Revue du projet IODISSEE mi-parcours ANR -- 10 mai 2011

http://iodissee.math.cnrs.fr















Plan

- Présentation du projet IODISSEE
 - Contexte, enjeux, ...
 - Consortium
 - Planning
- Avancées des différentes phases
- Conclusion

Le projet IODISSEE

- Global Navigation Satellite Systems (GNSS)
 - US NAVSTAR Global Positioning System (GPS)
 - Russian Global Navigation Satellite System (GLONASS)
 - European GALILEO Project
- Nécessité d'augmenter la précision et d'offrir plus de fonctionnalités pour le GPS
 - the US Wide Area Augmentation System (WAAS)
 - the European Geostationary Navigation Overlay System (EGNOS)
 - the Japanese Multifunctional transport Satellite spacebased Augmentation System (MSAS)
 - the Indian GPS and GEO Augmented Navigation system (GAGAN)
- Galileo
 - Améliorer la performance
 - Améliorer la disponibilité
 - Assurer l'interopérabilité
 - Information d'intégrité : assurance de fiabilité de la position.





Erreur de positionnement

Principales causes

- Erreur d'éphéméride : 1 à 2 m
- Précision de l'horloge du satellite : 1 à 2m
- Traversée de l'ionosphère : cm à 50 m
- Réflexions multiples dans l'environnement du récepteur : 1 à 2 m

Scintillations ionosphériques



Modélisation des phénomènes ionosphériques

- Paramètres importants : s_4 et σ_{ϕ}
- Modèles empiriques : Nequick, GISM, ...
- Ajustement de mesures
- Prise en compte de variabilités saisonnières
- Statistique : cycle solaire (sunspot number), etc...
- Valide sauf pour les événements exceptionnels scintillations extrêmes : besoin de modélisation

Le consortium

- Quatre partenaires
 - Inria Lille : C. Besse, P. Lafitte, A. Mouton,
 - S. Minjeaud, C. Negulescu, C. Yang
 - IMT : D. Auroux, F. Deluzet, A. Lozinski, M. Masmoudi
 - Latmos : J.J. Berthelier, M. Malingre, T. Onishi
 - Thalès : C. Bourga, R. Frenkiel

Les compétences, complémentarité et apport du consortium

- Inria Lille et IMT :
 - mathématiciens
 - modélisation d'instabilités exceptionnelles du plasma ionosphérique
- Latmos :
 - physiciens
 - données du microsatellite Demeter
- Thalès :
 - industriels
 - expertise et données GPS
- *IMT* : assimilation de données

Planning sur 48 mois



	6	12	18	24	30	36	42	48
Task 1								
Subtask 1.1: Characterization of the limitations of the								
currently used software. All partners are involved.								
Subtask 1.2: Needs in modeling for plasma scintillations.								
All partners are involved.								
Subtask 1.3: Definition of the specifications and								
improvements for the modeling.								
	6	12	18	24	30	36	42	48
Task 2								
Subtask 2.1: DEMETER raw data analysis to retrieve								
plasma parameter and spectral characteristics of the								
electrostatic turbulence								
Subtask 2.2: Building of the data base providing the								
plasma parameters at the DEMETER altitude (700 km)								
for a quiet time ionosphere, including the dependence of								
seasons and magnetic activity.								
Subtask 2.3: Statistical analysis of ESF events and								
building of the data base of the plasma parameters in								
the disturbed ionosphere during ESF.								
	6	12	18	24	30	36	42	48
Task 3								
Subtask 3.1: Analysis of the code. Collecting and								
analysis of ionospheric data (use of GPS measurements								
and DEMETER data in interaction with task 2).								
Definition of the control parameters and choice of the								
method.								
Implementation of the observation operators and								
control variables.								
Subtask 3.2: Validation of the data-driven modeling in								
interaction with task 2								
Subtask 3.3: Use of the calibrated and validated model								

	6	12	18	24	30	36	42	48
Task 4								
Subtask 4.1: Module of electromagnetic propagation.								
Subtask 4.2: Validation of the simulation tool.								

