L'ionosphère : effet sur la propagation des ondes électromagnétiques

#### Pierre-Louis BLELLY IRAP



#### Plan

- L'ionosphère
  - Processus de création
    - ✓l'atmosphère
    - ✓le soleil
    - ✓la chimie
  - Structure
- Effet sur les ondes électromagnétiques
  - Effet dispersif
  - Utilisation pour sondage du milieu
    - ✓Ionogramme
    - ✓ Radio-occultation
  - TEC



#### Nomenclature ionosphérique



#### **Profil de température**

Température de l'atmosphère en fonction de l'activité solaire



6

#### Structure de l'atmosphère





# Source primaire : Spectre EUV solaire

- Combinaison
  - Continuum
  - Raies d'émission
- Variabilité de 11 ans





## **Pénétration du rayonnement**

- Loi de Beer-Lambert
  - Intensité lumineuse à  $\lambda$  au sommet de l'atmosphère
    - $I_{\infty}(\lambda)$
  - Absorption dans l'atmosphère

 $dI(s,\lambda) = -\sigma_a(\lambda)N_n(z)I(s,\lambda)ds$ 

Profondeur optique
  $\tau = \int_{-\infty}^{z} \sigma_a(\lambda) N_n(z) \frac{ds}{dz} dz$  Décroissance du flux

$$I(s,\lambda) = I_{\infty}(\lambda)e^{-\tau}$$





# **Profondeur de pénétration**





## Cas des photons énergétiques

libre parcours moyen d'un photon



6 juin

## **Production des ions primaires**

- Atmosphère multi-composantes
  - Production d'ions
  - Production de photoélectrons
- Transport des photoélectrons
  - Production secondaire d'ions par impact électronique





 $P(z) = \sum_{\lambda} \sigma_i(\lambda) N_n(z) I(z, \lambda)$ 

#### **Production des ions secondaires**

• Réactions chimiques Échange de charge  $A^+ + B \rightarrow A + B^+$ Échange de charge ionique  $A^+ + BC \rightarrow AB^+ + C$  $AB^+ + C \rightarrow A + BC^+$ Recombinaison dissociative  $AB^+ + e^- \rightarrow A + B$ 



**Région D: ions négatifs** 







6 juin 2014, Nantes

N<sub>2</sub>,CO<sub>2</sub>

#### **Régions E et F**





# Autre source : la magnétosphère







# **Ceintures de radiations**

• Mécanisme d'énergisation



- Couplé à un mécanisme de stockage par effet miroir
- Ceinture interne (L~1) : protons 0.1-40 MeV
- Ceinture externe (L = 3 à 10): électrons few keV- MeV



#### **L'ovale auroral** Electron flux [m<sup>-2</sup>.s<sup>-1</sup>] for Kp = 4

- Précipitations de particules
  - électrons
  - protons
- Dissipation dans l'atmosphère
  - Ionisation
  - Chauffage



