

*L'ionosphère :
Élément critique pour
la Météorologie de l'Espace*

Pierre-Louis BLELLY
Aurélie MARCHAUDON
IRAP

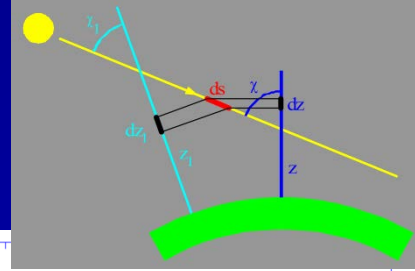
Plan

- Formation
- Contribution à la Météorologie de l'Espace
- Mesure et caractérisation
- Comment prédire
- L'assimilation de données : un enjeu pour l'avenir

L'ionosphère

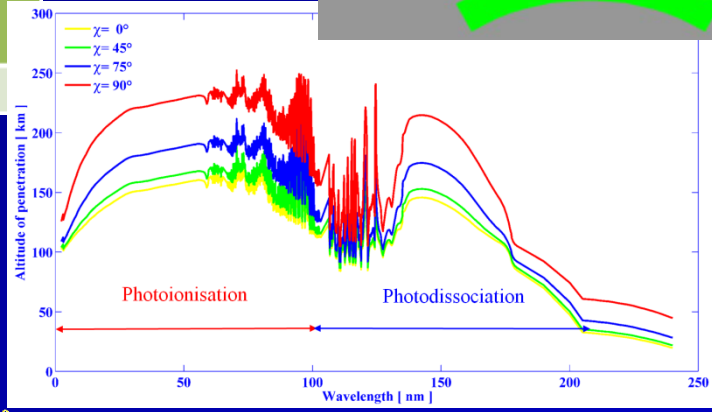
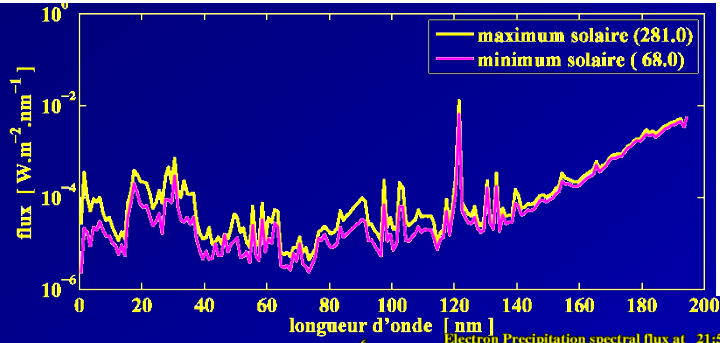
- Identifiée dès le début du 20^{ème} siècle
 - Par des moyens radio
 - Marconi (1901)
 - Kennely et Heaviside (1902)
 - Appleton et Barnett (1925)
- Couche ionisée de l'atmosphère
 - Associée aux couches ultimes de l'atmosphère
 - ✓ Thermosphère et exosphère
 - Ionisation des constituants neutres

Sources de production

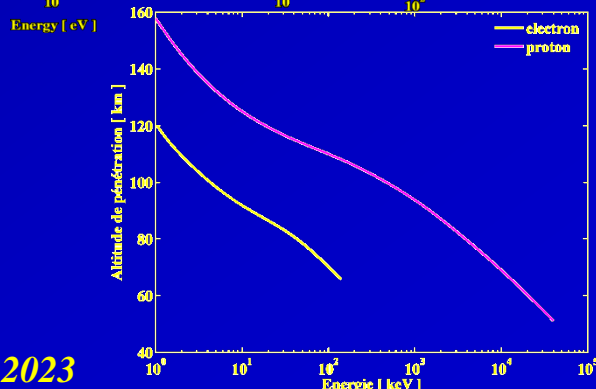
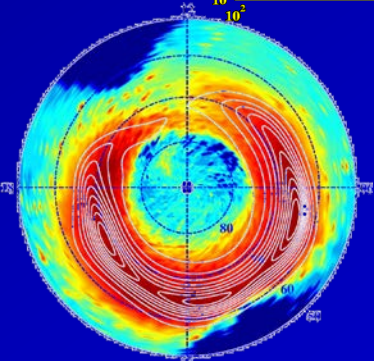
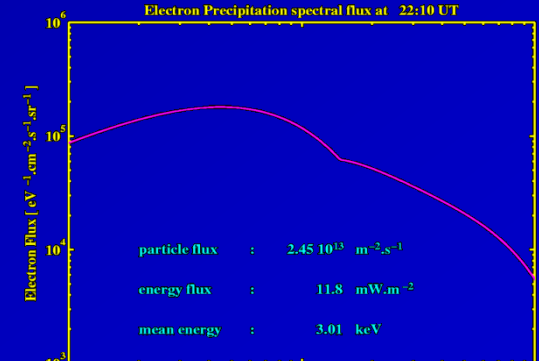
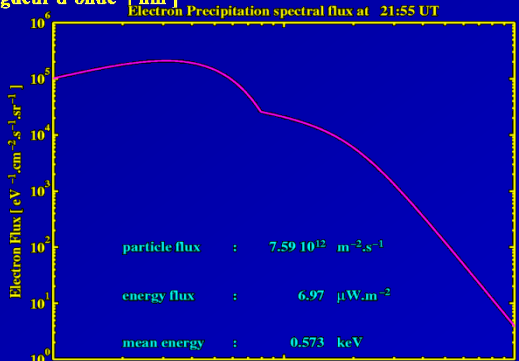


- Le Soleil
 - puissante
 - Stable
 - Éruptions

Energie solaire (GW)	Minimum	Maximum
EUV	210	633



- La magnétosphère
 - Hautement variable
 - ✓ Flux
 - ✓ énergie
 - Large spectre
 - 100 GW

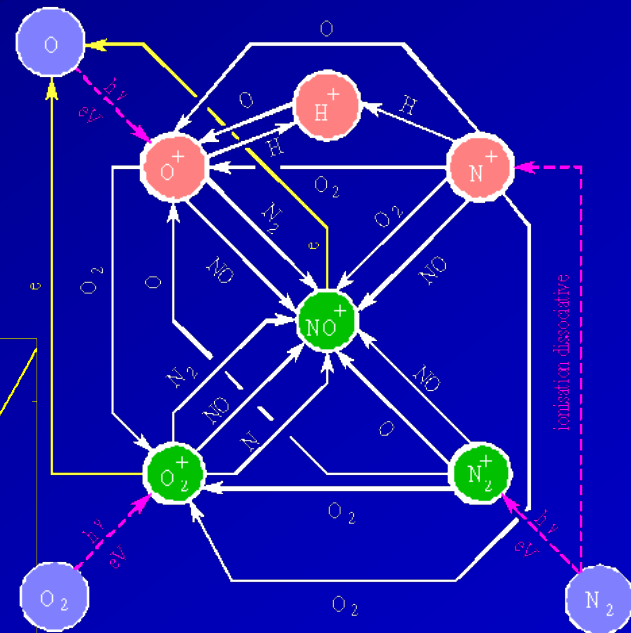
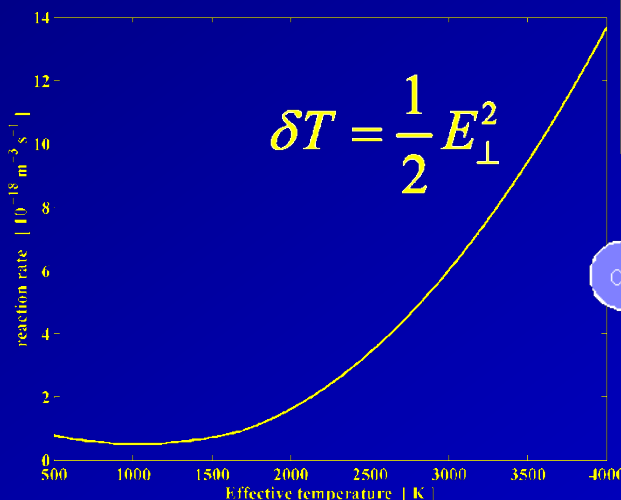


