

## **Propagation des ondes hautes fréquences dans l'ionosphère terrestre** *High frequencies wave propagation in the Earth ionosphere*

---

**Foucault E.** <sup>(1)</sup>, **Bllely P-L.** <sup>(2)</sup>, **Marchaudon A.** <sup>(3)</sup>

<sup>1</sup> IRAP, CNRS, Toulouse, France, [etienne.foucault@irap.omp.eu](mailto:etienne.foucault@irap.omp.eu)

<sup>2</sup> IRAP, CNRS, Toulouse, France, [pierre-louis.bllely@irap.omp.eu](mailto:pierre-louis.bllely@irap.omp.eu)

<sup>3</sup> IRAP, CNRS, Toulouse, France, [aurelie.marchaudon@irap.omp.eu](mailto:aurelie.marchaudon@irap.omp.eu)

---

*Mots- clefs : Ionosphère, propagation, modélisation*

*Keywords : Ionosphere, propagation, modeling*

---

### **Résumé:**

L'ionosphère est un domaine critique de l'environnement spatial de la Terre, qui joue un rôle clef dans la dynamique du système magnétosphérique. De fait, la météorologie de l'espace, qui est le cadre applicatif des études autour des relations Soleil-Terre orientée vers l'impact de ces relations sur les activités humaines, s'intéresse particulièrement à l'ionosphère, tant ses effets sont visibles et immédiats et peuvent s'avérer critiques, notamment pour les communications. Afin de mieux comprendre comment ces relations peuvent impacter les communications, il a été développé un code de tracé de rayon, en géométrie sphérique et à trois dimensions, pour simuler les trajectoires d'ondes radios dans une ionosphère réaliste. Les premiers résultats de cette étude sont encourageants, les trajectoires simulées respectant le principe de Fermat, et suivant les propriétés du milieu (variation de la densité électronique). L'objectif de la thèse étant de coupler ce tracé de rayon avec le module de simulation d'ionosphère IPIM, développé à l'IRAP, pour créer un modèle de prévision de la propagation des ondes radios et de l'ionosphère. Il est également prévu d'injecter des données issues d'observations pour contraindre le modèle numérique.

### **Resume:**

The ionosphere is a critical area of the Earth's space environment, which plays a key role in the dynamics of the magnetospheric system. In fact, Space Weather, which is the applicative (?) framework of studies around Sun-Earth relations oriented towards the impact of these relations on human activities, is particularly interested in the ionosphere, as its effects are visible and immediate and can be critical, especially for communications. In order to better understand how these relationships can impact communications, a three-dimensional, spherical geometry ray tracing code has been developed to simulate radio wave trajectories in a realistic ionosphere. The first results of this study are encouraging, the simulated trajectories respecting the Fermat principle, and the properties of the medium (variation of the electron density). The aim of the thesis is to couple this ray tracing tool with the ionosphere simulation module, IPIM, developed at IRAP, to create a forecast model for radio waves propagation and ionosphere estimation. It is also planned to inject data from observations to constrain the numerical model.

## **1 Introduction**

Le développement des moyens de communications à grandes échelles (télécommunications, systèmes de positionnement type GPS, ...) et le besoin de précision et de continuité de tels systèmes rendent nécessaire une meilleure compréhension du milieu dans lesquels ces moyens sont utilisés. En particulier, l'ionosphère est certainement le milieu qui interagit le plus fortement avec les ondes radios et cette étude s'intéresse à quelques effets de ce milieu sur les ondes en bande HF. L'ionosphère est composée d'un plasma partiellement ionisé (milieu électriquement neutre, composé d'électrons et d'ions), résultat de l'ionisation par le rayonnement solaire des constituants neutres de l'atmosphère terrestre. Ce plasma modifie sensiblement l'indice de réfraction du milieu, qui devient notamment dépendant de la fréquence, avec une forte capacité à modifier la trajectoire d'une onde électromagnétique se propageant dans l'ionosphère. En fonction de la densité électronique présente sur le chemin

de celle-ci, la perturbation peut aller d'un simple retard temporel, à la disparition totale du signal.