# Electrons de grande énergie



6 juir

#### Structure de l'ionosphère





#### Structure de l'ionosphère





#### Structure de l'ionosphère





#### Variabilité ionosphérique

#### EISCAT - d:\data\930216\93021617-CP1.VIT



# Quelques chiffres

Altitude [km]	75	100	150	200	400	800	1200	3000
Region	D	E	F <sub>1</sub>	F <sub>2</sub>		F <sub>sup</sub>		
$n_n  [{ m m}^{-3}]$	<b>10</b> <sup>21</sup>	<b>10</b> <sup>18</sup>	5×10 <sup>16</sup>	8×10 <sup>15</sup>	<b>10</b> <sup>14</sup>	<b>10</b> <sup>12</sup>	2×10 <sup>11</sup>	<b>10</b> <sup>10</sup>
$n_e / n_n$	<b>10</b> -12	3×10 - 9	4×10 - 6	10 - 4	4×10 <sup>-3</sup>	4×10 <sup>-2</sup>	<b>10</b> - 1	1
T <sub>e</sub>	200	200	600	1500	2500	3000	3200	3500
T <sub>i</sub>	200	200	700	800	1000	2500	3000	3400
$\lambda_D$ [cm] (Debye)	3	0,6	0,4	0,3	0,5	1,7	2,7	4,4
$\lambda_{Ne}$ [cm] (mfp)	3	3×10 <sup>2</sup>	6,4×10 <sup>4</sup>	4×10 <sup>5</sup>	3×10 <sup>7</sup>	3×10 <sup>9</sup>	1,6×10 <sup>10</sup>	3×10 <sup>11</sup>
<b>v</b> <sub>e</sub> [ <b>cm.s</b> <sup>-1</sup> ]	<b>10</b> <sup>7</sup>	<b>10</b> <sup>7</sup>	2×10 <sup>7</sup>	2,5×10 <sup>7</sup>	3×107	3,5×10 <sup>7</sup>	<b>3,7×10</b> <sup>7</sup>	4×10 <sup>7</sup>
$\lambda_{Be}$ [cm] (Larmor)	1,2	1,2	2,5	3,3	4,3	6,4	8,0	16,2
$v_e$ [s <sup>-1</sup> ] (gyrofreq.)	<b>1,3×10</b> <sup>7</sup>	<b>1,3×10</b> <sup>7</sup>	<b>1,3×10</b> <sup>7</sup>	1,2×10 <sup>7</sup>	1,1×10 <sup>7</sup>	<b>8,7×10</b> <sup>5</sup>	7,4×10 <sup>5</sup>	<b>3,9×10</b> <sup>5</sup>
v <sub>en</sub> [s <sup>-1</sup> ] (coll.)		10 <sup>5</sup>	10 <sup>3</sup>	130	20			
<b>v</b> <sub>i</sub> [ <b>cm.s</b> <sup>−1</sup> ]	3×10 <sup>4</sup>	4×10 <sup>4</sup>	8×10 <sup>4</sup>	1,2×10 <sup>5</sup>	1,4×10 <sup>5</sup>	2×10 <sup>5</sup>	4×10 <sup>5</sup>	<b>10</b> <sup>6</sup>
$\lambda_{Bi}$ [cm] (Larmor)	3,5×10 <sup>2</sup>	<b>2,8×10</b> <sup>2</sup>	4×10 <sup>2</sup>	5,1×10 <sup>2</sup>	6,2×10 <sup>2</sup>	6,6×10 <sup>2</sup>	6,3×10 <sup>2</sup>	<b>8,6×10</b> <sup>2</sup>
$v_i$ [s <sup>-1</sup> ] (gyrofreq.)	13,6	22,7	31,8	37,4	35,9	48,2	101	1,9×10 <sup>2</sup>
ν <sub>in</sub> [s <sup>-1</sup> ] (coll.)		6×10 <sup>3</sup>	30	4	0,5			



# Spécificités du plasma

• Définition

Milieu constitué de particules neutres et de particules chargées avec une charge globale nulle

- Milieu extrêmement réactif
  - Champs électromagnétiques
  - Interaction longue portée
- Milieu multi-échelle
  - Échelle spatiale individuelle
  - Échelle spatiale collective
    - ✓longueur de Debye
  - Échelle temporelle électronique
    - ✓ fréquence plasma
  - Échelles temporelles ioniques







# Équation de dispersion

• Conditions de propagation

$$\left(k^{2}c^{2}-\omega^{2}+\omega_{pe}^{2}+\omega_{pi}^{2}
ight)\widehat{E}=c^{2}\left(ec{k}\cdot\widehat{E}
ight)ec{k}$$