	6	12	18	24	30	36	42	48
Task 5								
Subtask 5.1: Improvements of the 3D-Dynamo model. Efficient numerical methods for the potential computation.								
Subtask 5.2: Efficiency improvements : Coupling of the 3D-Dynamo and Striation models. Parallelization of the code for NUMA architectures.								
Subtask 5.3: Enrichments of the models by more accurate physics. Visualization mixing real and numerical data.								

Tâche 1

Identification des besoins en modélisation

<u>Conditions d'environnement :</u>

Conditions de scintillation nominales Conditions de scintillation dégradées

Types de modélisation :

Modèle fin Modèle simplifié

Tâche 2 – LATMOS / Thales

Supports Expérimentaux et Validation du Modèle: Observations in-situ et au sol

1- Observations in-situ:

données DEMETER et validations associées (LATMOS)

- 1.1- instrumentation et mesures plasma et ondes
- 1.2- objectifs
- 1.3- résultats initiaux
- 1.4- travaux en cours

2- Observations au sol: données des stations GPS (TAS)

2.1 DEMETER, instrumentation et mesures plasma et ondes

-DEMETER, premier μ -satellite du programme MYRIAD du CNES

- objectifs de la mission: couplage lithosphère-ionosphère et météorologie spatiale
- orbite: polaire quasi-héliosynchrone 10.30 / 22.30 TL,altitude 715km puis 650 km
- *instrumentation:* caractérisation du plasma ionosphérique et des ondes:

plasma: Ne, Te (Sonde de Langmuir), Ni, Ti, Vi (analyseur ionique)

ondes: composantes électriques 0-3.5 MHz, magnétiques 10 Hz-20 kHz

- modes de fonctionnement:
 - <u>Survey</u>, résolution ~ 1 à 4s, sur toute l'orbite aux latitudes < 65°
 - <u>Burst</u>, haute résolution temporelle et formes d'ondes 3 composantes 0.01-1 kHz au dessus des zones sismiques (——> régions équatoriales)



Observations in-situ DEMETER et études associées, Intérêts et objectifs

1- Initialisation du modèle

- caractéristiques moyennes de l'ionosphère équatoriale à 650/700 km
 - → variations saisonnières, cycle solaire,...
- validation et utilisation du modèle ionosphérique SAMI2, comparaison avec IRI
 - → initialisation des profils ionosphériques jusqu'à ~ 100 km

2- Etudes de perturbations ionosphériques spécifiques et validation du modèle.

- utiliser des études de cas associant observations et modélisation par SAMI2
 pour valider la réponse du modèle à des perturbations ionosphériques spécifiques
 ondes de gravité
 - réponse dynamique dans un tube de force en réponse à un forçage extérieur

3- Etude statistique de l'occurrence et des caractéristiques des bulles de plasma

- variations saisonnières, influence de l'activité solaire et de l'activité magnétique
- constitution d'une base de données.

4- Physique des instabilités, comparaisons observations-simulations

- transport du plasma depuis les basses altitudes et composition ionique
- instabilités à grande échelle pendant les orages magnétiques
- irrégularités de densité et turbulence électrostatique associée

Observations in-situ DEMETER et études associées, Travaux réalisés

1- Mesures plasma et simulations ionosphériques SAMI2

- traitement des données, amélioration de l'algorithme de traitement
 - précision des paramètres plasma restitués Ni, Vi, Ti
 - (nécessaire pour l'étude des perturbations de faible amplitude)
 - détermination des irrégularités de densité à petite échelle ~ 50m
 - recherche des ions moléculaires (NO+)

2- Détection automatique et étude statistique des bulles de plasma

- détection multicritère par algorithme neuronal
- reconnaissance simultanée d'autres types de perturbations (« blobs »,...)
- mise en évidence de variations saisonnières et de l'influence de l'activité solaire

3- Etudes de cas préparatoires à la validation du modèle

- ondes de gravité de moyenne échelle
- réponse de l'ionosphère supérieure à un forçage (éclipse de Soleil)