Afin de mieux comprendre et appréhender les changements de trajectoires des ondes radios dans l'ionosphère, nous présentons ici les premiers résultats d'un code de tracé de rayons (estimation de la trajectoire, en minimisant l'énergie le long de celle-ci) dans une ionosphère simulée numériquement à partir d'un modèle physique réaliste de ce milieu. Dans la suite, on présentera en premier l'architecture du code de tracé de rayons, puis l'application à une ionosphère modélisée. Une discussion des résultats obtenus sera ensuite proposée, avec ensuite une conclusion sur l'état des travaux de recherche.

## 2 Tracé de rayon

L'objectif du développement de ce code de tracé de rayons, est de permettre une estimation de la trajectoire d'une onde radio (de haute (HF) à très haute fréquence (VHF)), dans un milieu possédant un indice de réfraction variable, mais supposé stable durant le temps de propagation de l'onde. Pour cela, le code de tracé de rayons résout la trajectoire d'une onde de fréquence  $f$  dans un système de coordonnées sphérique  $(r, \phi, \theta)$ , où  $r$  est la distance au centre de la Terre,  $\phi$  et  $\theta$  respectivement la longitude et latitude géographiques, en se basant sur le principe de Fermat. Pour cela on utilise un algorithme de type Runge-Kutta, à pas variable, pour intégrer ces quantités le long du trajet. Le schéma d'incrémentement est le suivant :

$$\begin{pmatrix} r \\ \phi \\ \theta \end{pmatrix}_{S+\delta S} = \begin{pmatrix} r \\ \phi \\ \theta \end{pmatrix}_S + \delta \begin{pmatrix} r \\ \phi \\ \theta \end{pmatrix}_{\delta S} + \delta \begin{pmatrix} r \\ \phi \\ \theta \end{pmatrix}_{\delta S} (n) \quad (1)$$

$$\begin{pmatrix} a_z \\ e_l \end{pmatrix}_{S+\delta S} = \begin{pmatrix} a_z \\ e_l \end{pmatrix}_S + \delta \begin{pmatrix} a_z \\ e_l \end{pmatrix}_{\delta S} + \delta \begin{pmatrix} a_z \\ e_l \end{pmatrix}_{\delta S} (n) \quad (2)$$

Où  $S$  = l'abscisse curviligne

$\delta S$  = l'incrément d'abscisse curviligne

$n$  = l'indice de réfraction, définit comme suit :

$$n = \sqrt{1 - \frac{N_e e^2}{m_e \epsilon_0 (2\pi f)^2}} \quad (3)$$

Où  $N_e$  = la densité électronique

$e$  = la charge électrique élémentaire

$m_e$  = la masse d'un électron

$\epsilon_0$  = la permittivité du vide.

La résolution des équations se fait le long de l'abscisse curviligne  $S$ . Les termes d'incrément peuvent se mettre sous la forme :

$$\delta \begin{pmatrix} r \\ \phi \\ \theta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\sin(e_l)}{\sin(a_z) \cos(e_l)} \\ \frac{r \cos(\theta)}{\cos(a_z) \cos(e_l)} \\ r \end{pmatrix} \delta S + \begin{pmatrix} \cos(e_l) \delta e_{l_i} \\ -\sin(a_z) \sin(e_l) \delta e_{l_i} + \cos(a_z) \cos(e_l) \delta a_{z_i} \\ -\cos(a_z) \sin(e_l) \delta e_{l_i} - \cos(e_l) \sin(a_z) \delta a_{z_i} \end{pmatrix} \delta S \quad (4)$$

$$\delta \begin{pmatrix} a_z \\ e_l \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\tan(\theta) \sin(a_z) \cos(e_l)}{r} \\ \frac{\cos(e_l)}{r} \end{pmatrix} \delta S + \begin{pmatrix} (\vec{k} \times \vec{e}_s) \cdot \vec{e}_\phi \delta i + \frac{\delta e_{l_i} \sin(a_z) \sin(e_l)}{\cos(a_z) \cos(e_l)} \\ (\vec{k} \times \vec{e}_s) \cdot \vec{e}_r \frac{\delta i}{\cos(e_l)} \end{pmatrix} \delta S \quad (5)$$

Où  $a_z$  = azimuth de l'angle de visée, vu depuis le Nord géographique

$e_l$  = l'élévation de l'angle de visée, pris depuis le sol

$\delta i$  = l'incrément d'angle dû à la présence de l'indice de réfraction, définit comme :

$$\frac{\delta i}{\delta S} = \frac{\|\vec{\nabla} n\|}{n} \vec{v} \cdot \vec{e}_s^\perp = -\frac{\|\vec{\nabla} n\|}{n} \vec{t} \cdot \vec{e}_s \quad (6)$$

Où  $\vec{\nabla} n$  = le gradient spatial de l'indice de réfraction

$\vec{e}_s$  = le vecteur de propagation, normé<sup>1</sup>

$\vec{v}$  et  $\vec{t}$  les vecteurs de la base locale orthonormée tel que  $\vec{v} = \frac{\vec{\nabla} n}{\|\nabla n\|}$  et  $\vec{v} \times \vec{t} = 1$ , repris dans la Figure 1.

