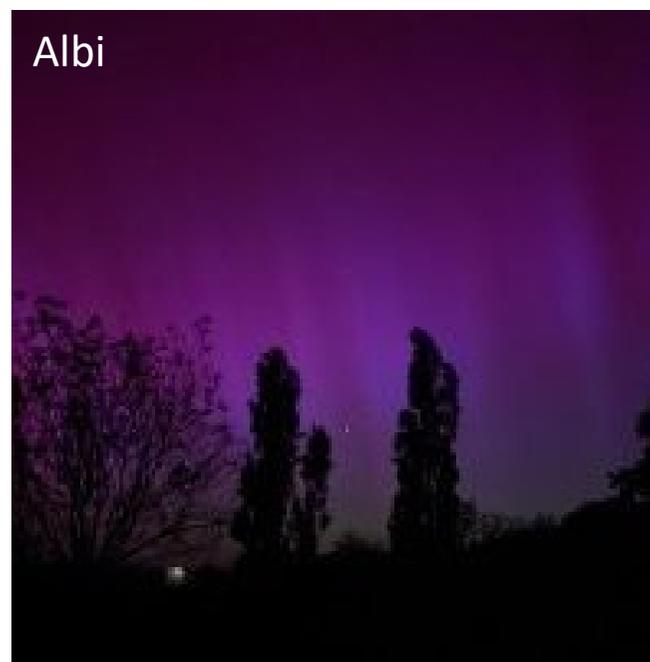
*Journées de la SF2A
Toulouse, 4 Juin 2024*

1. Rappels de base sur l'ionosphère et la thermosphère
2. Outils de diagnostic : instrumentation et modèle
3. Quelques grandes questions scientifiques liées à ces régions :
 - a. Relations Soleil-Terre en période d'orages magnétiques
 - b. Rôle de la basse atmosphère dans la variabilité jour-à-jour
 - c. L'ionosphère, miroir des processus géophysiques internes



4. Conclusion et perspectives

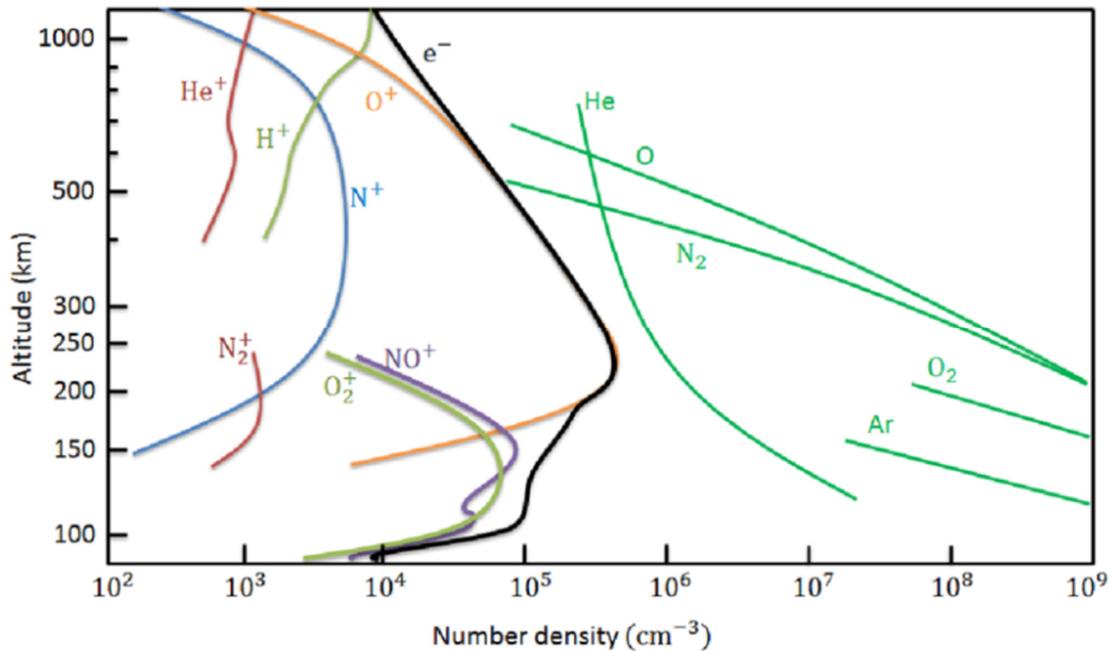
1. Rappels de base sur l'ionosphère et la thermosphère



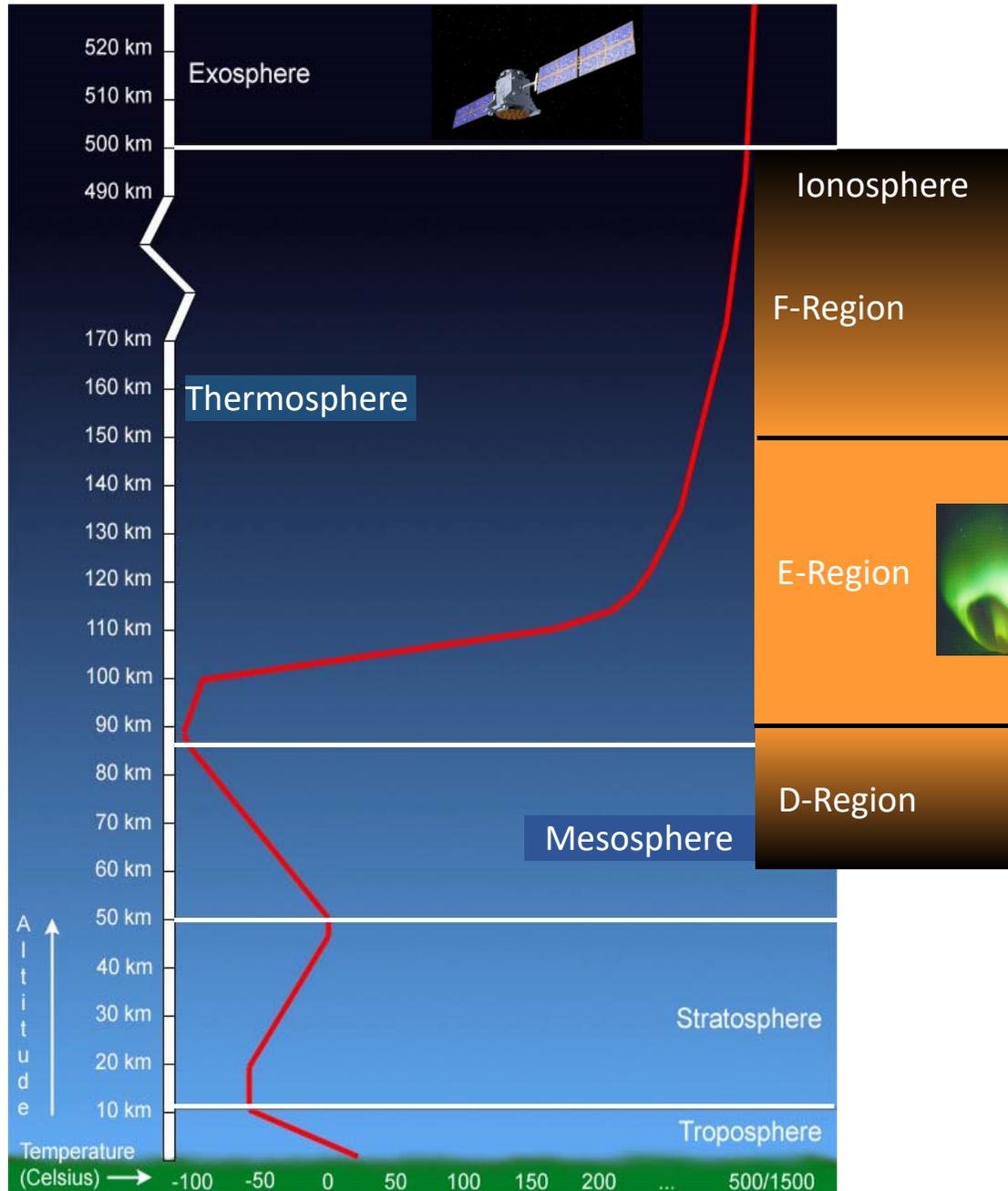
Orage magnétique du 13 Mai 2024



@NASA

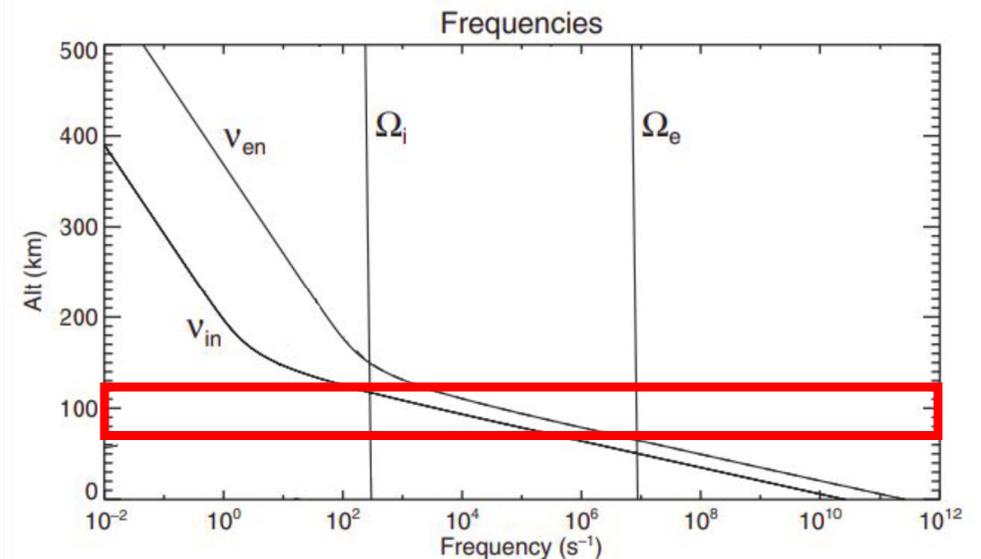


- Haute atmosphère composée de deux milieux coexistant :
 Atmosphère Neutre → **Thermosphère**
 Atmosphère Ionisée → **Ionosphère**
 → **plasma partiellement ionisé par photoionisation solaire (UV-EUV) et précipitation de particules**