Observations in-situ DEMETER et études associées

Reconnaissance automatique des bulles de plasma





Observations in-situ DEMETER et études associées

Etude statistique de l'occurrence des bulles de plasma Influence de l'activité solaire



Observations in-situ DEMETER et études associées

Ondes de gravité de moyenne échelle, Observations et modélisation



Méthodologie

- 1. Collecte de mesures par des récepteurs sol du réseau IGS sur des périodes déterminées a priori
 - Site FTP: <u>http://www.igs.ensg.ign.fr</u>
 - Sélection des stations: parmi celles délivrant des données à cadence élevée (i.e. 1 Hz)
 - Sélection de la période
 - Sélection de la bande
 - Dans le cadre de IODISSEE, les station Kiruna (KIRU) et Yellowstone (YELL) en juillet et août 2010 et en bande GPS L1 C/A ont été choisies, ceci afin de voir la corrélation avec les mesures DEMETER en mode "Burst" demandées au LATMOS au dessus de cette station
- 2. Développement d'un outil d'analyse par station et par ligne de vue des données sol
 - Calcul de S₄ (représentatif de la variation de l'intensité) et par station et par ligne de vue
 - Entrées: SNR C/N₀ inclu dans les fichiers d'observables RINEX
 - Statistique sur une minute
 - Calcul de σ_{ω} (représentatif du bruit d'intensité)
 - Entrées: Mesures de phase inclu dans les fichiers d'observables RINEX
 - Statistique sur une minute
 - Sorties
 - Valeurs max. de S₄ et σ_{ϕ} par jour et nombre de lignes de vue affectées (seuils 0.7 sur S₄, et 1 rad sur σ_{ϕ})
 - S_4 , σ_{o} , elevation, C/N₀, evaluation multi-trajet et sauts de cycle par jour et par satellite
 - S_4 , σ_{o} par station et par jour, tous satellites
- 3. Tentative de corrélation avec les mesures DEMETER



- Kiruna juillet-août 2010
 - Evénements de scintillation tous satellites
 - Seuil sur $S_4 = 0.7$
 - Seuil σ_{φ} = 1 rad





- Kiruna juillet-août 2010
- ⇒ Scintillations de phase observées les 28, 29 et 30 juillet
- Les perturbations observées sur G04, G23, G03, G19, G29 et G21 le 29/07 ne sont pas expliquées
- Pas de donnée DEMETER disponible à ces dates



- Sorties Kiruna juillet-août 2010
- σ_{ϕ} le 09/08/2010, tous satellites (profil similaire pour les 12/08 et 15/08) sigmaPHI at station KIRU 20100809



- Sorties Kiruna juillet-août 2010
- Recherche de la ligne de vue la plus proche de DEMETER



- La ligne de vue du satellite G02 passe au plus près à 308 km de DEMETER à 19:08:37 UT (date et minimum approximatifs du fait la discrétisation de la position DEMETER disponible)
- Le critère de distance n'est pas le plus adéquat (voir planches LATMOS J.J Berthelier)

- Conclusions
- Collaboration étroite avec le LATMOS sur ce sujet (J.J. Berthelier)
- Evénement du 09 août
 - A la date considérée (le 09/08/2010), il n'y a pas d'événement de scintillation
 - Les distances des lignes de vue à DEMETER ne permettent pas de conclure sur la corrélation entre observations sol et DEMETER
- Evénements des 27 et 28 juillet
 - De la scintillation de phase est observée fin juillet
 - Pas d'atténuation (I.e. "fading" détecté par S₄)
 - Il n'y a pas de passage DEMETER disponible au dessus de KIRUNA fin juillet
- Suite des analyses
- Prise en compte des entrées fournies par LATMOS pour déterminer un critère de corrélation plus précis et représentatif
- Investigation des événements monitorés les 12/0/2010 et 15/08/2010
- Recherche d'autres événements monitorés par DEMETER situés sur une zone traversée par une ligne de vue GPS