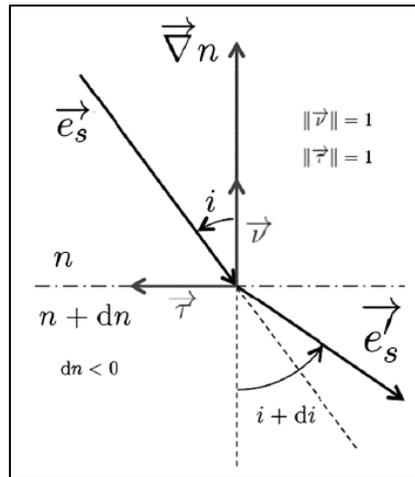


Figure 1 : Rotation local de la direction de propagation, dans le repère local

Le gradient d'indice de réfraction  $\vec{\nabla} n$  provoque une rotation du vecteur  $\vec{e}_s$ , qui définit la direction de propagation de l'onde, au niveau du dioptre caractérisé par ce gradient d'indice.

<sup>1</sup> Grandin et al., « Mars Express Radio-Occultation Data ».

L'utilisation d'un algorithme à pas adaptatif permet de suivre précisément cette rotation lors de la présence de forts gradients de densité.

### **3 IPIM**

Afin de mieux rendre compte de la propagation des ondes radios dans un milieu de type ionosphérique, il a été choisi pour cette étude de s'appuyer sur les résultats issus du code IPIM<sup>2</sup> (IRAP Plasmasphere-Ionosphere Model), qui est un modèle numérique de simulation de transport du plasma ionosphérique, suivant la géométrie des lignes de champ magnétiques. Après une rapide présentation du modèle, nous décrirons le type de simulation utilisée dans le cadre de cette étude.

#### **3.1 Présentation du modèle IPIM**

Le modèle IPIM est un modèle ionosphérique inter hémisphérique qui résout les équations de transport le long des lignes de champ magnétiques pour les différentes espèces ionisées présentes dans le milieu (ions et électrons). Les paramètres résolus sont la concentration, la vitesse parallèle au champ magnétique, les températures parallèles et perpendiculaires au champ, ainsi que les flux de chaleur associés, selon une approche basée sur une représentation à 16 moments des fonctions de distributions des espèces. Un schéma mixte lagrangien-eulérien permet de considérer le transport du plasma sous l'effet du champ électrique de convection et ainsi d'avoir une approche 3D (1D+2D) du transport du plasma ionosphérique. Ce modèle associe plusieurs modules décrivant l'atmosphère, la chimie, le rayonnement solaire, les effets des particules énergétiques (électrons suprathermiques) sur les constituants du milieu et le transport. La Figure 2 présente un synopsis du modèle IPIM et des couplages internes, qui permettent au modèle de décrire de manière quantitative la structure et la dynamique de l'ionosphère dans ses couplages avec la magnétosphère et le vent solaire.

---

<sup>2</sup> Marchaudon et Blelly, « A New Interhemispheric 16-Moment Model of the Plasmasphere-Ionosphere System ».