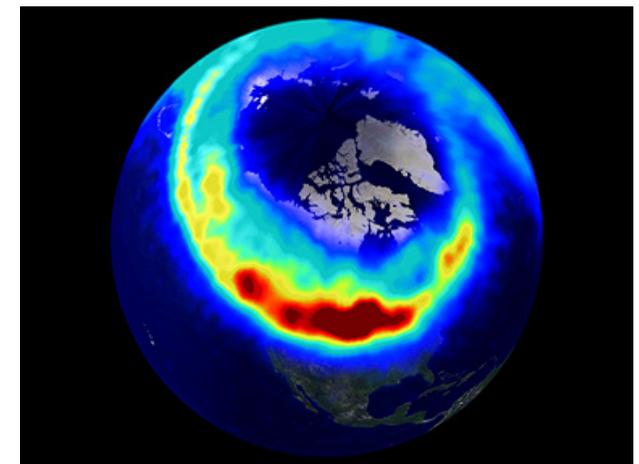
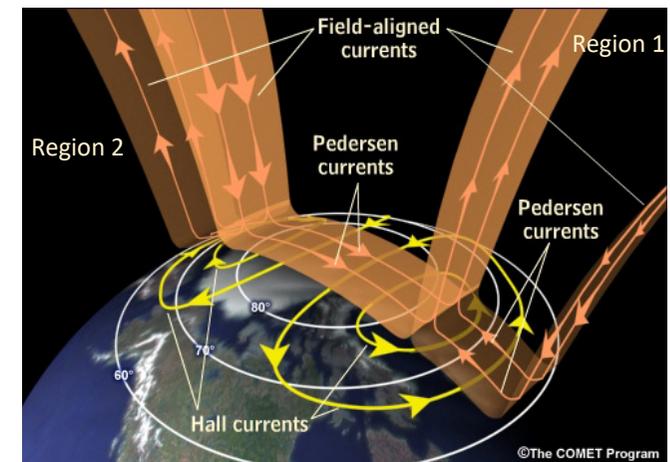
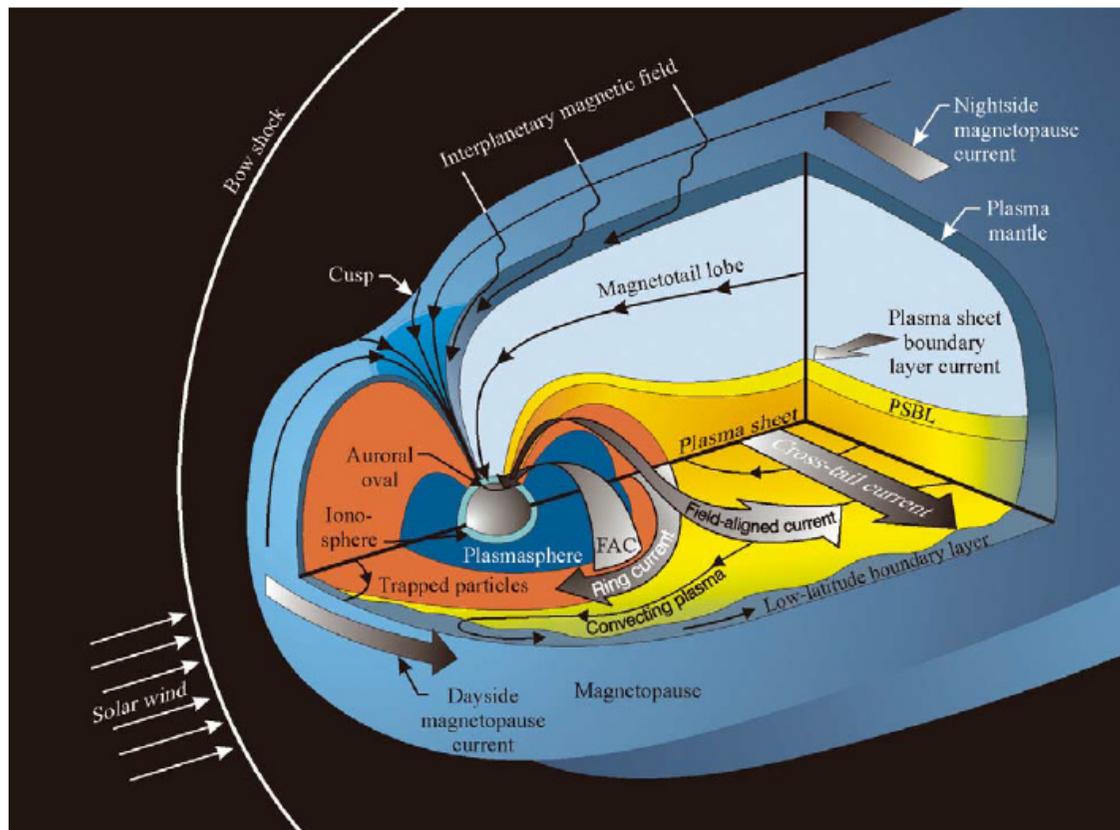


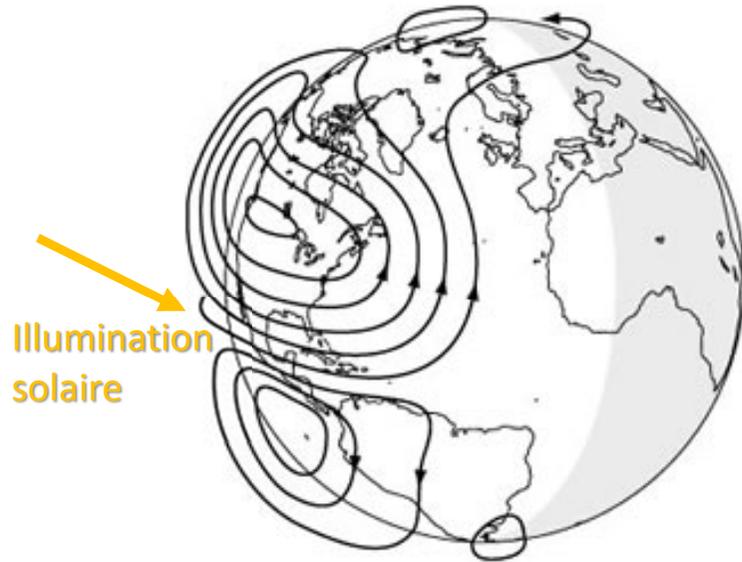
- Ionosphère en équilibre entre :
 - **Processus chimiques** (production, perte, échange de charge)
 - **Transport** (horizontal et vertical)
- dont les propriétés dépendent de la thermosphère** (composition, vent, thermodynamique) et de l'activité solaire (irradiance, CMEs)