SFP 4 Juillet 2023

Son équilibre

- La chimie

- Production / perte d'ions
- Redistribution des espèces dominantes
- Forte sensibilité à l'énergie interne



- Le transport

- Électrodynamique

- ✓ Loi d'Ohm

- Effet Joule : 200 à 500 GW

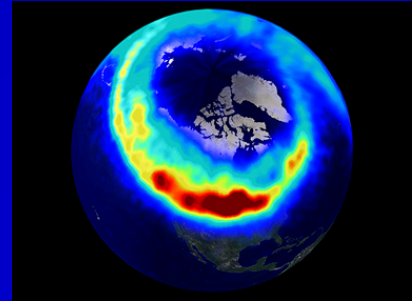
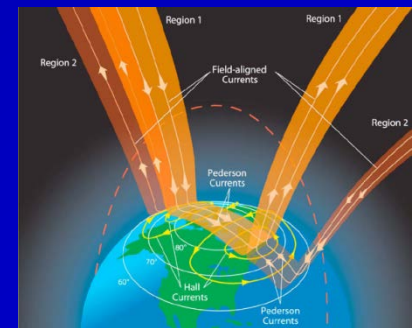
- ✓ Effet du champ magnétique

- La diffusion

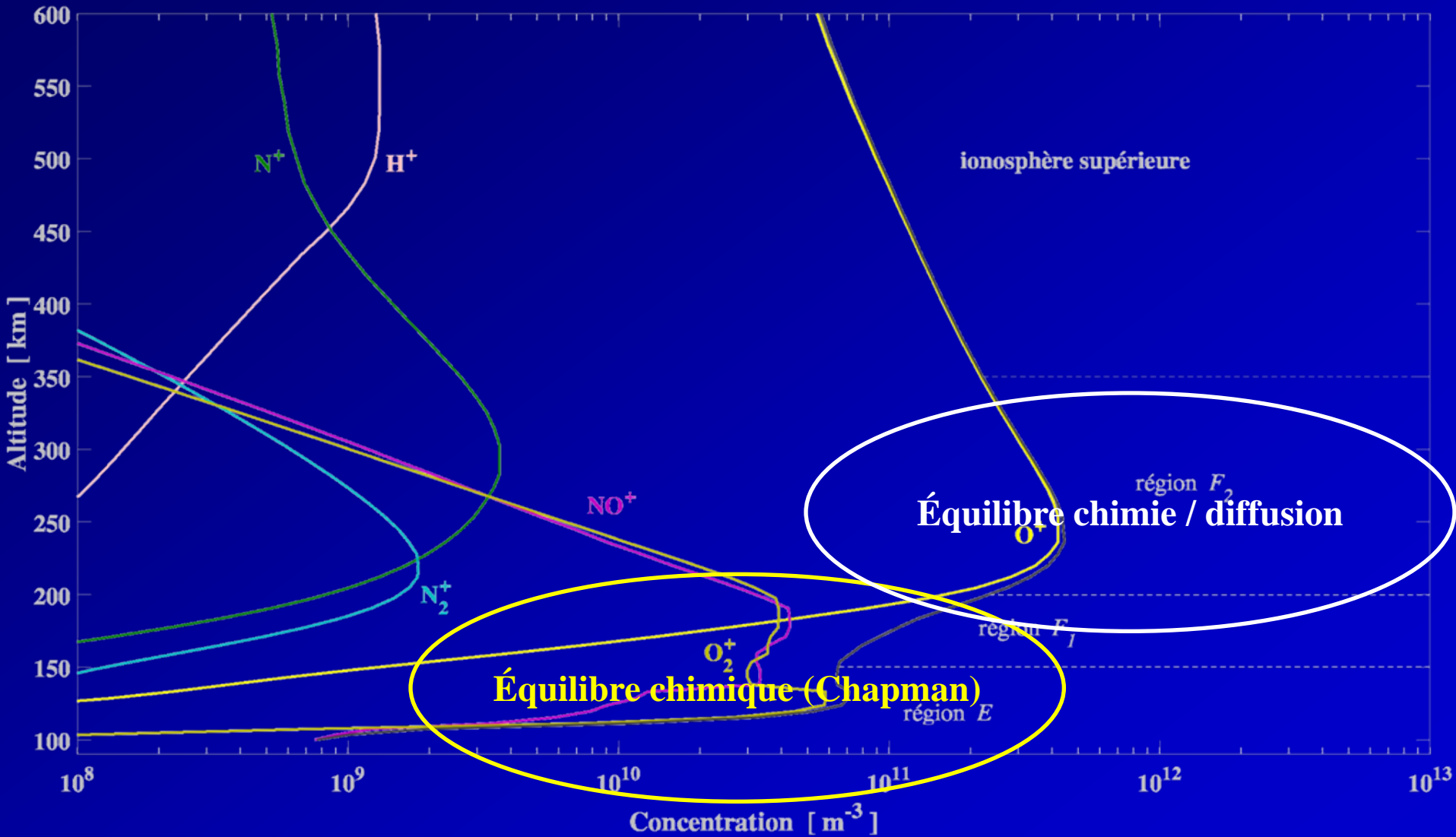
- ✓ Effet des neutres

- ✓ Milieu multi-espèces ionisées

- ✓ Polarisation du milieu par le biais des électrons

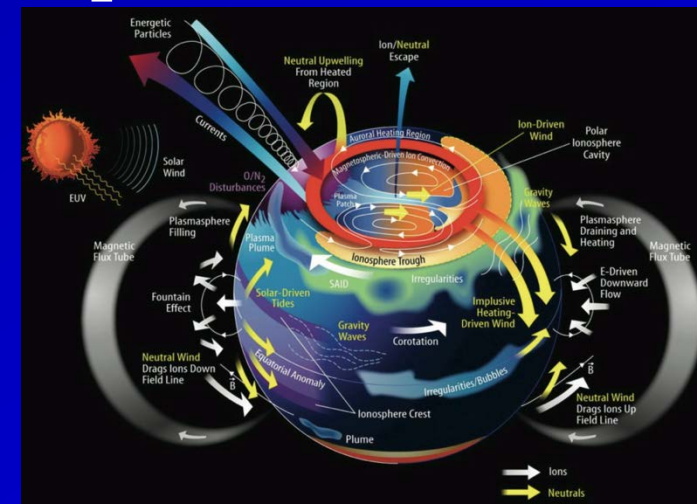


La structure en couches



Pourquoi s'y intéresser

- Élément clé du système MIT
 - Critique pour l'électrodynamique globale
 - ✓ Fermeture du système de courant
 - Critiques pour les couplages
 - ✓ Transfert d'énergie vers l'atmosphère
 - ✓ Transfert de particule vers la magnétosphère
- Fort impact en météorologie de l'espace
 - Dans l'espace
 - ✓ Communications sol-espace
 - Au sol
 - ✓ Perturbations des infrastructures



Freinage des satellites

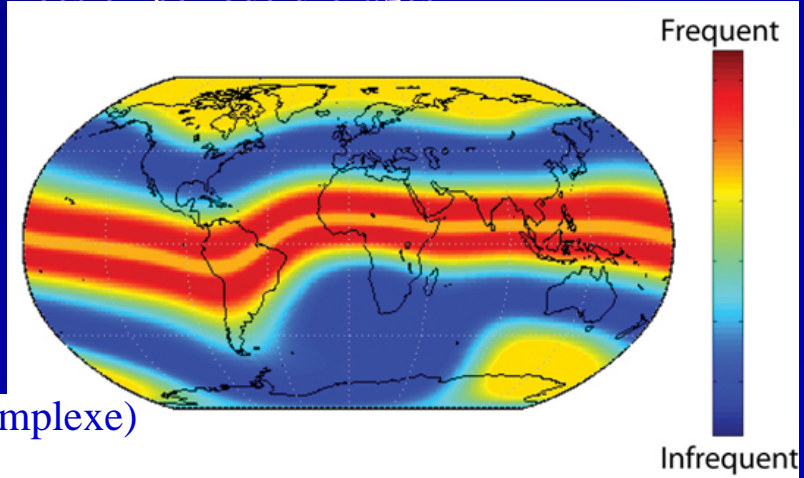
- Chauffage de la haute atmosphère
 - courants ionosphériques intenses
 - précipitations de particules
- Expansion de l'atmosphère
 - Augmentation de la densité atmosphérique
 - Forte variation à haute altitude
 - Satellites freinés