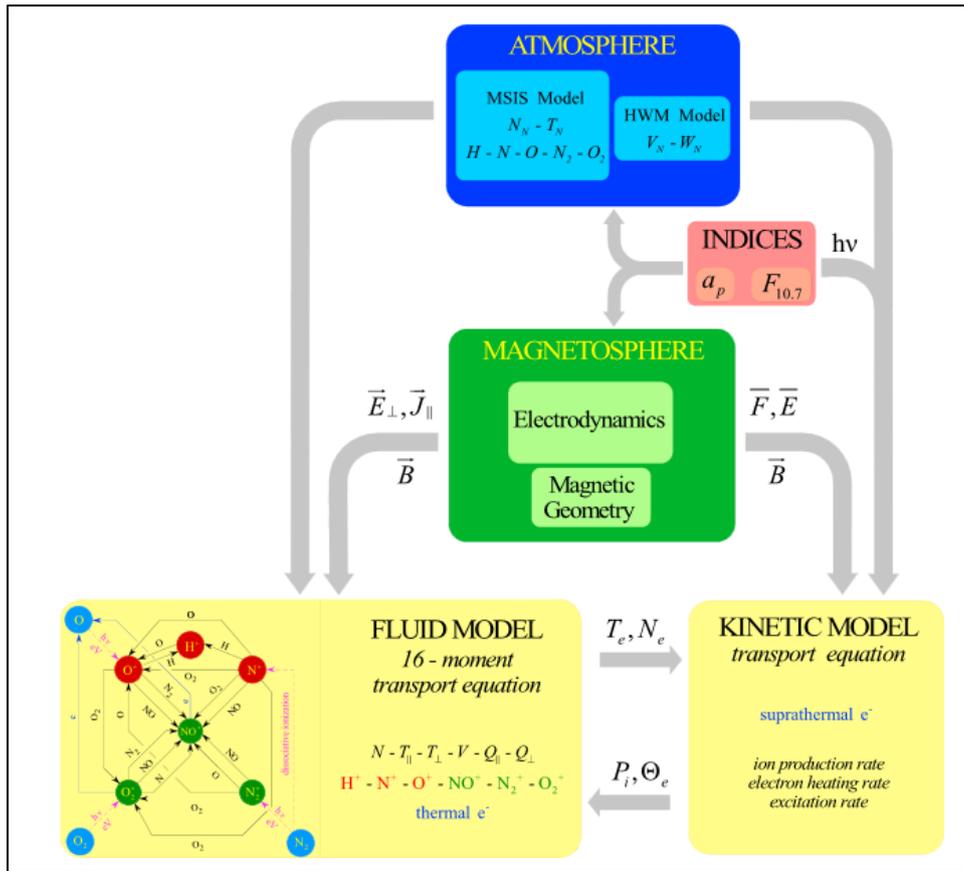


Figure 2 : Synopsis du fonctionnement du modèle IPIM

### 3.2 Présentation de la simulation, type SuperDARN

Dans le cadre de cette étude, nous avons choisi d'étudier le comportement d'ondes radio de fréquences de l'ordre de 10MHz, afin de simuler les signaux observés par des radars ionosphériques de type SuperDARN<sup>3</sup> (Super Dual Auroral Radars Network). Le réseau consiste en plus de 35 stations, permettant le suivi de l'ionosphère depuis les latitudes moyennes jusqu'aux cercles polaires, en mesurant la convection du plasma ionosphérique au niveau des zones aurorales et polaires.

Dans cette étude, nous avons simulé le champ de vue du radar de Stokkseyri (63.83N, -22.02E) pour le 20 Mars 2015 à 8h00 UT. La simulation a permis de produire 16 coupes ionosphériques, représentant les 16 faisceaux de mesure du radar. Dans chacune de ces coupes, différents paramètres du milieu sont accessibles comme par exemple la densité électronique, la température des ions et des électrons, la densité des neutres, la vitesse de convection du plasma ionosphérique associée au transport perpendiculaire aux lignes de champ magnétique. La grille ionosphérique correspondante ainsi placée en entrée du code de tracé de rayons est à trois dimensions (concaténation des 16 coupes dans l'espace), et non régulière. En effet celle-ci s'étend de 80 à 3000 km en altitude en 128 points, de 0 à 3555 km en portée au sol (portée maximale d'un radar type SuperDARN) en 160 points, selon 16 coupes, correspondant aux 16 faisceaux sélectionnés. La Figure 3 propose un aperçu de cette

<sup>3</sup> Chisham et al., « A Decade of the Super Dual Auroral Radar Network (SuperDARN) ».

géométrie à une altitude donnée, avec codé en couleur la densité électronique issue du modèle IPIM à 250 km d'altitude.