- Région E : découplage ions-électrons → **courants horizontaux**

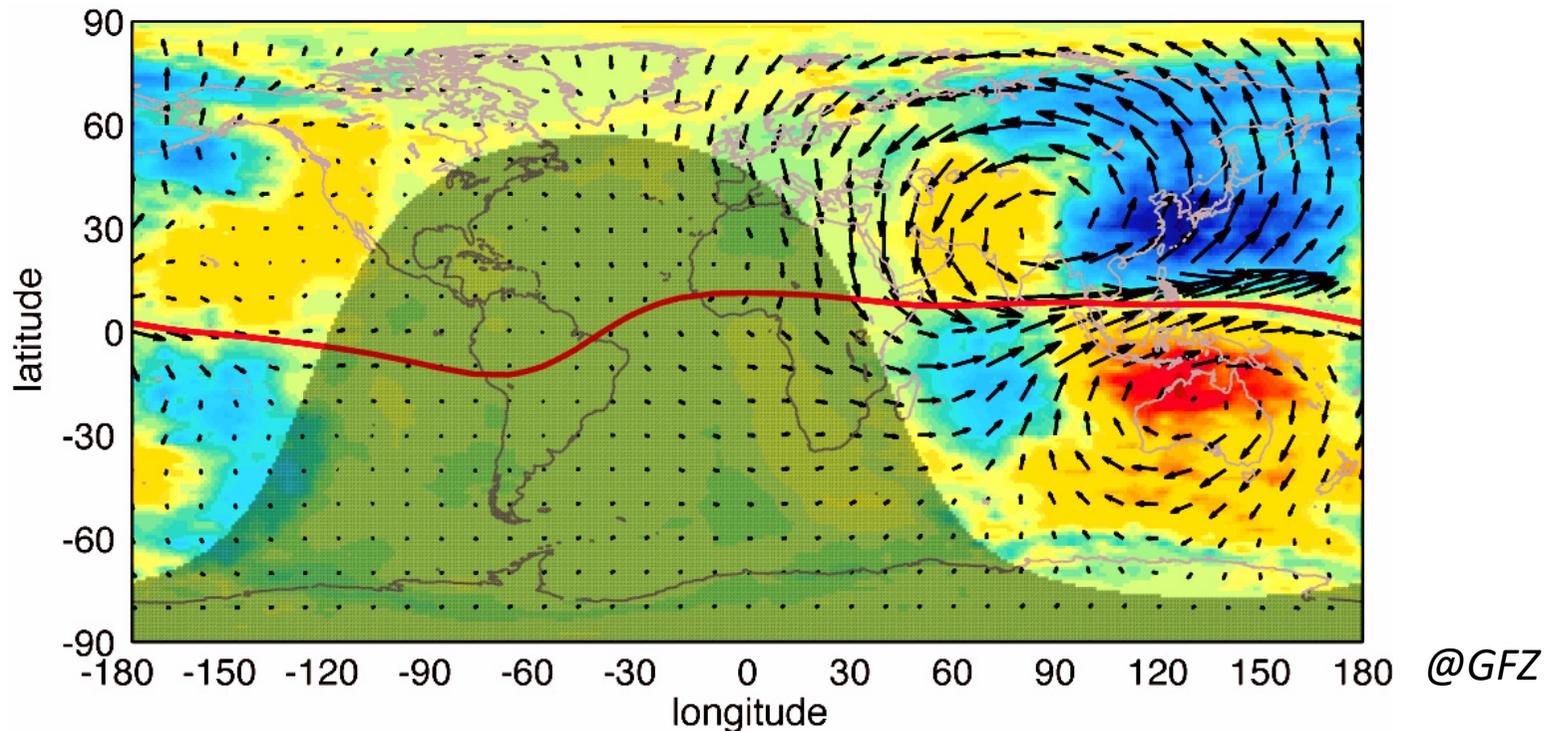


- Courants et convection magnétosphériques à grande échelle générés par le couplage avec le vent solaire
- Divergence de ces courants et fermeture dans l'ionosphère : **cellules de convection et courants de Pedersen et de Hall**
- Précipitation de particules le long du champ magnétique jusque dans l'ionosphère : **aurores polaires le long de l'ovale auroral**

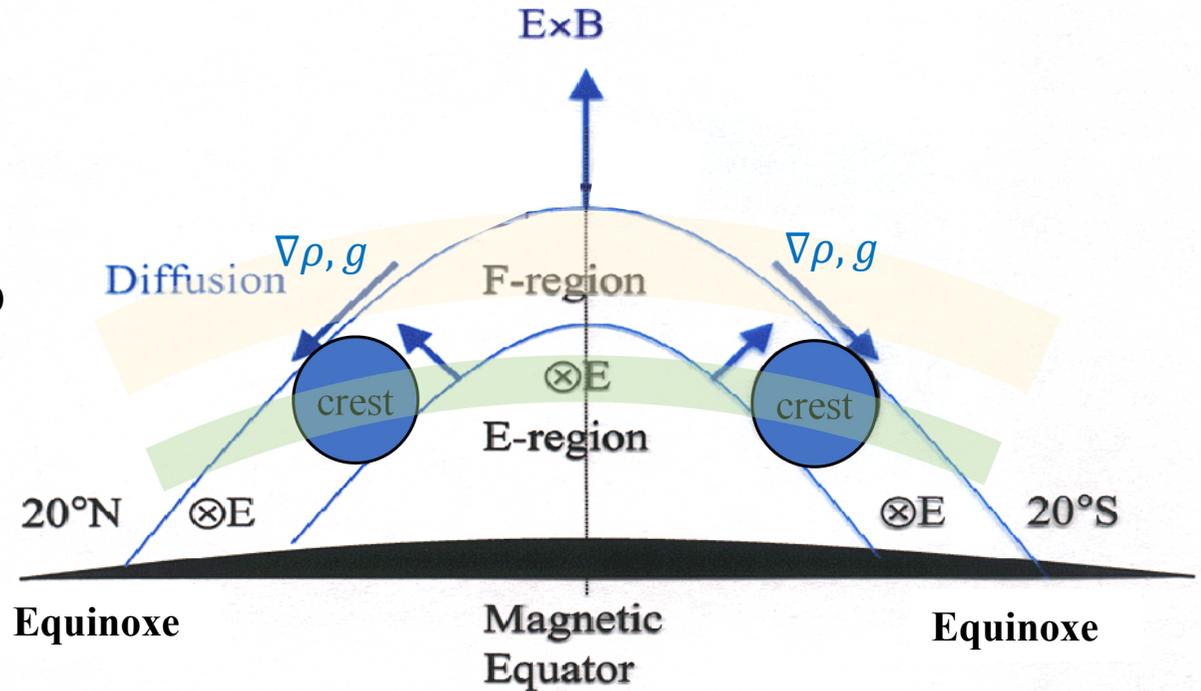




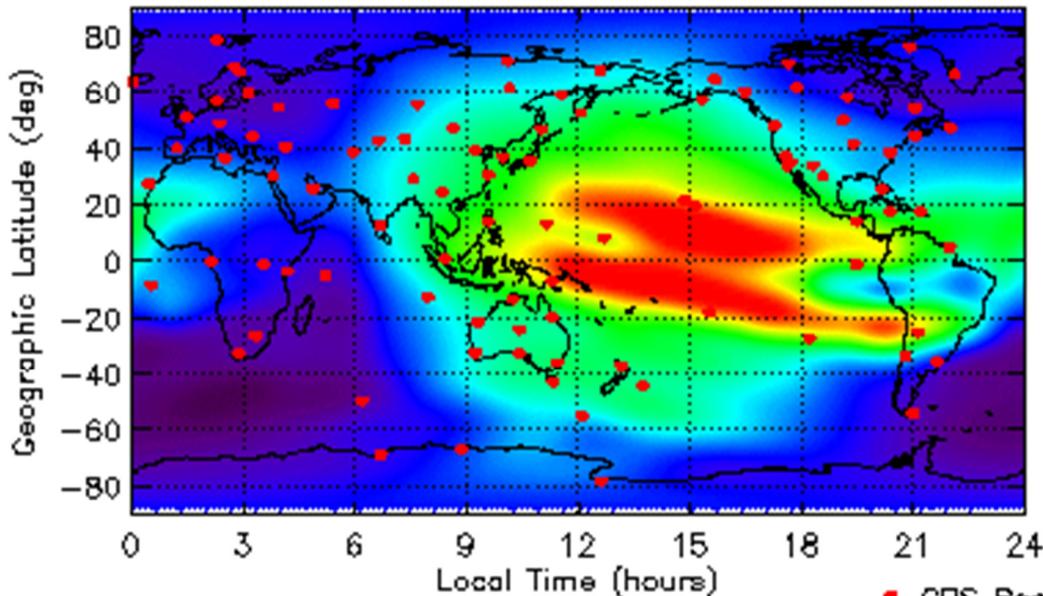
- Illumination solaire (effet de marée) génère un écoulement vers l'Est dans la thermosphère près de l'équateur
- Génération d'un champ électrique et d'un courant (Pedersen) vers l'Est dans l'ionosphère
- Formation de **deux cellules de courants hémisphériques** côté jour et renforcement à l'équateur : **électrojet**



- Ascension du plasma (effet de dérive en $E \times B$) dû à la géométrie horizontale de B à l'équateur
- Descente du plasma le long du champ magnétique (gradients pression et gravité)
- Formation de deux crêtes de densité → **Fontaine équatoriale**