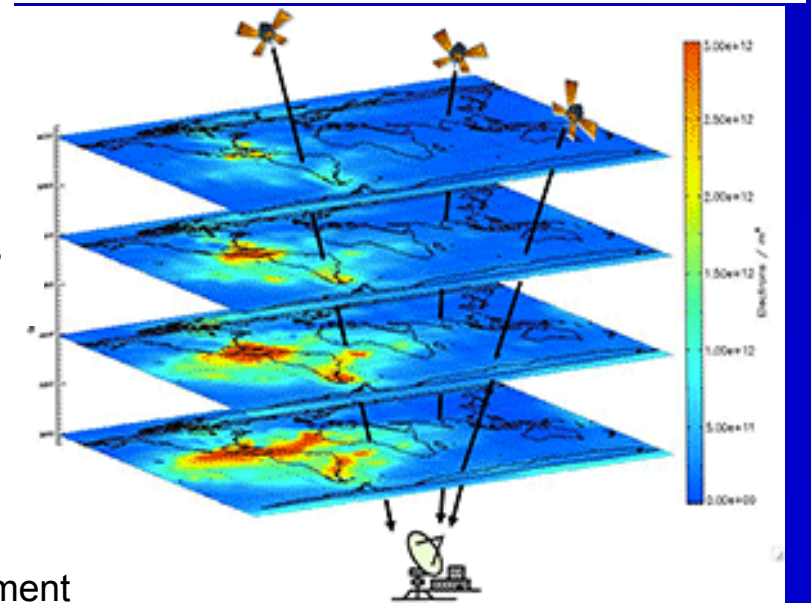
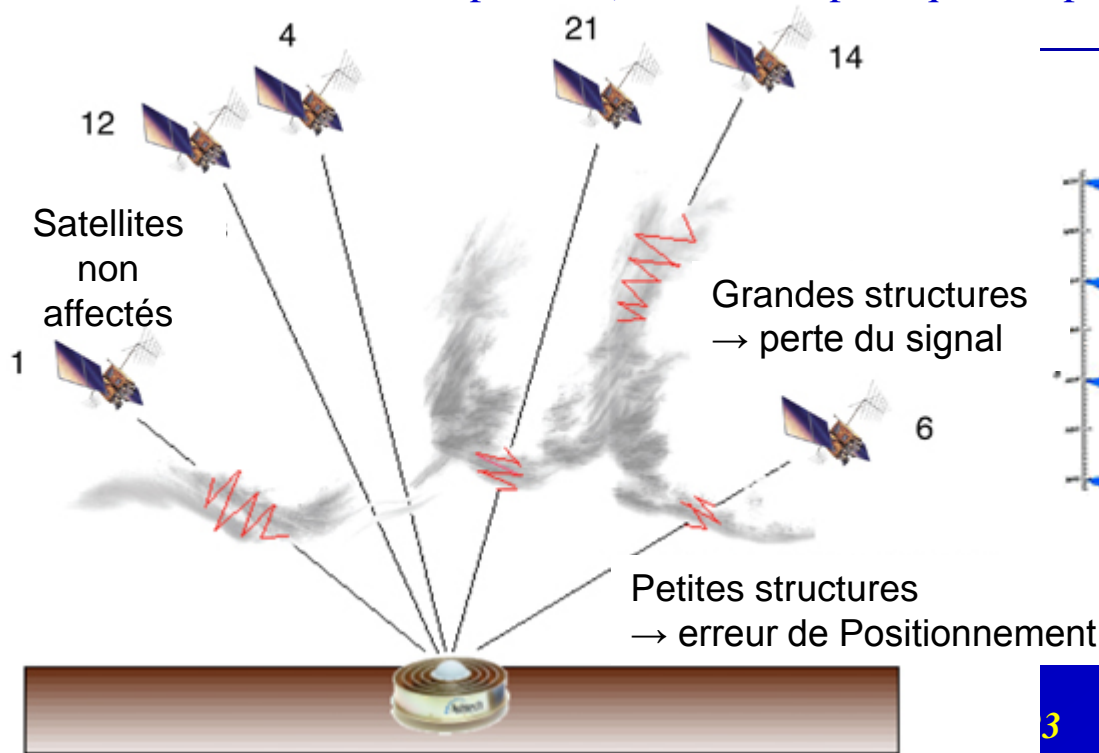
- Perturbation de trajectoire
- Freinage
 - Descente en altitude
 - ✓ Accroissement de la vitesse
 - ✓ Accroissement du freinage
 - Nécessite du carburant pour remonter l'orbite

Scintillations

- Irrégularités de l'ionosphère (en espace et en temps) amplifiées en période d'orages
- Surtout présentes à l'équateur et près des pôles
- Structures de petite échelle:
 - ⇒ Erreur de positionnement (jusqu'à 100 m)
- Structures de grande échelle:
 - ⇒ Perte totale du signal



⇒ Perturbations difficiles à prédire (milieu ionosphérique complexe)



Absorption des ondes radios HF

- Augmentation de l'ionisation de l'atmosphère
 - Augmentation des précipitations de particules dans l'atmosphère
 - Augmentation du flux XUV / EUV