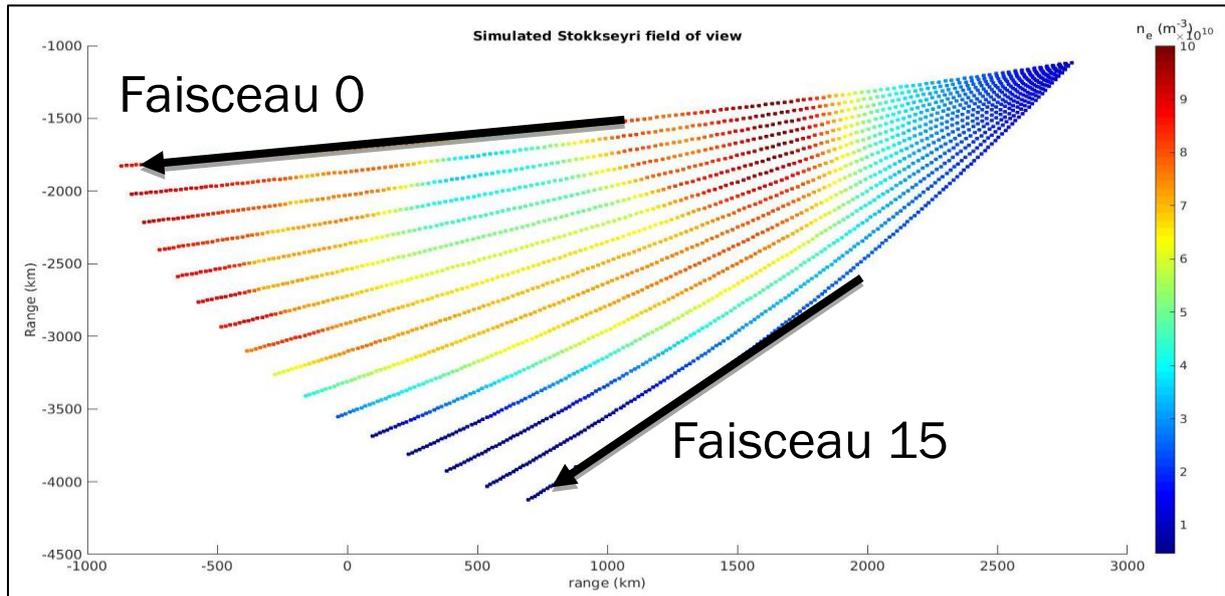


Figure 3 : Grille de densité électronique obtenue après simulation du champ de vue du radar de Stokkseyri

On notera sur la Figure 3, les gradients horizontaux de concentration électronique, qui résultent de l'effet des précipitations dans les régions aurorales. Ces gradients vont jouer un rôle important dans la réfraction des ondes.

#### 4 Résultats

La validation de l'algorithme de tracé de rayon en utilisant une ionosphère synthétique (calculée à base de loi mathématique très simple) sera d'abord présentée, puis nous nous concentrerons sur les premiers résultats du tracé de rayon dans l'ionosphère modélisée par le code IPIM.

##### 4.1 Validation

Afin de valider notre algorithme de tracé de rayon, il a été choisi de se placer dans un premier temps dans un cas simple d'ionosphère parfaitement connue. Pour cela nous avons défini une ionosphère avec un profil de densité électronique défini comme suit :

$$N_e(r) = \left( 1 + \tanh\left(\frac{r - r_d}{dr}\right) \tanh\left(\frac{r_u - r}{dr}\right) \right) N_e^o \quad (7)$$

Où  $r$  = la distance au centre de la Terre

$r_d$  = l'altitude basse de l'ionosphère

$r_u$  = l'altitude haute de l'ionosphère

$dr$  = l'épaisseur de la couche de transition

$N_e^o$  = la concentration au pic de région  $F_2$  défini à  $1e^{11}$ .

La Figure 4 présente un exemple de tracé de rayon dans un plan ionosphérique tel que décrit précédemment. On observe bien la forte réfraction obtenue lorsque l'onde traverse le fort gradient vertical de concentration électronique.