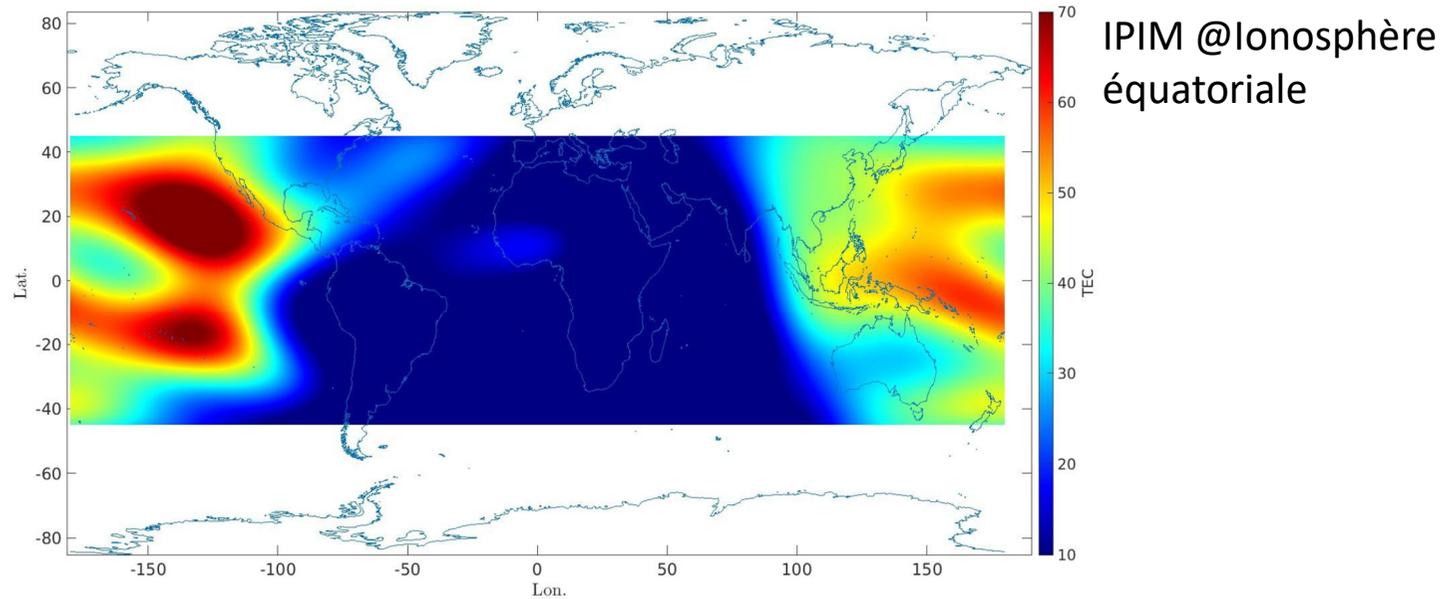


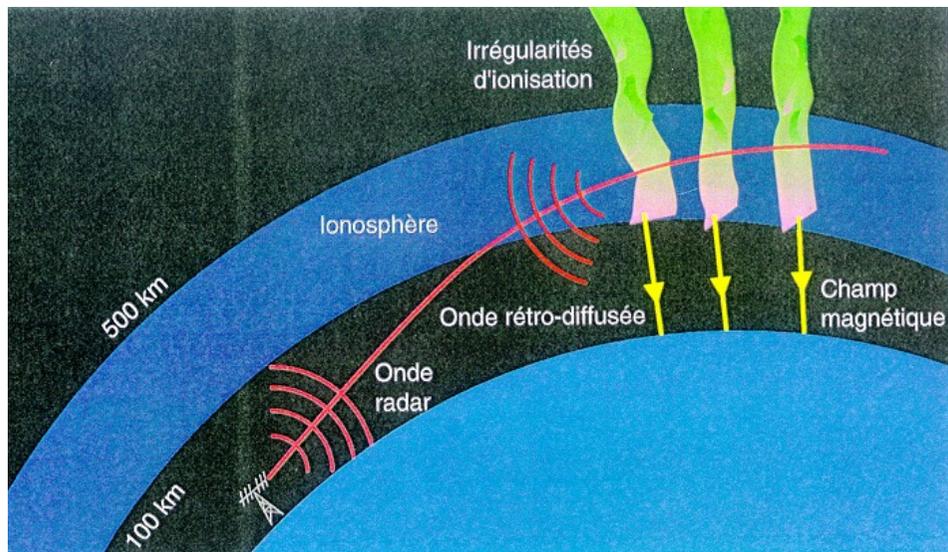
04/17/02
01:00 - 02:00 UT Global Ionospheric TEC Map



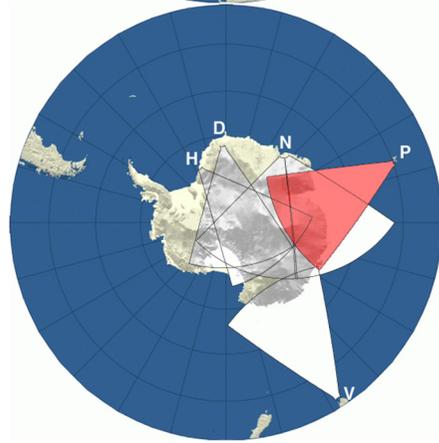
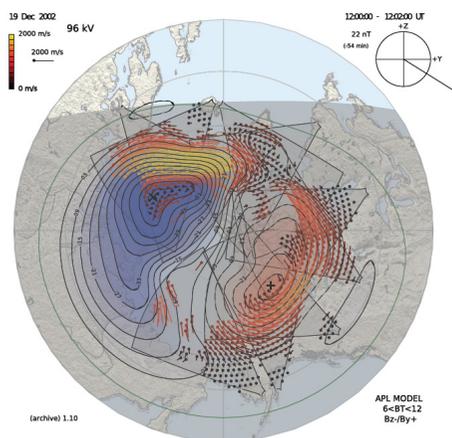
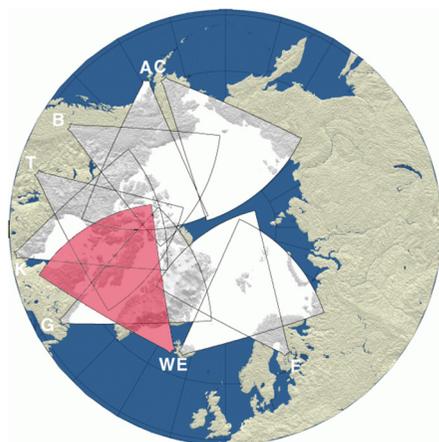
- Contenu Electronique Total (TEC) par mesures satellitaires GNSS
- Deux pics de densité de part et d'autre de l'équateur : à $\pm 10-20^\circ$ MLAT dans le secteur 9-21 MLT

2. Outils de diagnostic : instrumentation (observatoire long terme) et modèle



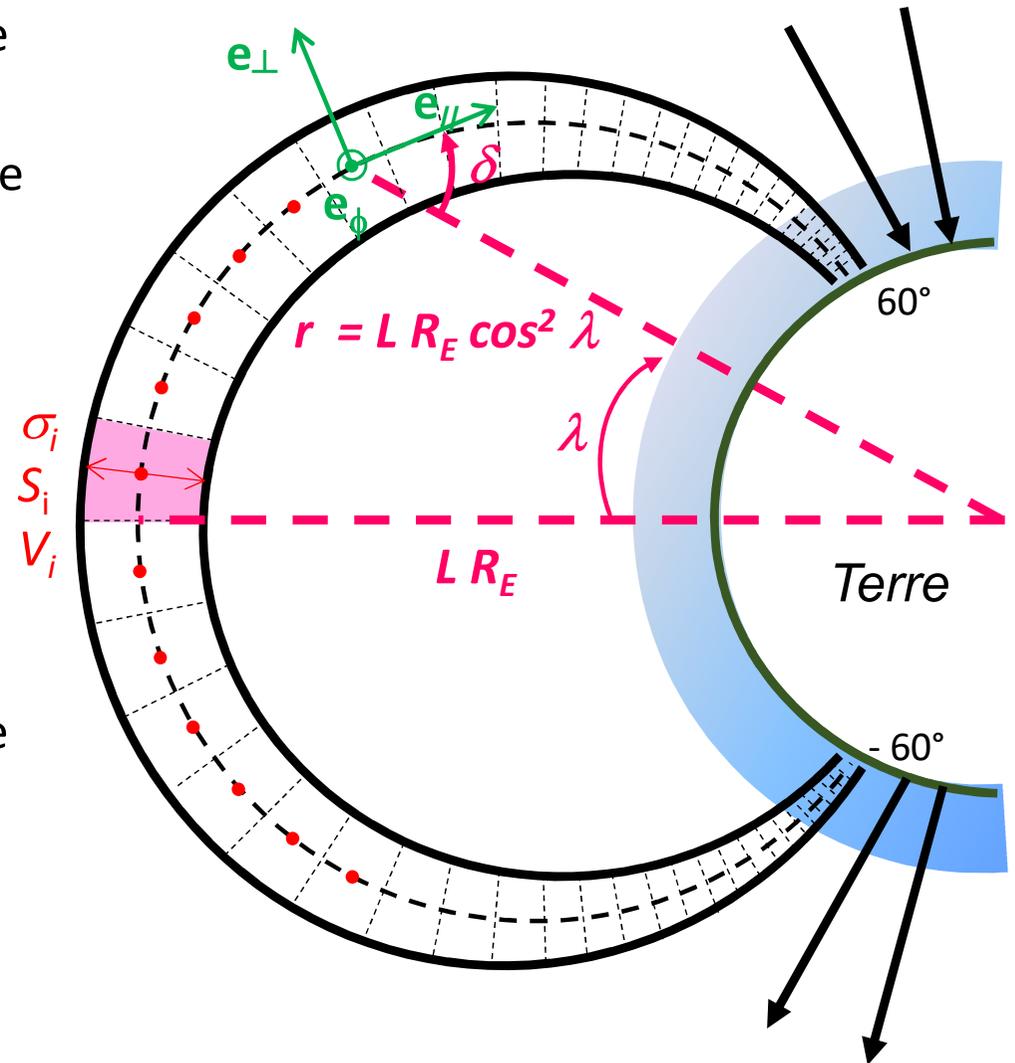


- 2 réseaux distribués autour des ovales auroraux des 2 hémisphères (dont France à Port-aux-Français, Iles Kerguelen)
- Radars Over-The-Horizon composés d'un réseau d'antennes HF (fréquences d'émission : 12-20 MHz)
- Champ de vue : faisceau orientable $\sim 50^\circ$ en azimut et 3000 km en distance
- Mesures de vitesse du plasma ionosphérique le long de la ligne de visée (100-400 km alt.)