- Onde transverse  $\vec{k} \cdot \hat{\vec{E}} = 0$ 
  - Équation de dispersion  $\omega^2 = \omega_{pe}^2 + \omega_{pi}^2 + k^2 c^2$
  - Vitesse de phase  $v_{\phi} = \frac{\omega}{k} = \frac{c}{N}$
  - Vitesse de groupe  $v_g = \frac{d\omega}{dk} = \frac{c^2}{v_{\phi}} = Nc$ Indice de réfraction  $N^2 = 1 \left(\frac{\omega_{pe}^2}{\omega^2} + \frac{\omega_{pi}^2}{\omega^2}\right)$



# **Réflexion**

- Condition pour une réflexion dans l'ionosphère
  - Vitesse de groupe nulle
  - N = 0

$$\checkmark \omega^2 = \omega_{pe}^2 + \omega_{pi}^2 \qquad f_{pe} \approx 9\sqrt{\overline{n}_e} \qquad f_{pH^+} \approx \frac{1}{5}\sqrt{\overline{n}_e}$$

Altitude [km]	75	100	150	250	400	800	1200	3000
Region	D	E	<b>F</b> <sub>1</sub>	<b>F</b> <sub>2</sub>		<b>F</b> <sub>sup</sub>		
n <sub>e</sub>	<b>10</b> <sup>8</sup>	<b>10</b> <sup>9</sup>	6×10 <sup>10</sup>	4×10 <sup>11</sup>	2×10 <sup>11</sup>	3×10 <sup>10</sup>	<b>10</b> <sup>10</sup>	6×10 <sup>8</sup>
T <sub>e</sub>	200	180	700	1900	2500	3000	3200	3400
T <sub>i</sub>	200	180	650	900	1000	2600	3000	3200
$f_{pe}$ [Hz] (plasma)	9×10 <sup>4</sup>	<b>2,8×10</b> <sup>5</sup>	2,2×10 <sup>6</sup>	5,7×10 <sup>6</sup>	4×10 <sup>6</sup>	1,6×10 <sup>6</sup>	9×10 <sup>5</sup>	2,2×10 <sup>5</sup>
$\lambda_D$ [cm] (Debye)	10	3	0,8	0,5	0,8	2,2	3,9	16
$f_e$ [Hz] (gyrofreq.)	1,4×10 <sup>6</sup>	1,3×10 <sup>6</sup>	1,3×10 <sup>6</sup>	1,2×10 <sup>6</sup>	1,2×10 <sup>6</sup>	9,8×10 <sup>5</sup>	<b>8,3×10</b> <sup>5</sup>	4,4×10 <sup>5</sup>
$\lambda_{Be}$ [cm] (Larmor)	0,7	0,6	1,3	2,2	2,7	3,5	4,2	8,2



# **Application : l'ionosonde**

- L'indice de réfraction est une fonction de n<sub>e</sub>
  Vitesse de groupe v<sub>g</sub> = N(n<sub>e</sub>)c = dz/dt
  ✓Relation temps et altitude
  Mesure du retard de propagation τ(f) = 2/c ∫<sub>z<sub>0</sub></sub><sup>z<sub>p</sub></sup> dz/√(1-(f<sub>p</sub><sup>2</sup>(z))/f<sup>2</sup>)
  - information sur n<sub>e</sub> le long du chemin
- Inversion nécessaire

 $\tau(n_e, f) \to n_e(\tau, f)$ 





# Ionogramme depuis l'espace















ЯD



![](_page_34_Figure_1.jpeg)

- Délai plus grand quand la pente de n<sub>e</sub>(z) est faible
- Ralentissement significatif au pic autour de f<sub>p,max</sub>
- Délai supplémentaire pour trajet depuis le pic jusqu'à la surface
- $\Rightarrow$  cusp au maximum de n<sub>e</sub>
- Réduction de vitesse plus faible quand la fréquence augments

![](_page_34_Picture_7.jpeg)

![](_page_35_Figure_1.jpeg)

![](_page_35_Picture_3.jpeg)

![](_page_36_Figure_1.jpeg)

![](_page_36_Picture_3.jpeg)

![](_page_37_Figure_1.jpeg)