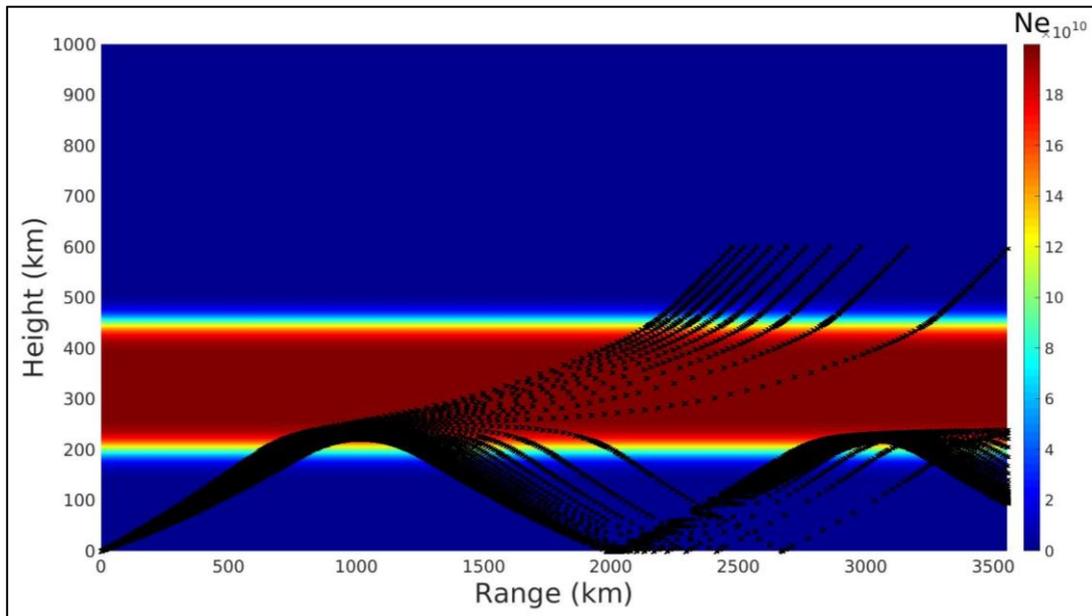


Figure 4 : Exemple de tracé de rayon dans une ionosphère synthétique. Les trajectoires sont représentées en pointillés noirs.

Selon l'angle d'élévation, on voit que les ondes peuvent être diffractées jusqu'à être réfléchies par le sol et se propager à grande distance dans le guide d'onde constitué par la région en dessous de l'ionosphère. A plus forte élévation, l'onde suit le guide d'onde ionosphérique et sort du milieu pour être perdue dans l'espace.

#### 4.2 Simulation IPIM pour un radar type SuperDARN

Dans un second temps, nous nous sommes intéressés aux performances du tracé de rayon dans l'ionosphère simulée par IPIM et présentée en section 3.2. Les résultats présentés dans cette étude utilisent l'ionosphère simulée suivant le faisceau pointant le plus au Nord du radar SuperDARN de Stokkseyri (faisceau 0). La Figure 5 présente les trajectoires obtenues à l'aide du tracé de rayons. Les trajectoires d'élévations faibles subissent une réfraction vers le sol (comme dans le cas précédent), indiquant ainsi que le gradient de concentration électronique de la région E est suffisamment élevé pour réfracter fortement la trajectoire des ondes. Les élévations plus élevées subissent une déviation plus faible sous l'effet de l'ionosphère, mais sans revenir au sol.