Tâche 4 – Inria Lille / IMT / Latmos Instabilités ionosphériques

- Les signaux radioélectriques se propageant sur un trajet Terre-satellite sont parfois perturbés par la scintillation ionosphérique.
- Ce phénomène se traduit par l'apparition de fluctuations rapides du signal reçu qui sont susceptibles d'affecter les performances du système
- Problèmes en termes
 - de précision
 - de disponibilité
 - de fiabilité



Mécanisme de diffraction des ondes en provenance d'un satellite par des irrégularités d'ionisation. Vd représente la vitesse de dérive des irrégularités (et de la figure de diffraction des ondes) par rapport au récepteur

Exemple d'effets des scintillations ionosphériques



Signaux reçus par un récepteur GPS à Yellowknife (Canada) en provenance du satellite GPS n°08, lors d'un évènement de scintillation le 29 octobre 2003 :

- (a) amplitude du signal reçu (échelle arbitraire),
- (b) variations de la phase (chemin de phase mesuré en mètres après élimination du Doppler géométrique) aux fréquences GPS L1 (1575,42 MHz) et L2 (1227,6 MHz).

Instabilité de type Rayleigh-Taylor à l'équateur magnétique



Fig. 3.20 The evolution of a barium cloud under the influence of a neutral wind. (S. T. Zalesak, in *Solar-Terrestrial Physics* (eds. Carovillano and Forbes). Reidel, 1983. Reprinted by permission of Kluwer Academic Publishers)



Evolution d'une bulle de plasma naturelle ou artificielle à une altitude d'environ 300 km



La bulle de plasma est étirée le long des lignes de champ magnétique. Dans un plan orthogonal, la bulle de plasma subit l'influence de l'instabilité de dérive en $E \times B$. La morphologie de la bulle est modifiée dans ce plan.



Modélisation du plasma ionosphérique



Système de coordonnées



Modèle Dynamo

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u_i) = 0,$$

$$u_i = \mathbb{M}_i (-\nabla \phi + \kappa \nu_i u_n),$$

$$u_e = \mathbb{M}_e (\nabla \phi + \kappa \nu_e u_n),$$

$$-\nabla \cdot (\rho(\mathbb{M}_i + \mathbb{M}_e) \nabla \phi) =$$

$$-\kappa \nabla \cdot (\rho(\mathbb{M}_i \nu_i - \mathbb{M}_e \nu_e) u_n)$$

$$\mathbb{M}_i + \mathbb{M}_e = \begin{pmatrix} \mathsf{A} & -\mathsf{D} & 0 \\ \mathsf{D} & \mathsf{B} & 0 \\ 0 & 0 & \mathsf{C} \end{pmatrix}.$$

Modèle dynamo ionosphérique

Modèle valide dans toute l'ionosphère

Notation

- ρ : densité de plasma
- u_n : vitesse du vent de neutre
- u_e, u_i : vitesse des électrons et ions
- ν_e , ν_i : fréquences de collision e-n et i-n
- t: temps
- $\mathbb{M}_{i,e}$: matrices de mobilité
- ϕ : potentiel électrique
- κ : paramètre typique de collisions e-n ou i-n collisions $\kappa \sim 10^{-4}$

Equation elliptique fortement anisotrope



Modèle striation $\kappa \to 0$



$$A = \int_{\gamma_{\min}}^{\gamma_{\max}} \rho \nu \frac{\mathrm{d}\gamma}{r^2 \sin^2 \varphi |B|^4}$$
$$B = \int_{\gamma_{\min}}^{\gamma_{\max}} \rho \nu \frac{r^2 \sin^2 \varphi \mathrm{d}\gamma}{|B|^2}$$

Validité

- Modèle valide autour de l'équateur magnétique
- Fréquences de collision faible
- ➔ fréquence de collision constante

Intérêt

- Équation de transport 3D
- Equation elliptique isotrope 2D

Approximation numérique



Approximation numérique

Milieu environnant : modèle IRI (remplacé à termes par SAMI 2)