![](_page_37_Picture_3.jpeg)

#### **Réfraction atmosphérique aux hautes fréquences**

- L'indice de réfraction de l'atmosphere est proche de 1
- Il dépend de
  - La composition atmosphérique
    - ✓ e.g.: pression de vapeur d'eau (e)
  - La pression atmosphéqrique (P) and la température (T)
- Pour la Terre, on a:

$$n = 1 + 77.6 \times 10^{-6} \left(\frac{P}{T}\right) + 37.3 \left(\frac{e}{T^2}\right)$$

- Dans la haute atmosphère, il dépend de:
  - La concentration atmosphérique
- On peut définir:
  - La réfractivité atmosphérique  $\mu = 10^6 \times (N-1)$

![](_page_38_Picture_12.jpeg)

# **Radio occultation**

- Take profit of ground-satellite communication links
- Example: Mars Express
  - High Gain Antenna (HGA) as a primary antenna for receiving telecommands and transmitting high rate telemetry
  - MaRS uses two radio link modes:

![](_page_39_Figure_5.jpeg)

6 juin 2014, Nantes

![](_page_39_Picture_7.jpeg)

# **Radio occultation**

- Remote sensing technique for measuring physical properties of a planetary atmosphere
- The trajectory of a S/C is occulted by a planetary body as seen from the G/S
- Its radio signal cuts through successively deeper layers of the planetary atmosphere before being blocked
- Sequence reversed upon emergence of the S/C
- Mars Express can only observe the INGRESS into occultation
- Venus Express can observe both INGRESS and EGRESS

![](_page_40_Figure_7.jpeg)

![](_page_40_Picture_8.jpeg)

# **Radio occultation**

- Alteration of the characteristics of the radio wave:
  - refractive index of the gases in the ionosphere and atmosphere
    - ✓ Ionosphere: n<1
    - ✓ Atmosphere: n>1
- Change in the propagation path
- Degree of bending depends on
  - strength of the refractivity gradient

![](_page_41_Figure_8.jpeg)

![](_page_41_Picture_10.jpeg)

# **Règle de Bouguer**

SO.

asymptote

 $\mathcal{A}$ 

- $1^{\text{ère}}$  couche = vacuum ( $n_1 = 1$ )
  - $r_p = \text{periapse} \implies a = r_1 \sin i_1 = n_p r_p$

 $r_3$ 

 $r_p = -$ 

r\_\_\_\_

• Règle de Bouguer

 $r_1$ 

 $\dot{l}_1$ 

n

![](_page_42_Picture_5.jpeg)

# **Refractivité µ**

• Définie à partir de l'indice de réfraction N

 $\mu = 10^6 \times (N-1)$ 

- Pour l'atmosphère
  - deux contributions
    - ✓ Neutres
    - ✓ Espèces ionisées

$$\mu(r) = \underbrace{C_1 N_n(r)}_{\text{atmosphère neutre}} - C$$

![](_page_43_Picture_8.jpeg)

![](_page_43_Picture_9.jpeg)

![](_page_44_Picture_0.jpeg)

- Ionosphère:
  - Réfractivité négative
  - Au-dessus de 80 km
- Région de transition
  faible réfraction
  entre 60 et 80 km
- Atmosphère neutre
  refractivité positive
  En dessous de 50 km

![](_page_44_Figure_6.jpeg)

# **Résultats pour MEX**

#### • 25-Mar-2006, DOY 84, ORBIT 2829

![](_page_45_Figure_2.jpeg)

![](_page_45_Picture_3.jpeg)

## **Résultats pour MEX**

#### • 25-Mar-2006, DOY 84, ORBIT 2829

![](_page_46_Figure_2.jpeg)

![](_page_46_Picture_3.jpeg)