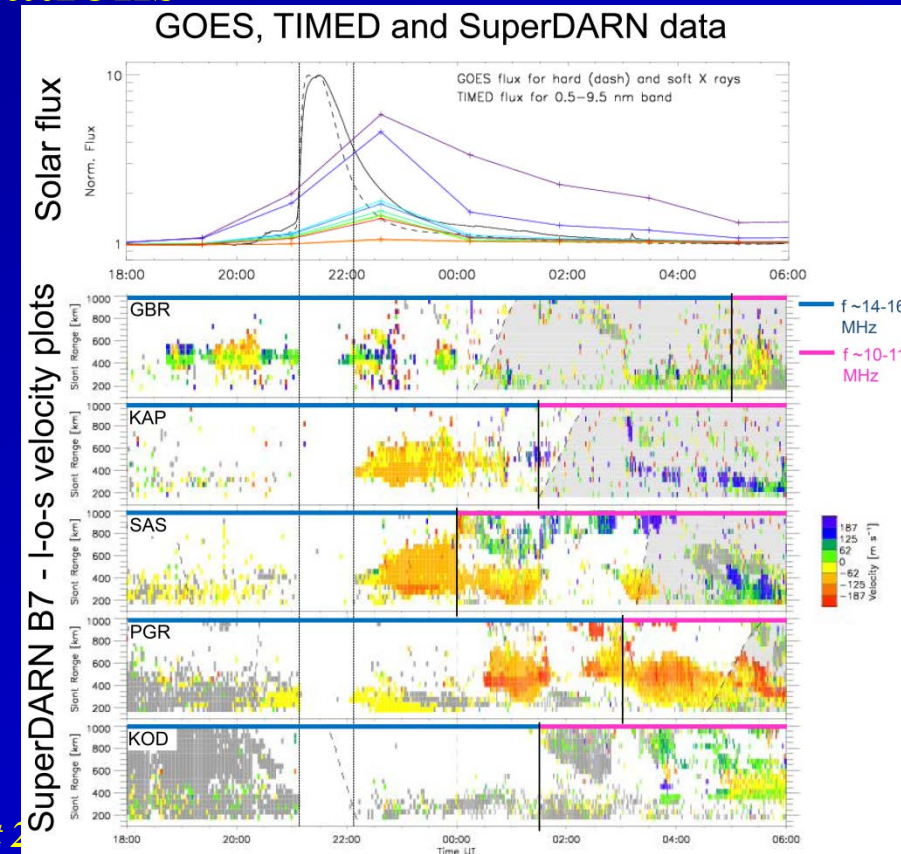
$$N^2 = 1 - \frac{f_p^2}{f^2}$$

- Absorption des ondes radios HF

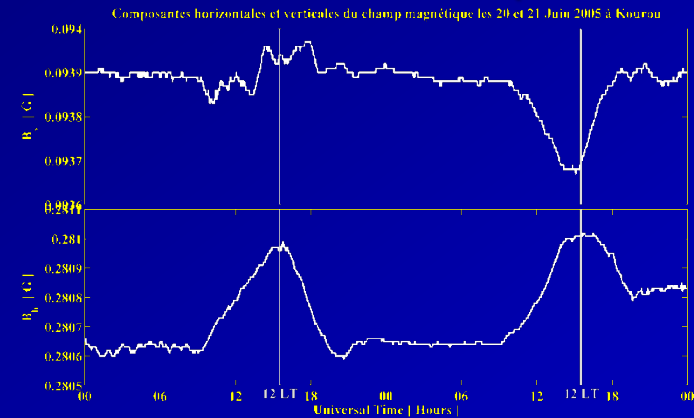
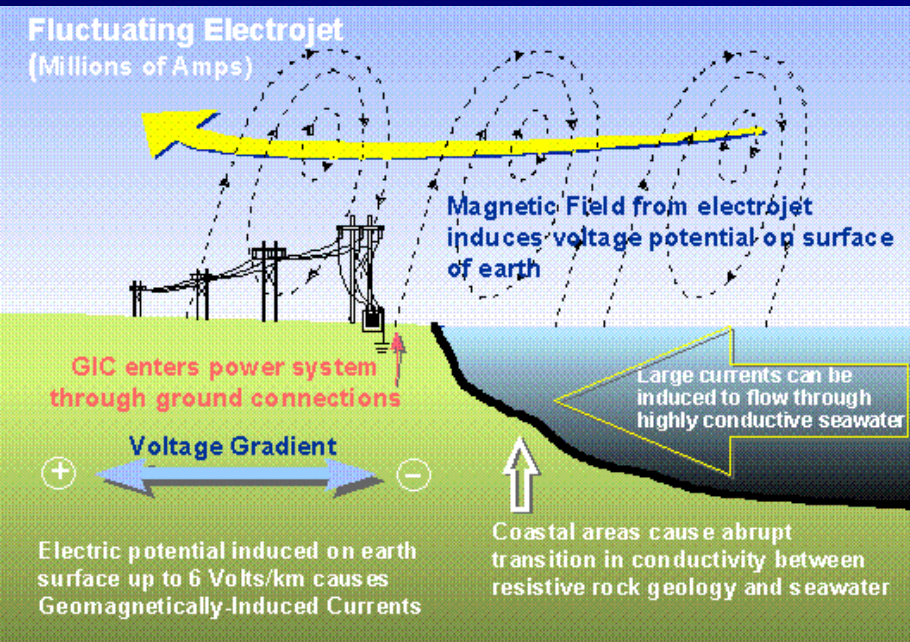
⇒ Interruption des communications

- Bandes utilisées par

- Aviation civile
- Marine
- Secours
- Armée



Courants induits dans le sol (GIC)



- Courants ionosphériques intenses
- Génèrent en retour des courants induits intenses (GIC) :
 - - dans la croûte terrestre si matériau ferromagnétique
 - - à la surface : dans les pipelines, les lignes électriques à haute tension



⇒ Perturbations / surchauffe des réseaux électriques et des transformateurs

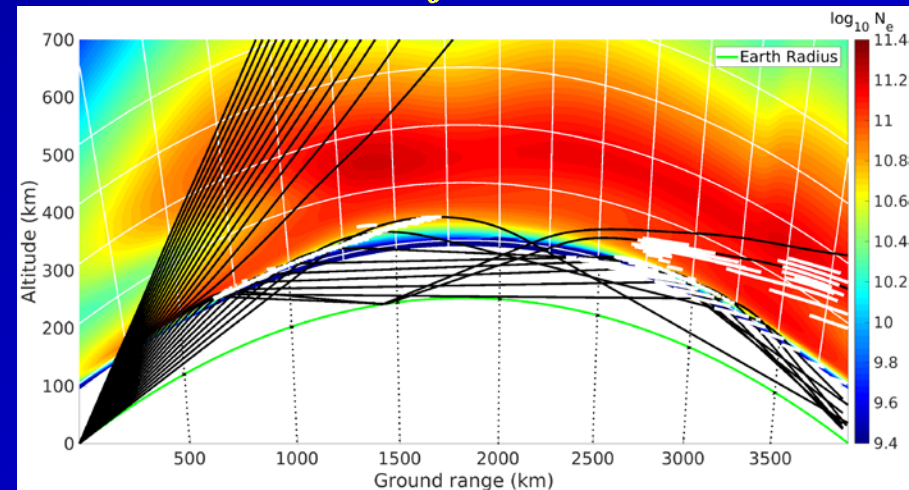
*Transformateur détruit suite à une surchauffe (Hydro-Quebec)
Longue panne de courant sur le Nord-Est du continent américain*

Juillet 2023

Appréhension du milieu

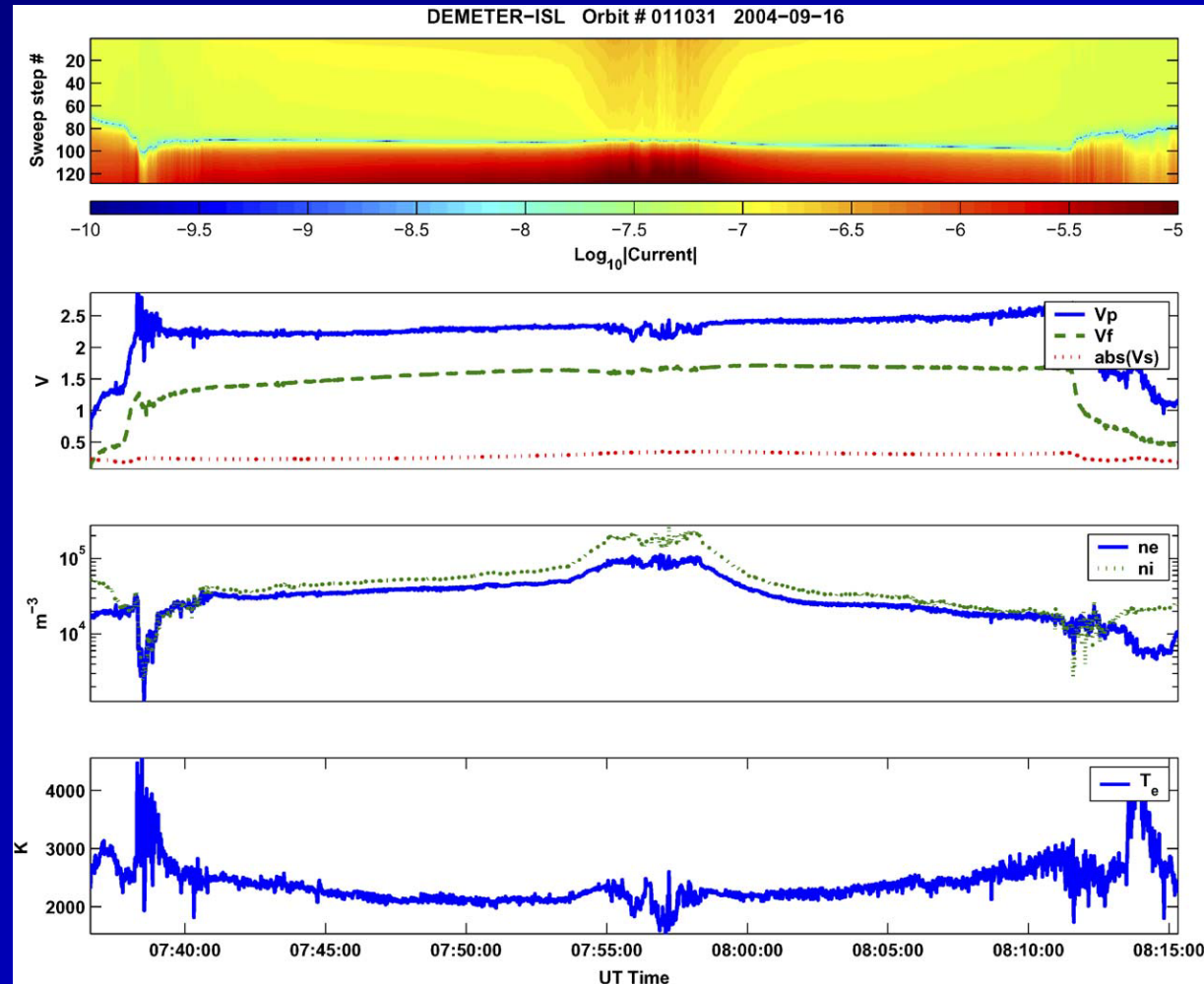
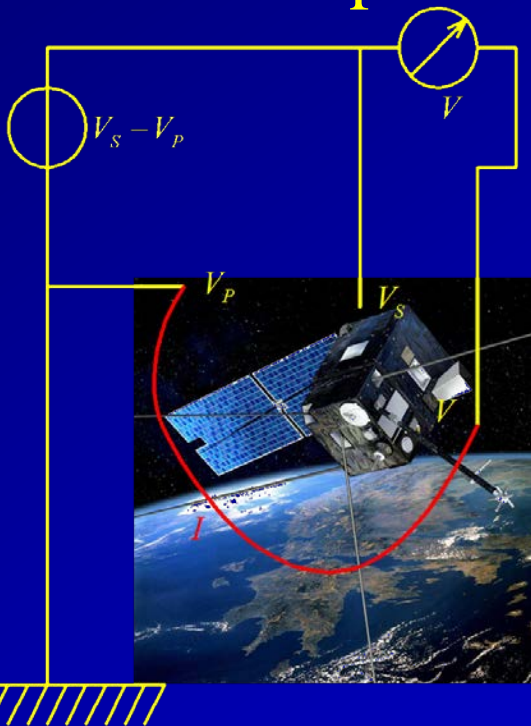
- La mesure est souvent reliée au problème posé
 - Mesure par impact de l'ionosphère
- Propriétés du milieu
 - Chargé
 - ✓ Conducteur
 - Réfringent
 - ✓ Indice dépendant de la concentration
 - ✓ $N \leq 1$
 - Réflecteur
 - ✓ Électrons diffuseurs
- Modes
 - In situ
 - À distance