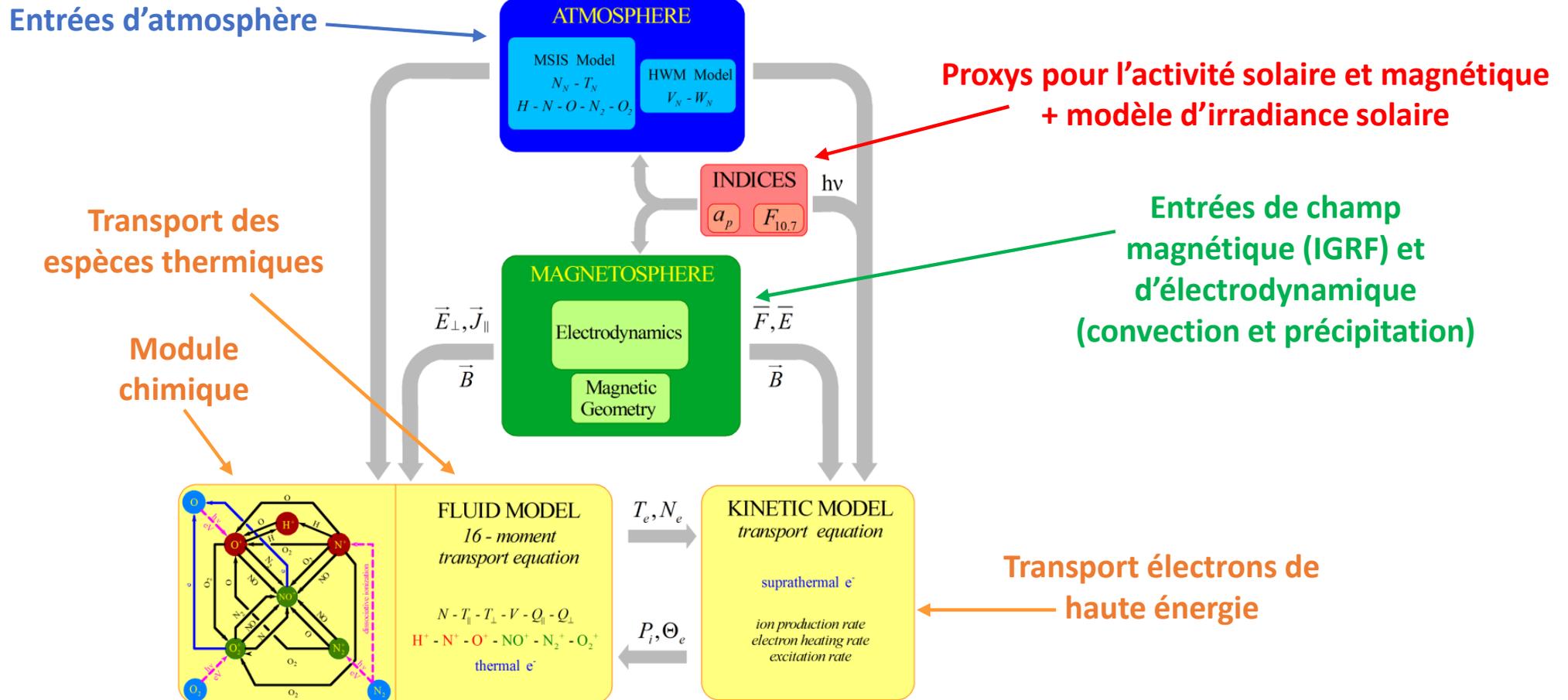


- **Cartes de convection globale** déduites des mesures de tous les radars avec contraintes par un modèle statistique
- Obtention d'images "quasi-instantanées" de la convection du plasma dans les 2 hémisphères (mesures depuis 1995)

- **Mode IPIM-Hautes Latitudes** : couvre les zones en interaction directe avec le vent solaire
 - équations de transport résolues le long d'une ligne de champ magnétique ouverte
 - électrodynamique haute latitude drivée par le vent solaire
 - couverture : $60^\circ > |Mlat|$
et $90 \text{ km} < \text{alt} < 3000 \text{ km}$
- **Mode IPIM-interhémisphérique** : couvre l'ionosphère et la plasmasphère aux moyennes et basses latitudes
 - équations de transport résolues le long d'une ligne de champ magnétique fermée (IGRF)
→ **couverture globale multi-tubes**
 - électrodynamique équatoriale drivée par le vent neutre → **en cours d'implémentation**
 - couverture : $10^\circ \rightarrow (0^\circ) < |Mlat| < 60^\circ$
et $90 \text{ km} < \text{altitude} < 6 R_E$



- **Modèle transposé à d'autres planètes et au Soleil**

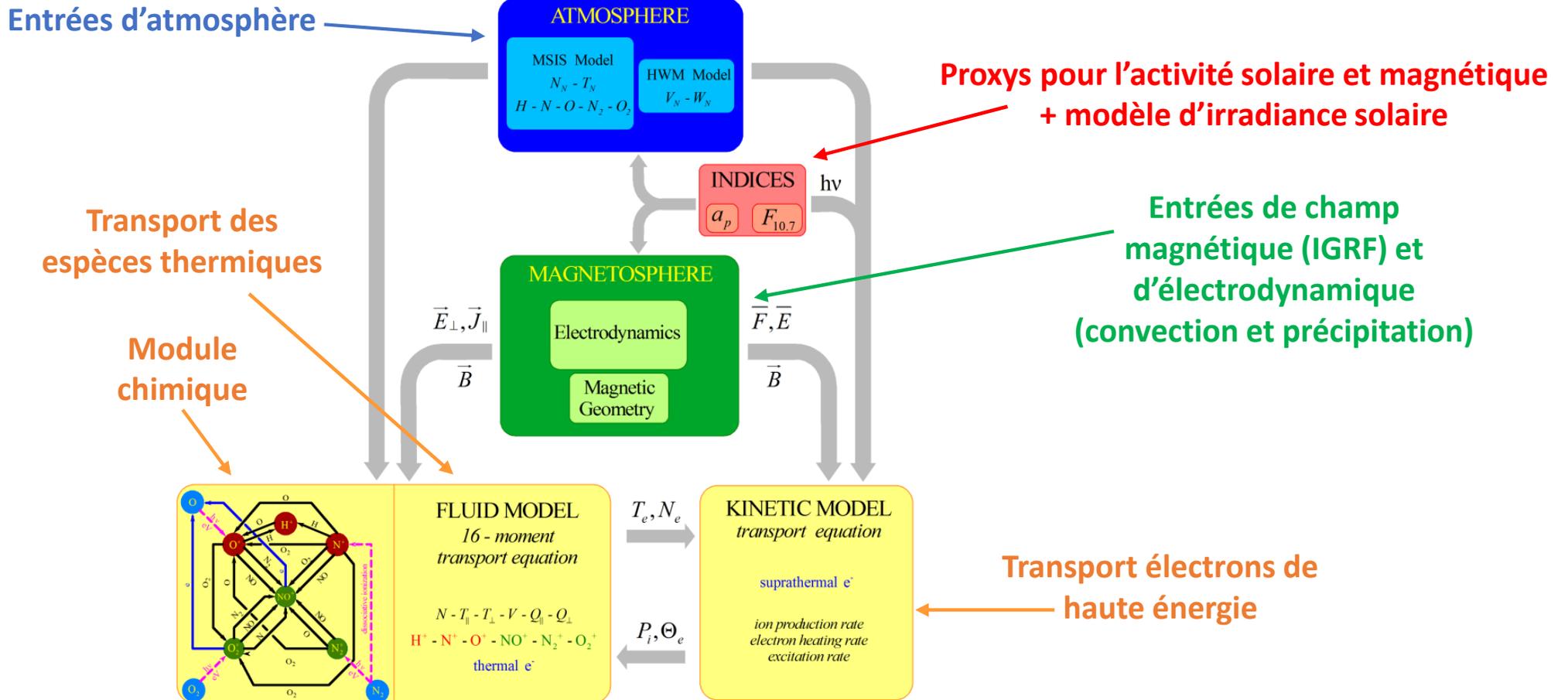


• **Modèle fluide temps-dépendant** résolvant les équations de transport le long du champ B (16-moment) pour les :

- Ions légers
- Ions moléculaires
- Electrons thermiques

• **Modèle cinétique statique** résolvant les équations de transport pour les électrons suprathermiques