Equation de transport : méthode volumes finis

Equation elliptique anisotrope :

- méthode préservant l'asymptotique (schéma dit AP)
- limite $\kappa \to 0$ intrinsèque
- éléments finis





Améliorations à envisager

- Ajout de physique (termes d'inertie dans les équations de conservation de l'impulsion, équation d'énergie)
- Plusieurs espèces d'ions
- Ajout de chimie
- Ordre 2 sur l'équation de conservation de la masse
- Montée en ordre sur l'équation elliptique
- Raffinement

Tâche 5 – Inria Lille / Latmos

• A fournir :
$$S_4 = \left\langle \frac{I^2 - I_0^2}{I_0^2} \right\rangle^{\frac{1}{2}} \sim \sqrt{\langle 4\chi \rangle} \qquad \sigma_{\phi} = \left\langle \phi^2 \right\rangle$$

- Equation de Helmoltz $\Delta E(\mathbf{r}) + \kappa^2 \varepsilon E(\mathbf{r}) = -\frac{4\pi}{c} i \kappa J(\mathbf{r})$
- Approximation optique géométrique $E(\mathbf{r}) = A(\mathbf{r})e^{i\kappa\Psi(\mathbf{r})}$
 - valide seulement pour calculer la variation de phase
 - Pas accès à la variation d'amplitude
- Approximation de Rytov $\varepsilon(\mathbf{r},t) = 1 + \delta \varepsilon(\mathbf{r},t)$ et $E(\mathbf{r}) = \exp(\Psi_0(\mathbf{r}) + \Psi(\mathbf{r}))$

champ non perturbé
$$E_0(\mathbf{r}) = \exp(\Psi_0(\mathbf{r}))$$

fonction de Green $G(\mathbf{s} - \mathbf{r}) = \frac{e^{i\kappa|\mathbf{s} - \mathbf{r}|}}{4\pi|\mathbf{s} - \mathbf{r}|}$
 $\phi(\mathbf{r}) = -\kappa^2 \int_{\mathbb{R}^3} \delta\varepsilon(\mathbf{s}, t) \operatorname{Re} \left[G(\mathbf{s} - \mathbf{r}) \frac{E_0(\mathbf{s})}{E_0(\mathbf{r})} \right] d\mathbf{s} \qquad \chi(\mathbf{r}) = \log\left(\frac{A(\mathbf{r})}{|E_0(\mathbf{r})|}\right)$
 $A(\mathbf{r}) = |E_0(\mathbf{r})| \exp\left(-\kappa^2 \int_{\mathbb{R}^3} \delta\varepsilon(\mathbf{s}, t) \operatorname{Im} \left[G(\mathbf{s} - \mathbf{r}) \frac{E_0(\mathbf{s})}{E_0(\mathbf{r})} \right] d\mathbf{s} \right)$

Tâche 3 – IMT Data driven modeling

Assimilation de données: couplage modèle - observations => calibrage du modèle, validation du modèle, prévisions de l'évolution du système.

Pré-requis:

- un modèle fournissant des solutions cohérentes avec ce qui se passe dans la réalité (=> tâche 2)

- des observations: fournies par DEMETER

- des opérateurs d'observation pour faire le lien entre les observations et les quantités physiques calculées par le modèle: opérateurs de projection sur la trajectoire de DEMETER + intégrales de ligne de la densité de plasma entre le satellite et la station sol (=> tâche 4)

- des estimations a priori des statistiques d'erreur sur les observations, sur le modèle, ...

Techniques: méthode variationnelle, type 4D-VAR, nécessitant l'adjoint du code (et un minimiseur performant).

Conclusion

- Tâches 1 et 8 : terminées
- Tâches 2, 4 et 5 :
 - Identification des événements par bons paramètres statistiques
 - Ajout de physique
- Tâche 3 : attente avancées tâches 2, 4 et 5
- Transparents des rencontres annuelles disponibles sur page web http://iodissee.math.cnrs.fr