$$N^2 = 1 - \frac{\alpha}{f^2} n_e$$



La sonde de Langmuir

- Propriété électriques
 - conduction
- Mesure V-I
 - Potentiel satellite
 - Potentiel plasma



L'ionosonde

- Propriétés électromagnétiques
 - Fréquence de coupure plasma
- Relation $n_e - z$ après inversion

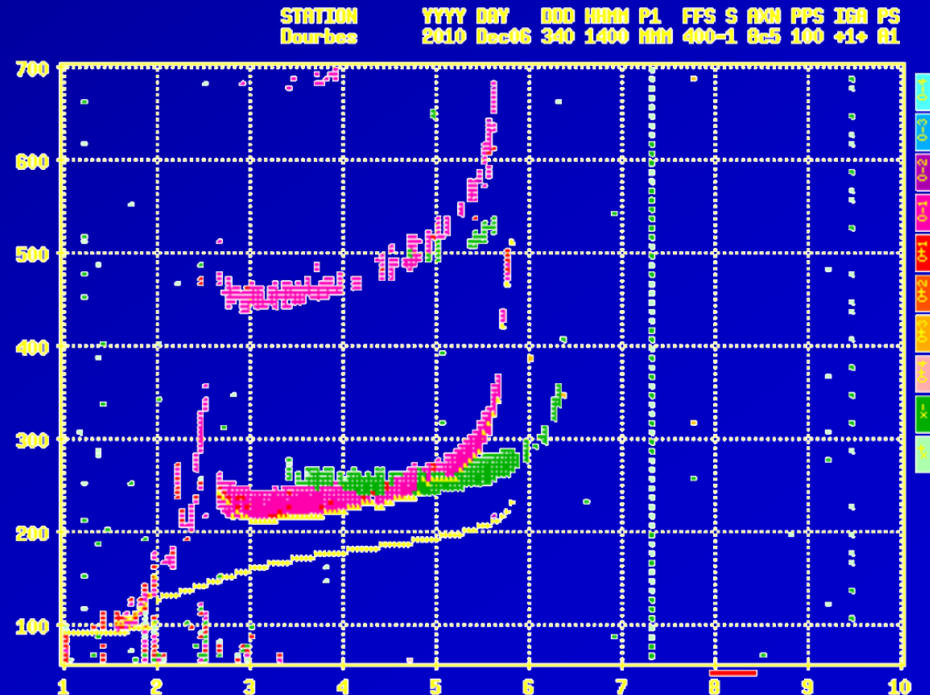
$$\tau(f) = \frac{2}{c} \int_{z_0}^{z_p} \frac{dz}{\sqrt{1 - \frac{f_p^2(z)}{f^2}}}$$



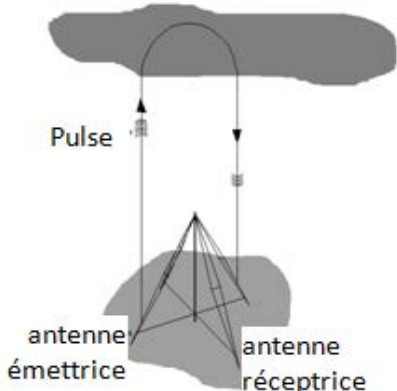
Fréquences de coupure

f _o F ₂	5.00
f _o F ₁	M/A
f _o F _{1p}	M/A
f _o E	1.96
f _o Es	2.07
f _o I	6.30
f _{min}	1.95
f _{min}	1.95
MUF	28.79
M	3.095
M	3000
h'F	210
h'F ₂	M/A
h'E	100
h'Es	100
h'F ₂	232
h'F ₁	M/A
h'E	100
yF ₂	77
yF ₁	M/A
yE	14
S ₃₀₀₀	67.0
S ₁	3.04
C-level	11

Hauteurs de couches



SFP 4 Juillet 2023



La Radio occultation

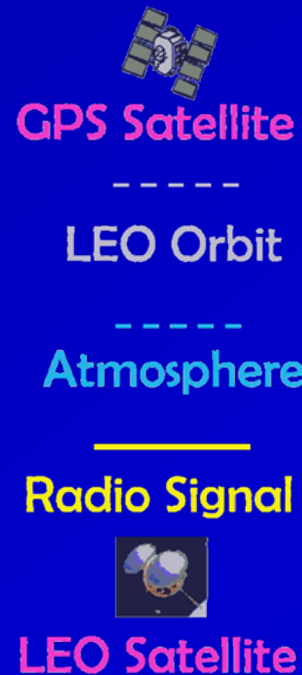
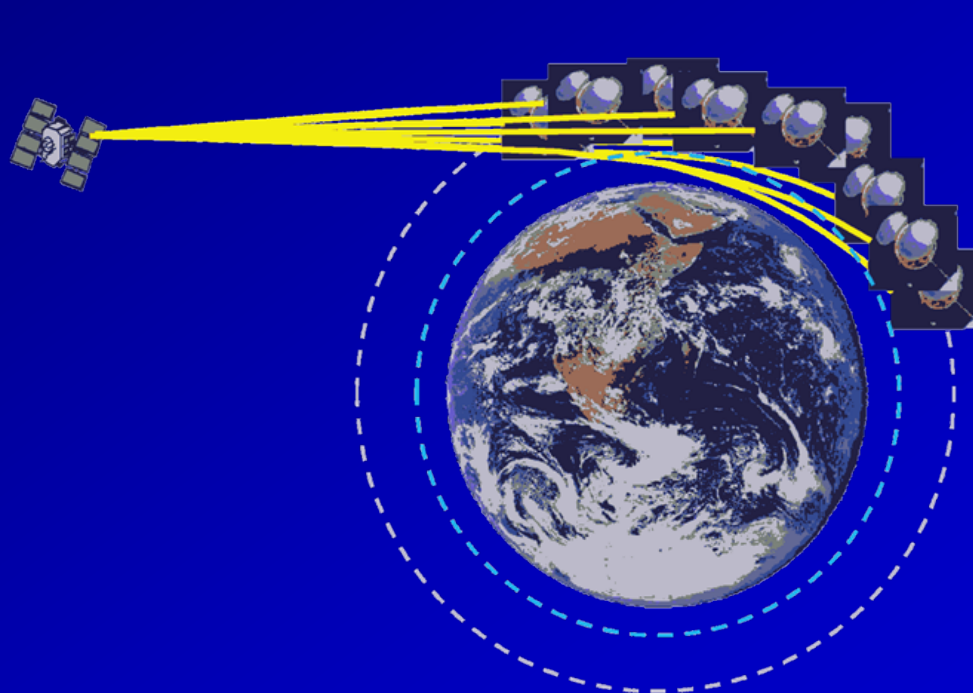
- Propriétés électromagnétiques