- **Sources** : électrons primaires (ex : photoelectrons) et secondaires
- **Pertes** : collisions avec neutres et électrons thermiques



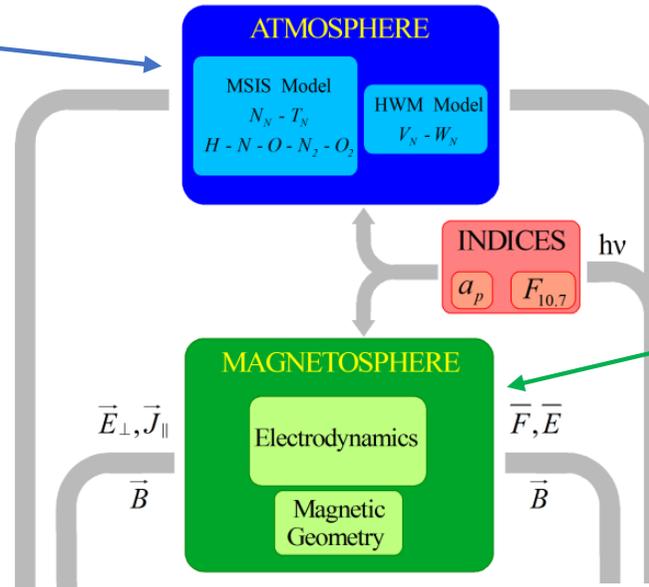
Couplage dynamique entre modèles fluide et cinétique

- Modèle fluide fournit densité et température électroniques N_e et T_e
- Modèle cinétique fournit en retour taux de ionisation et chauffage des électrons thermiques

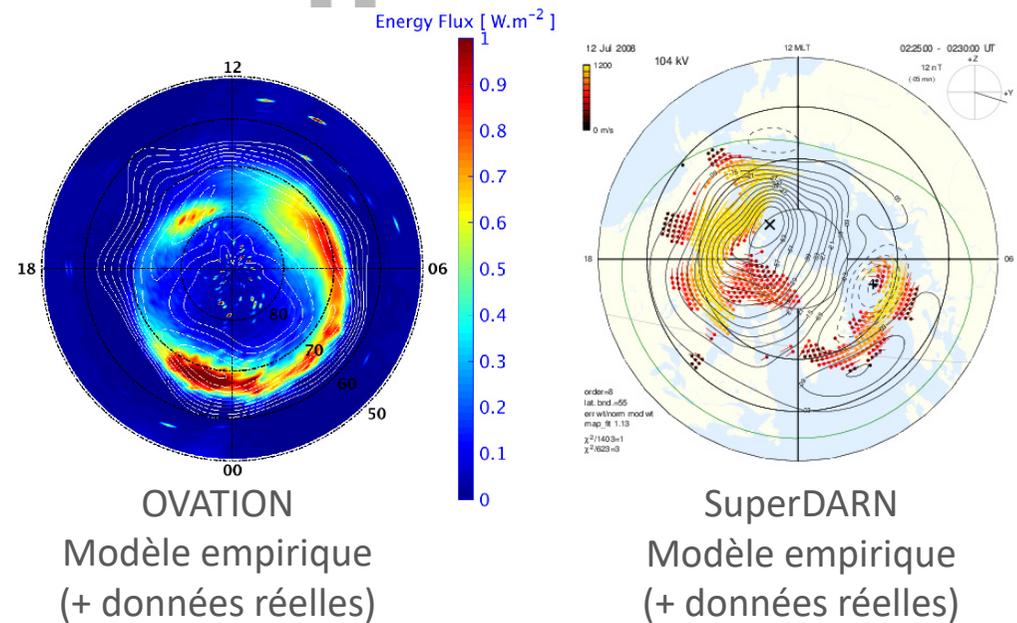
- Forçage magnétosphère - vent solaire à hautes latitudes
- Forçage thermosphère – moyenne atmosphère toutes latitudes

Entrées atmosphériques
NRLMSISE-00 / HWM-14
corrigé par les données (ex :
satellite, caméra airglow)

ou modèle physique
(TIEGCM, WACCM-X)

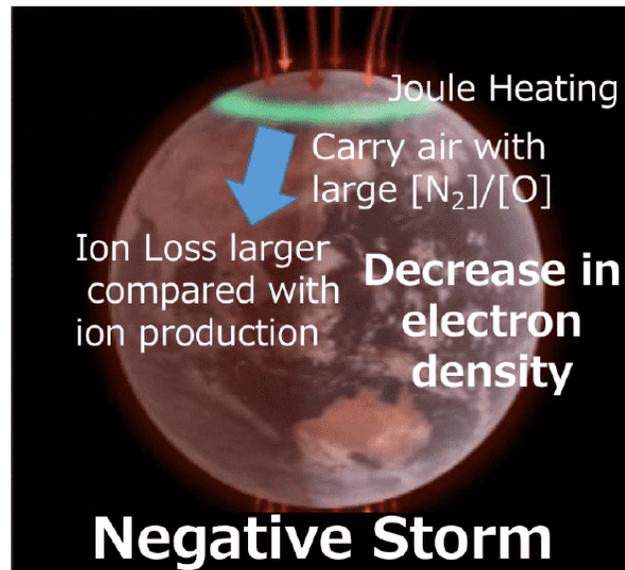
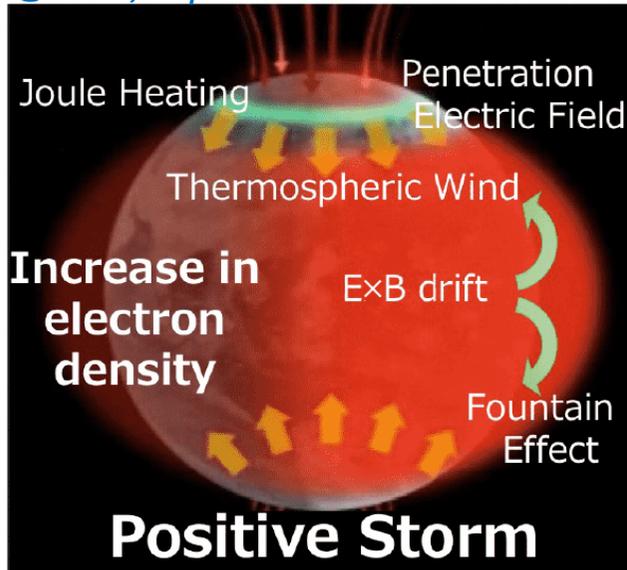