### **GPS : How does it works?**

- What for
  - Navigation system
  - Positionning system
- How
  - Different systems : Navstar, Glonass, Galileo,...
  - At least 24 satellites
    - ✓ 31 satellites in operation (Navstar)
  - Orbits
    - ✓ Altitude: 20200 km
    - ✓ 6 equally distributed planes (60°) with 55° inclination
    - ✓ Orbital period: 12 hours
  - Guarantee to see at least 4 satellites

![](_page_47_Picture_14.jpeg)

# **GPS** : transmission

- Core of the system
  - High precision atomic clock (δt/t<10<sup>-12</sup>)
  - Fundamental frequency f<sub>o</sub> = 10.23 MHz
  - Two carrier waves
    - $\checkmark$  f<sub>1</sub> = 154 f<sub>o</sub> = 1575.42 MHz ( $\lambda$  = 19.05 cm)
    - ✓ f2 = 120  $f_0$  = 1227.60 MHz ( $\lambda$  = 24.45 cm)
  - Modulation by binary random codes
    - ✓ Coarse acquisition (C/A) code on  $f_1$ 
      - Pseudo-random code with period 1ms at frequency  $f_0/10$
      - Unencrypted code
      - Low resolution (civilian)
    - ✓ Precision code (P ou Y) on  $f_1$  and  $f_2$ 
      - Pseudo-random code with period 267 j at  $f_o$
      - Encrypted code
      - High resolution (military)
  - Binary modulation at 50 Hz
    - ✓ Navigation message

![](_page_48_Picture_19.jpeg)

# **GPS : sources d'erreurs**

Geometric distance	$ ho_i{}^j$	~20000 km
transmitter i to receiver j		
Offset receiver clock	dt <sub>i</sub>	< 300 km
Offset transmitter clock	dt <sup>j</sup>	< 300 km
Ionospheric delay	I <sup>.j</sup>	1 to 50 m
Tropospheric delay	T <sub>i</sub> j	1 to 20 m
System errors Tx et Rx	$M_i^{j}, m_i^{j}$	< 3 m
Other errors	ε <sup>j</sup>	30 cm (P), 3 m (C/A)
Relativistic effects	R <sub>i</sub> <sup>j</sup>	~10 m

![](_page_49_Picture_2.jpeg)

## Exploitation de la partie ionosphérique

• Le retard ionosphérique dépend de la fréquence

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

On obtient le slant TEC
Pour chaque récepteur
Pour chaque satellite vu
On détermine le VTEC
Indépendant de l'élévation
Fortes hypothèses
Grande erreur en mode rasant

![](_page_50_Figure_4.jpeg)

# **GPS** : exploitation

#### • Un exemple de carte TEC

06/03/10 20:50 UT

#### Ionospheric TEC Map

![](_page_51_Figure_4.jpeg)

![](_page_51_Picture_5.jpeg)

# **Reconstruction par tomographie**

- Principe
  - L'espace est divisé en volumes élémentaires (voxels)
  - L'ionosphère est uniforme dans un voxel
  - Un voxel contribue au TEC s'il est éclairé

![](_page_52_Figure_5.jpeg)

![](_page_52_Picture_6.jpeg)

#### • Chaque voxel doit être éclairé plus qu'une fois 6 juin 2014, Nantes

![](_page_52_Picture_8.jpeg)

# **Reconstruction (fin)**

![](_page_53_Figure_1.jpeg)

![](_page_53_Picture_2.jpeg)

# GPS en mode radio occultation

- Nécessite un satellite Low-Earth Orbit
  - Un récepteur GPS en LEO peut suivre des signaux radio GPS qui sont réfractés par l'atmosphère

![](_page_54_Picture_3.jpeg)

![](_page_54_Picture_4.jpeg)

- RO provides best results between 8-30 km
   <u>effects of moisture and ionosphere are negligible</u>
- Capable of resolving the structure of the tropopause and gravity waves above the tropopause.

![](_page_55_Figure_2.jpeg)

![](_page_55_Picture_3.jpeg)

![](_page_56_Figure_1.jpeg)