- Milieu réfringent

- Effet Doppler

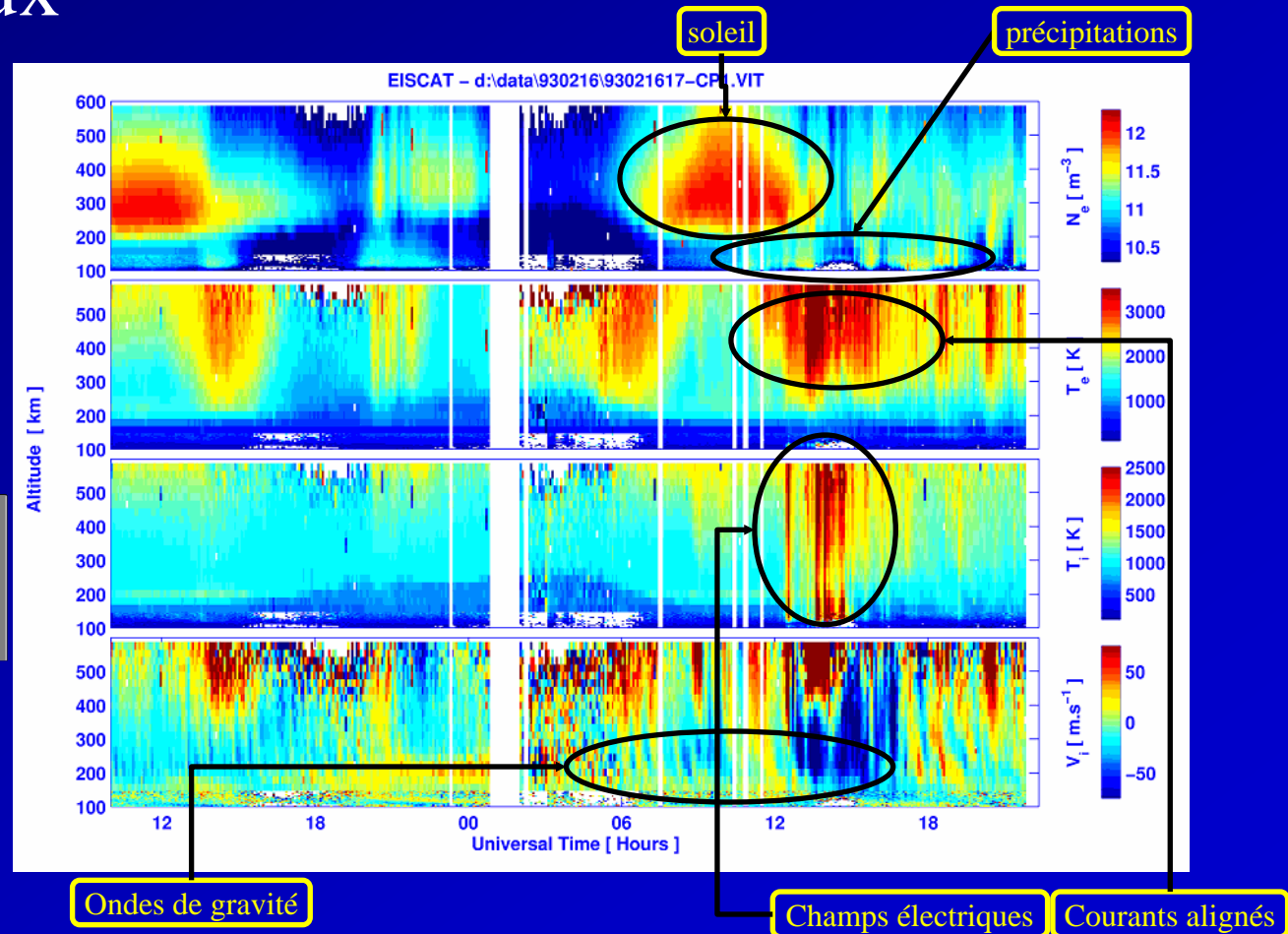
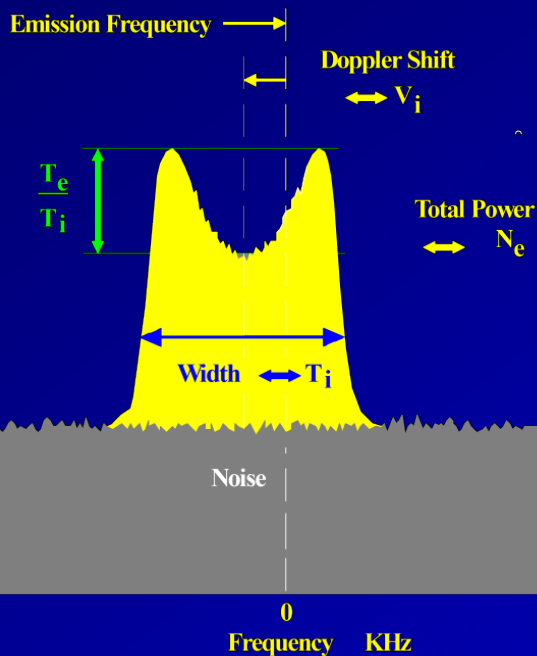
$$\frac{dr}{d\theta} = \frac{r}{a} \sqrt{n^2 r^2 - a^2}$$

- Mesure de la réfractivité α ($n - 1$)



La diffusion incohérente

- Electrons diffuseurs
 - Caractéristiques « thermodynamiques » du plasma
- Profils verticaux