Entrées électrodynamiques
Précipitation OVATION
Convection SuperDARN

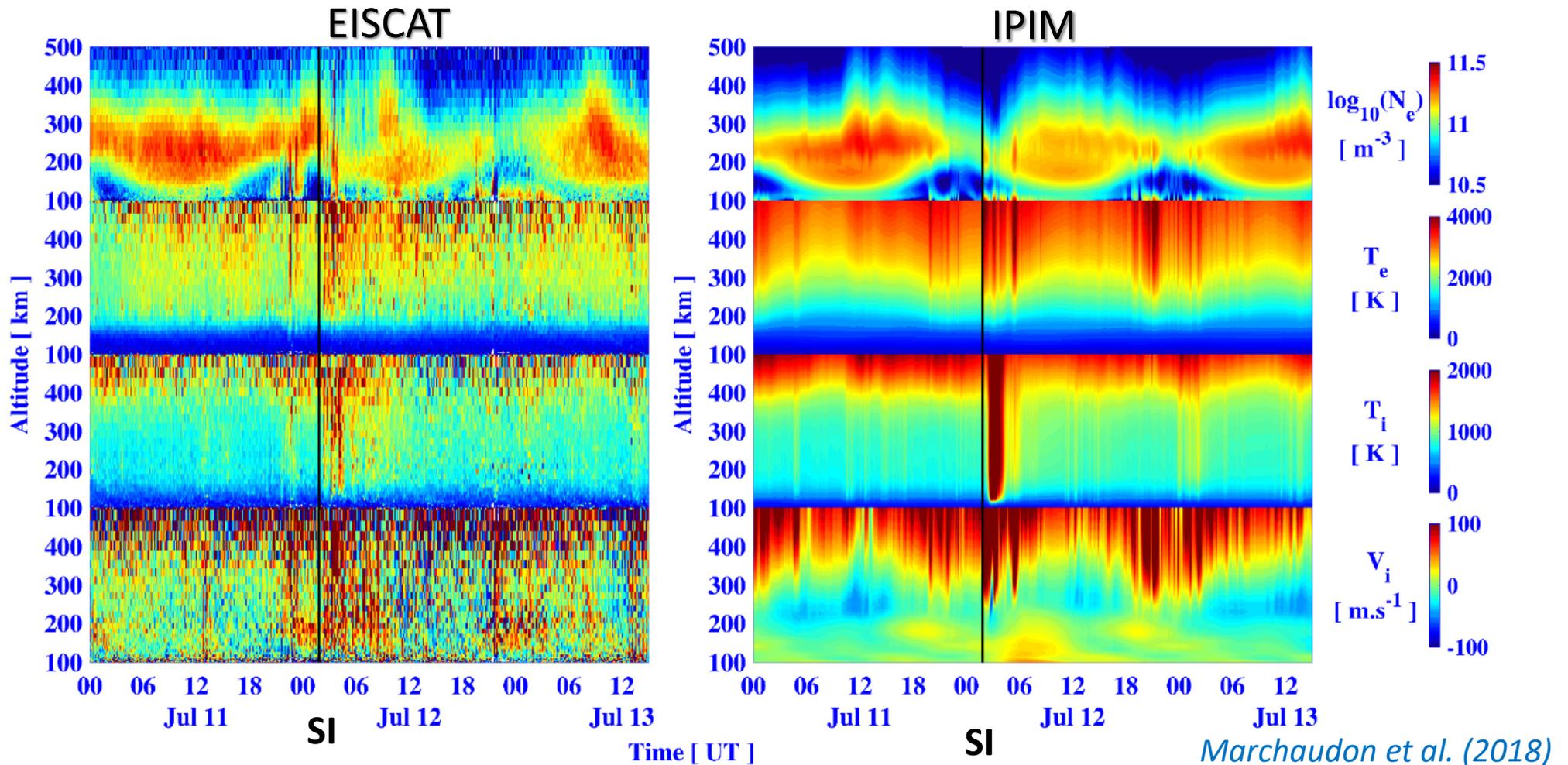


3.a Quelques grandes questions scientifiques liées à ces régions : relations Soleil-Terre en période d'orages magnétiques

@NICT, Japan

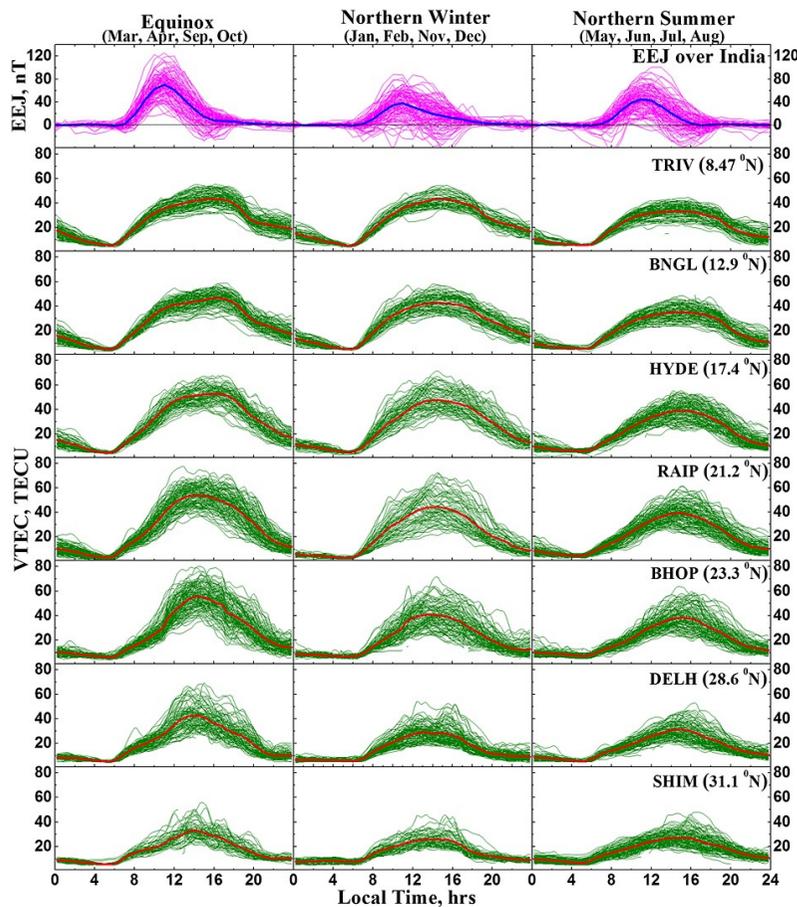


- Où se fait le dépôt d'énergie par chauffage Joule à haute latitude, causé par le couplage avec le vent solaire (électrodynamique et friction ions-neutres), et quelle sa contribution quantitative ? (*facteur 2 à 3 entre estimations*)
- Quelle est la propagation (direction, vitesse) des perturbations associées dans la thermosphère (vent, chimie) ? (*manque d'observations cruciales de cette région → IPAG*)
- Comment l'histoire du système ionosphère-thermosphère modifie sa réponse spatio-temporelle lors d'un orage ?



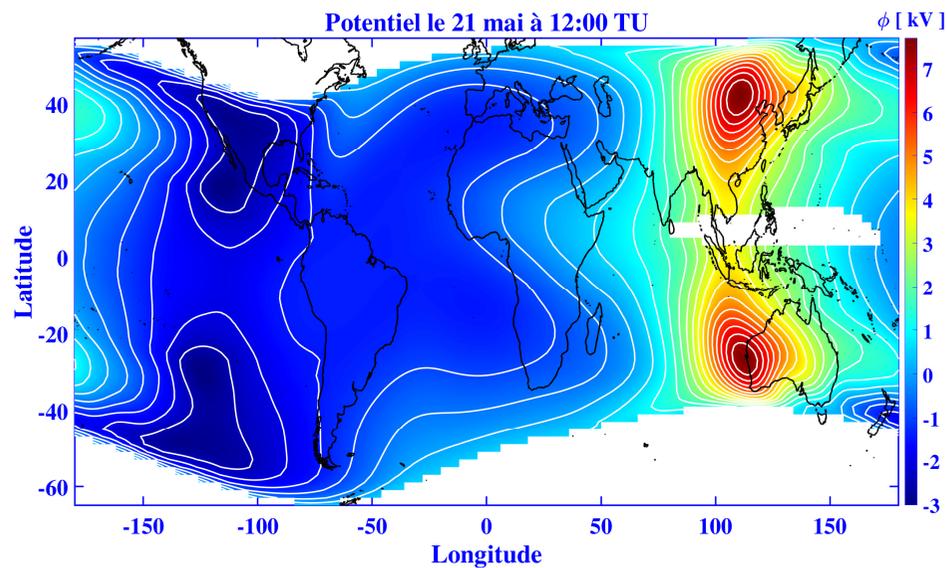
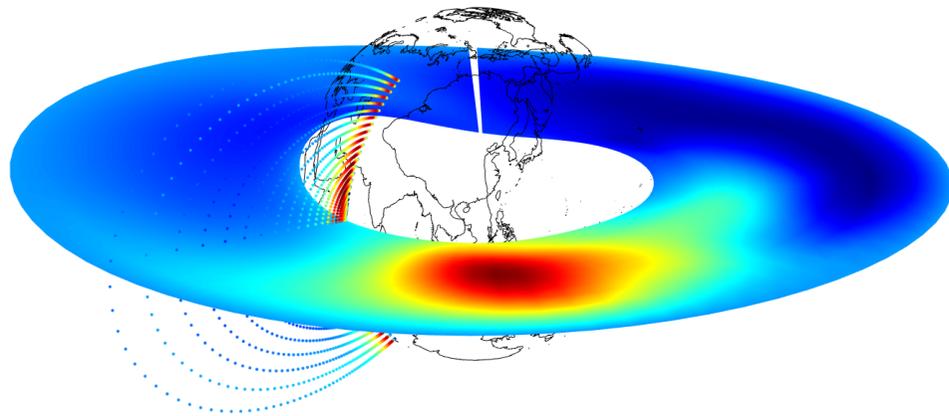
- **Bon accord entre simulation IPIM et observation** du radar incohérent d'EISCAT-Tromsø (Norvège) pour les densité et température électroniques, température et vitesse ioniques + paramètres non observés
- **Lourd travail d'ajustement des entrées** d'électrodynamique (convection SuperDARN, précipitation) et de thermosphère (densité, température) nécessaire → **automatisation**

3.b Quelques grandes questions scientifiques liées à ces régions : rôle de la basse atmosphère dans la variabilité jour-à-jour

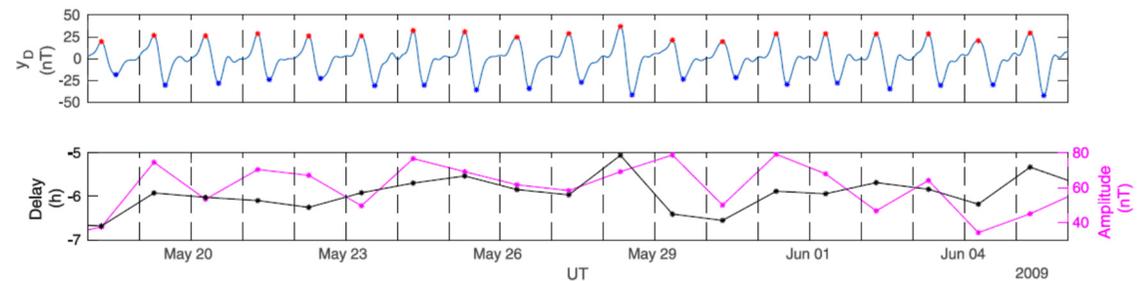


- Comment prendre en compte la variabilité jour-à-jour de la thermosphère pour modéliser l'ionosphère quand on ne sait pas ce qui la produit ? *(marées, ondes de gravité, vortex polaire, autre ?)*
- Peut-on utiliser l'ionosphère, mieux contrainte par les observations, pour obtenir des informations quantitatives sur la thermosphère ? *(manque d'observations cruciales de cette région → IPAG)*
- Peut-on correctement modéliser l'ensemble de l'atmosphère (basse-moyenne-haute) ?