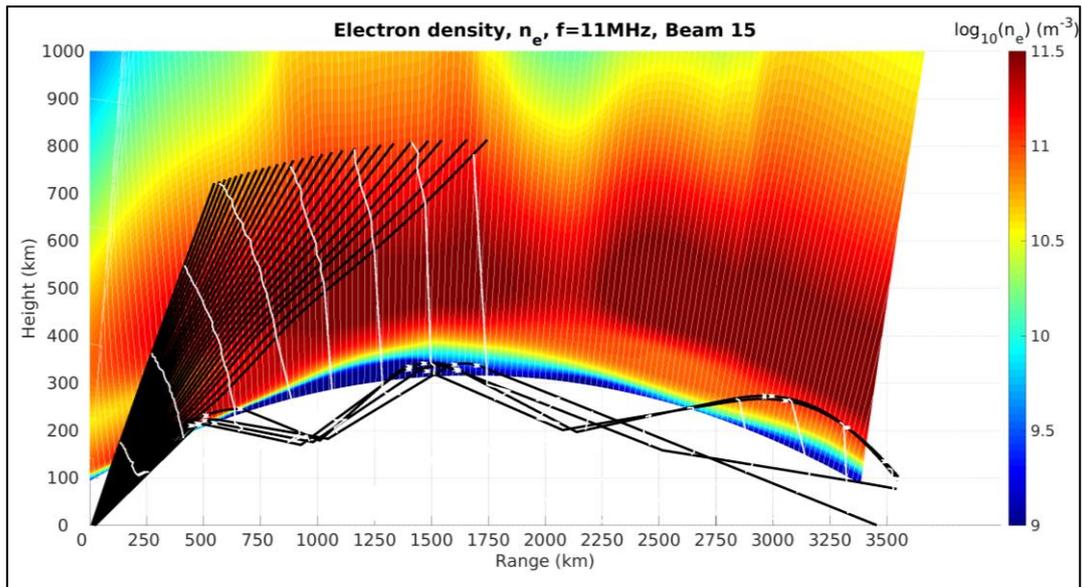


Figure 5 : Tracé de trajectoire (en noires) dans une ionosphère simulée numériquement. En abscisse est représentée la portée au sol (en km) et en ordonnée, l'altitude (en km). Sont représentés en blanc les fronts d'ondes, et les croix blanches sont des points vérifiant les critères de réflexion

La simulation numérique d'IPIM, couplé à ce tracé de rayon à trois dimensions, permet de rendre compte d'un milieu et donc de trajectoire plus réaliste. En effet le code de simulation ionosphérique autorise le transport des particules le long des lignes de champ et permet de prendre en compte les effets des précipitations, qui participent au renforcement des régions D et E de l'ionosphère. A partir de ces résultats, on voit qu'il est possible d'utiliser le couplage entre le tracé de rayons et le code numérique de simulation d'ionosphère IPIM pour estimer localement les zones à viser ou à éviter, si on veut respectivement effectuer une communication longue distance, ou bien communiquer, sans risquer de subir d'interférence, avec un objet à plus haute altitude, comme un satellite.

## 5 Conclusion

A partir de ces premiers résultats il a été possible de valider les équations de propagation du code de tracés de rayon, en regardant une ionosphère parfaitement définie. Ce résultat nous a permis par la suite de commencer une vague de tests sur une ionosphère simulée numériquement par un modèle physique (IPIM), reproduisant le champ de vue type d'un radar HF SuperDARN. Les résultats de cette première étude sont encourageants. A courte et moyenne portée le code semble robuste et donne des trajectoires cohérentes avec l'environnement rencontré. Il a cependant été noté des problèmes à longue portée, liés aux méthodes d'interpolation choisies. Un travail d'amélioration de celles-ci est actuellement en cours afin de pallier ce problème et garantir la meilleure propagation possible des ondes radios dans une ionosphère la plus réaliste possible. Nous prévoyons également d'introduire les indices de réfractions ordinaires et extraordinaires pour étudier la propagation différenciée dans ondes électromagnétiques selon ces deux modes.

Le but visé une fois le développement de ce code de tracé de rayons finalisé, sera de développer une version simplifiée et plus rapide du code de simulation ionosphérique IPIM. Le couplage de ces deux codes, code de propagation et code de simulation ionosphérique,

aura pour but de prévoir l'état de l'ionosphère terrestre, en incluant dans le modèle des données observées par les instruments. Ainsi le modèle ingérera en entrée des données réalistes, car mesurée et donnera en sortie, une ionosphère réaliste localement autour des points de mesure.

### Références bibliographiques

- Chisham, G., M. Lester, S. E. Milan, M. P. Freeman, W. A. Bristow, A. Grocott, K. A. McWilliams, et al. « A Decade of the Super Dual Auroral Radar Network (SuperDARN): Scientific Achievements, New Techniques and Future Directions ». *Surveys in Geophysics* 28, n° 1 (7 juin 2007): 33- 109. <https://doi.org/10.1007/s10712-007-9017-8>.
- Grandin, M., P.-L. Blelly, O. Witasse, et A. Marchaudon. « Mars Express Radio-Occultation Data: A Novel Analysis Approach ». *Journal of Geophysical Research: Space Physics* 119, n° 12 (décembre 2014): 10,621-10,632. <https://doi.org/10.1002/2014JA020698>.
- Marchaudon, A., et P.-L. Blelly. « A New Interhemispheric 16-Moment Model of the Plasmasphere-Ionosphere System: IPIM ». *Journal of Geophysical Research: Space Physics* 120, n° 7 (1 juillet 2015): 2015JA021193. <https://doi.org/10.1002/2015JA021193>.