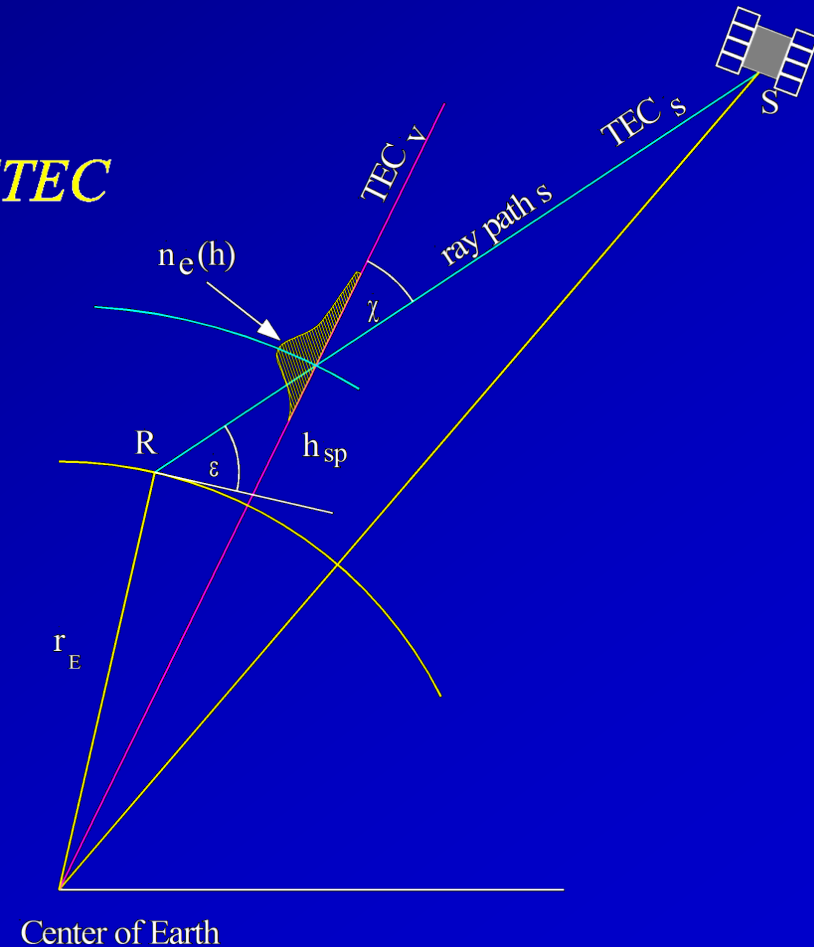
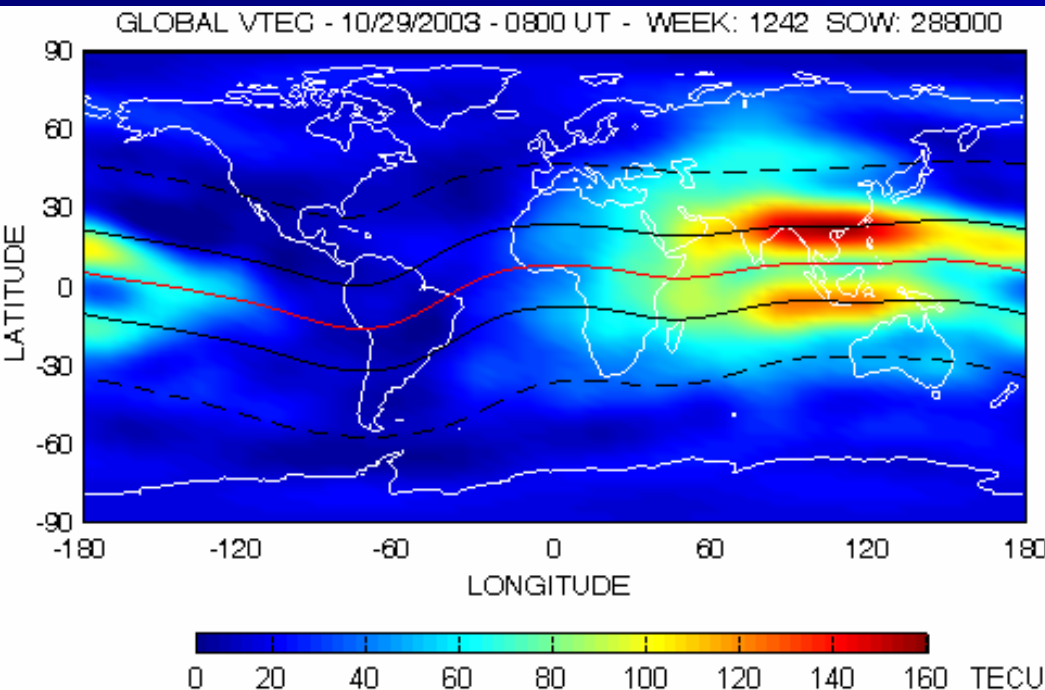
Le TEC

- Mesure du délai de propagation

- Bi-fréquence

$$PI = P1 - P2 = 40.3 \left(\frac{1}{f_2^2} - \frac{1}{f_1^2} \right) STEC$$

- Grandeur intégrée



Problème de la caractérisation

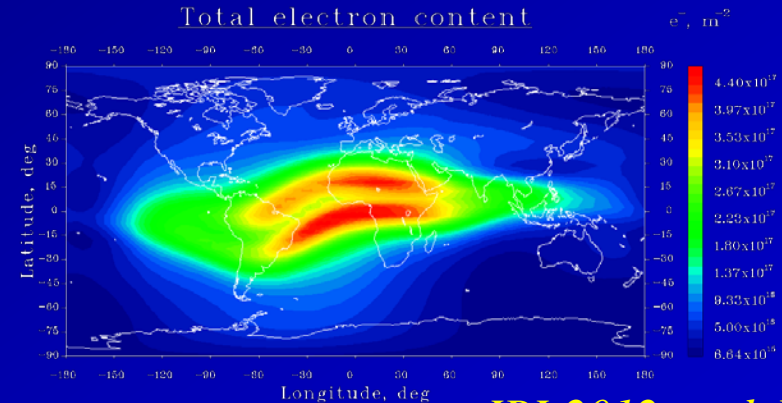
- Mesure indirecte
 - Nécessite des hypothèses fortes pour inversion
 - ✓ Problème de fiabilité
 - Exception : diffusion incohérente
- Mesure pauvre
 - Intérêt réside dans la quantité et la couverture
 - ✓ Spatiale
 - ✓ Temporelle
 - Faible coût
 - Exception : diffusion incohérente
- Immergée dans un environnement complexe
 - Réponse variable aux perturbations
 - ✓ Dépend de la nature du couplage
 - Effets directs
 - ✓ Réponse immédiate
 - ✓ Forte variabilité
 - Effets indirects
 - ✓ Impact à « long terme »

Comment s'en accommoder

- Modélisation ionosphérique
- Deux approches
- Modèles empiriques
 - Approche essentiellement mathématique
 - ✓ Développement sur des fonctionnelles
 - ✓ Pas de considérations physiques de couplage
 - Approche statistique
 - ✓ Jeux de données paramétrisés par des proxys
 - Ionosondes, radars à diffusion incohérente
 - Mesures satellitaires
- Modèles physiques
 - Résolution d'équations de transport
 - Prise en compte des couplages dans le système
 - Description cohérente multi-paramètres
 - ✓ Densité, vitesse température,...

Modèles empiriques

- Deux modèles de référence
 - IRI
 - ✓ Paramètres accessibles : N_e , $TEC + N_{ions}$, T_i , T_e , V_i
 - NeQuick
 - ✓ Paramètres accessibles : N_e et TEC
- Avantages
 - Rapidité et couverture globale
 - Bonne représentativité des conditions calmes
 - Assimilation de données
 - ✓ En cours
- Inconvénients
 - Faible représentativité en situation dynamique
 - ✓ Inapte à suivre un sous-orage magnétique
 - Paramétrisation pauvre
 - ✓ Pas d'entrées d'énergie par précipitation
 - ✓ Activité solaire : $F_{10.7}$
 - ✓ Activité magnétosphérique : K_p
 - Absence de couplages avec l'atmosphère neutre
 - Effet de la statistique
 - ✓ Variabilité jour à jour absente

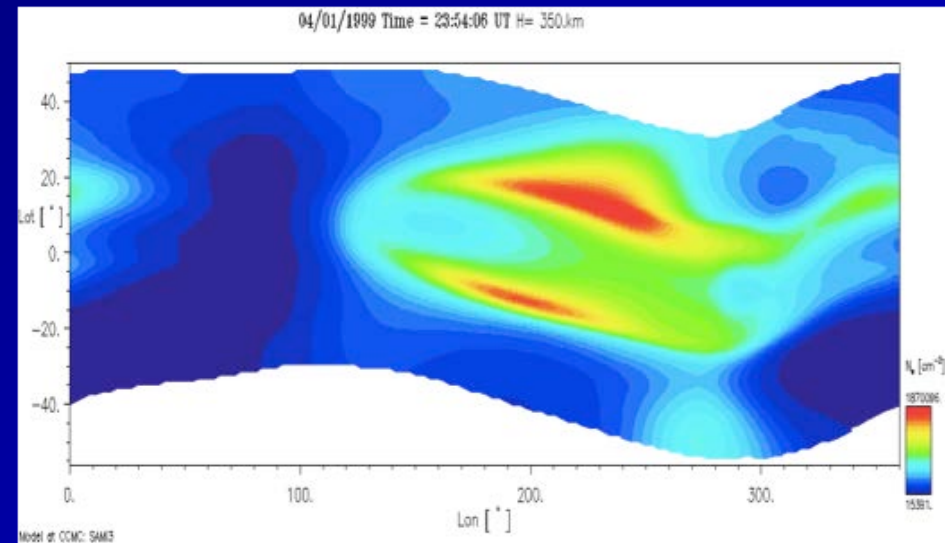


IRI-2012 model

Bilitza et al. (2011,2012)