- Extension d'IPIM vers l'équateur en prenant en compte l'électrodynamique équatoriale drivée par la thermosphère (vent neutre)
- Description des systèmes de courants équatoriaux et à moyennes latitudes
- Comparaison aux observations - ex : magnétomètres au sol, TEC-GNSS

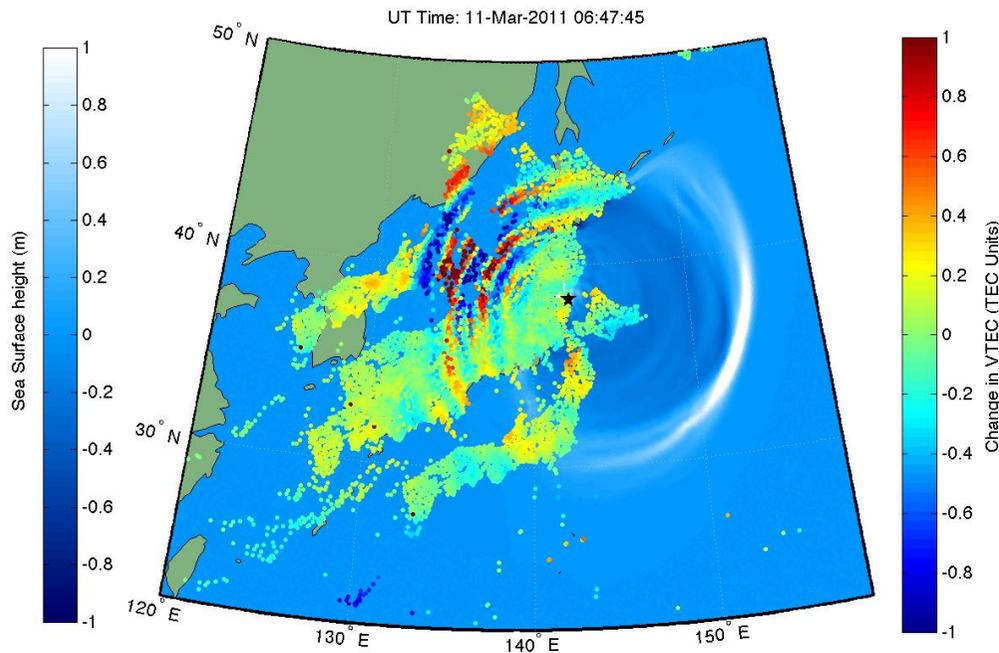


Cartes de potentiel électrique IPIM (plan équatorial et ionosphère)



- Réinjection des observations dans le modèle IPIM pour contraindre la thermosphère et sa variabilité jour-à-jour → utilisation technique IA dans IPIM (LabCom IRAP-TAS)

3.c Quelques grandes questions scientifiques liées à ces régions : l'ionosphère, miroir des processus géophysiques internes



- Peut-on suivre la propagation des séismes et des tsunamis (vitesse, front d'onde) à partir de leur observation dans l'ionosphère ? *(et prévoir)*
- Comment peut-on relier les différents types d'onde (interne, surface, atmosphère, ionosphère) ?
- Travaux pionniers par l'IPGP et l'OCA (données TEC-GNSS et airglow)

*Propagation des ondes suite au séisme de Tohoku en Mars 2011 à la surface et dans l'ionosphère
Données TEC-GNSS, @NASA/JPL-Caltech*

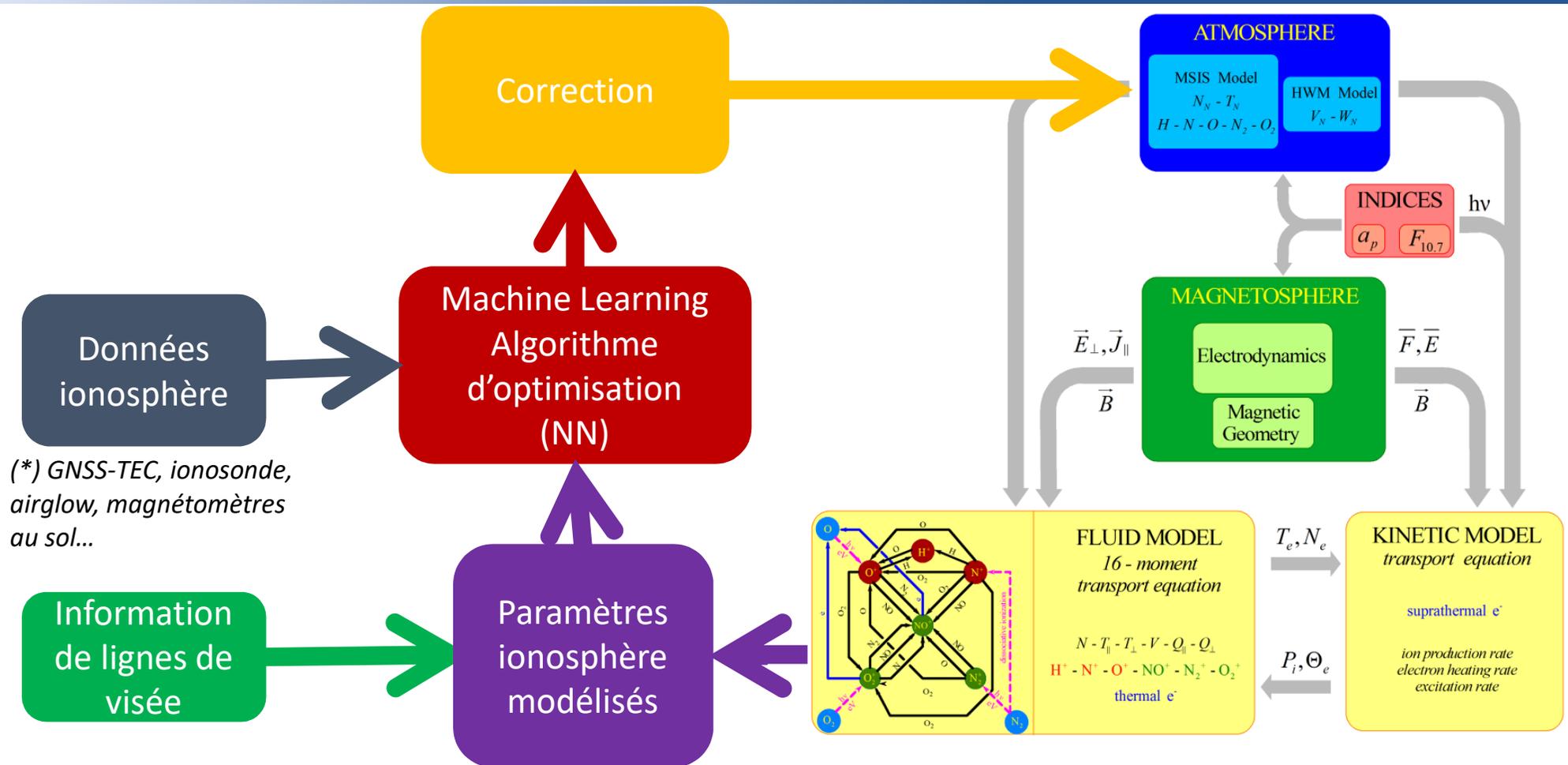
4. Conclusions et perspectives

- **Encore quelques challenges quantitatifs pour améliorer la compréhension du système thermosphère-ionosphère, ses couplages et sa modélisation**



Crédit: Neil Zeller

- **Encore de belles découvertes possibles dans l'ionosphère :**
 - Emissions subaurorales STEVE découvertes il y a moins de 10 ans (amateurs) et dont les mécanismes d'émission ne sont pas résolus à ce jour !



(*) GNSS-TEC, ionosonde, airglow, magnétomètres au sol...

- 1^{ère} étape: analyse de sensibilité des résultats du modèle IPIM en fn des paramètres d'entrées et identification des paramètres produisant le plus d'impact
- 2^{ème} étape : entraînement d'un réseau de neurones sur un jeu de simulations IPIM avec pour but la pré-calibration de paramètres d'entrées (ex : thermosphère) et obtention de la meilleure simulation possible de l'ionosphère

→ Meilleure prévision ionosphérique en périodes calmes et perturbées :
Météorologie de l'Espace (LabCom IRAP-Thalès Alenia Space)

- Réseau mondial d'ionosondes (dont France à Lannemezan)
- Radars dans la gamme du MHz (couverture : 1-12 MHz)
- Balayage en fréquence avec réflexion de l'onde pour la fréquence plasma locale du milieu
- Valable tant que la densité électronique N_e croît avec pas d'accès aux altitudes plus hautes que le maximum de Région F
- **Reconstruction de la densité électronique N_e (alt : 100-400 km) sur de larges couvertures spatiales**