Modèles physiques

- Plusieurs « familles »
 - Globaux 3D
 - Interhémisphériques
 - Hautes latitudes
- Avantages
 - Description physique
 - ✓ Échanges et transports
 - Transferts d'énergie
 - ✓ Couplages dans le système
 - Aptitude à suivre la dynamique spatio-temporelle
 - ✓ Événements violents
 - ✓ Aux échelles caractéristiques
- Inconvénients
 - Couteux en moyen et temps de calcul
 - ✓ Couplage d'échelles
 - ✓ Nécessité de « simplifications »



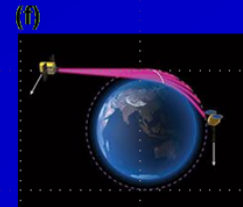
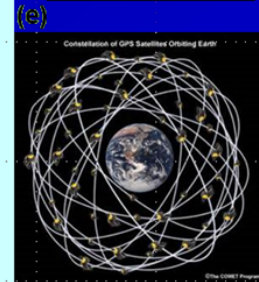
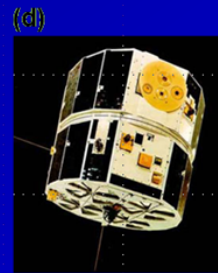
SAMI-3 model (Huba et al., 2008)

Approche temps réel

- IRI
 - Modèle du COSPAR
- Base de données large
 - Sources
 - Couverture
 - ✓ temporelle
 - ✓ spatiale



Data sources			
<i>Instrument</i>	<i>Platform</i>	<i>Parameter</i>	<i>Comments</i>
<u>Ionosonde</u>	Worldwide ~170 stations	N_e from E to F peak	From fifties to now
Incoherent scatter radar	<u>Jicamarca</u> , <u>Arecibo</u> , <u>St. Santin</u> , <u>Millst. Hill</u> , <u>Malvern</u>	N_e whole profile incl. E-Valley T_e , T_i N_i , v_i	Few radars, World days <i>Comparisons:</i> <u>EISCAT</u> , <u>Kharkiv</u>
Topside sounder	<u>Alouette 1, 2</u> <u>ISIS 1, 2</u>	N_e topside profile	Newer data from <u>Ohzora</u> , <u>ISS-b</u> , <u>IK-19</u>
In situ	<u>AE</u> , <u>Aeros</u> , <u>IK</u> , <u>TIMED</u> <u>DE</u> , <u>C/NOFS</u>	N_e T_e T_i N_i v_i	cont.: <u>DMSP</u> , <u>Kompsat</u> , <u>Hinotori</u>
Rocket	<u>Rocket data compilations</u>	D-region parameters	sparse data set
<u>GNSS</u>	<u>GPS</u> , <u>Glonass</u> , <u>Galileo</u> , <u>Navic</u> , <u>Beidou</u>	<u>TEC</u>	Global data; No profile information
<u>LEO GPS (radio occultation)</u>	<u>COSMIC</u> , <u>CHAMP</u> , others	N_e profile, <u>hmf2</u>	Data need quality control



IRTAM

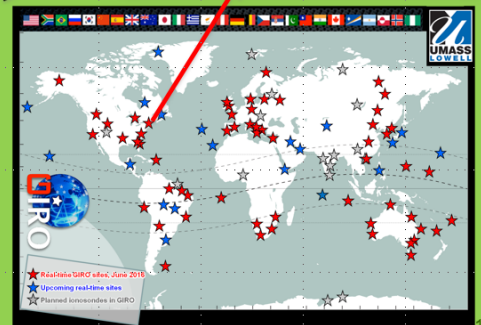
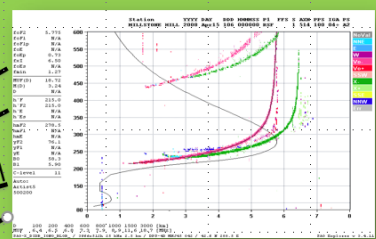
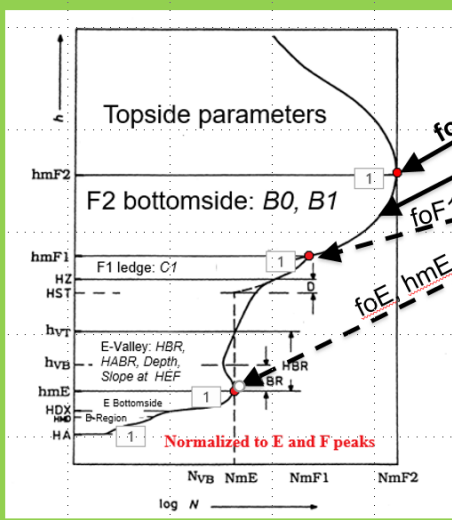


IRI Real-Time Assimilative Mapping



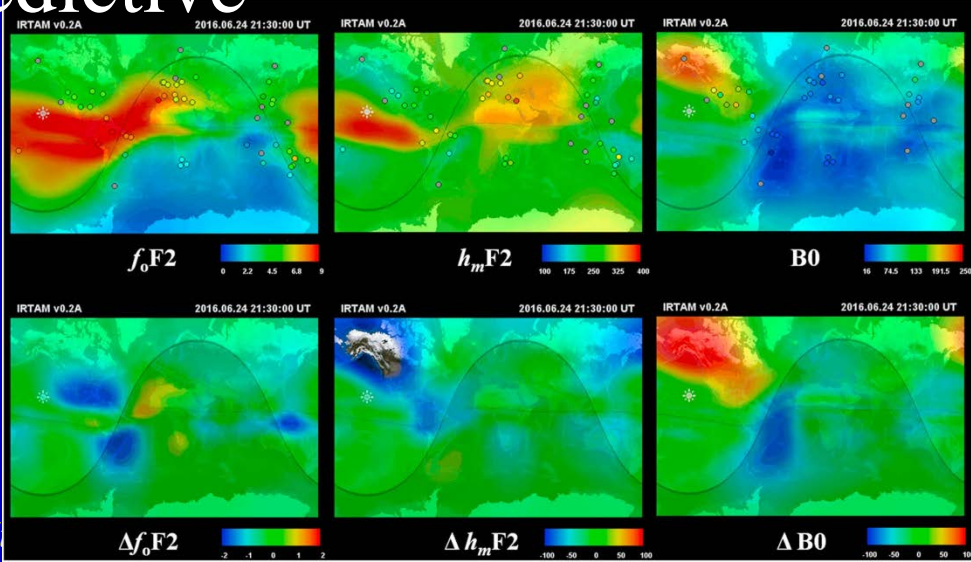
Assimilating real-time data from 60+ Digisondes into IRI

- Utilisation d'ionosondes
 - Points clés du profil
- Reconstruction
 - Paramétrisation
- Extrapolation
 - Base IRI
- Pas de réelle capacité prédictive



Bilitza, 2018

Bilitza, 2017



L'assimilation de données : un enjeu

- L'ionosphère est l'élément critique actuel
 - Point bloquant pour l'avenir proche
 - Amélioration des performances
 - ✓ Précision
 - ✓ Opérabilité des services
- Origine des difficultés de prévision
 - L'ionosphère seule ne suffit pas pour prédire son évolution
 - La dynamique est contrainte par les couplages
 - Forte dépendance vis-à-vis de l'environnement
 - ✓ Soleil + vent solaire
 - ✓ état de la magnétosphère
 - ✓ état de l'atmosphère
 - Mauvaise connaissance de l'atmosphère
- Contraintes sur l'assimilation de données
 - Représentativité de la structure et de la dynamique
 - Bonne représentation des couplages
 - ✓ Chimie
 - ✓ Électrodynamique
 - Bonne estimation des contraintes extérieures
 - ✓ Atmosphère
 - ✓ Magnétosphère
 - Assimilation pas forcément directe
 - ✓ Mesure initiale
- Solution
 - Mélange de modèles analytiques et numériques
 - Un soupçon d'IA pour « absorber » la mesure en amont