

Observations par le satellite DEMETER des perturbations induites par l'éclipse du 29 Mars 2006 dans l'ionosphère supérieure.

DEMETER observations of the topside ionospheric disturbances induced by the March 29, 2006 solar eclipse

X. Wang*, J.J. Berthelier* and J.P. Lebreton**

*CETP/LATMOS, 4 Avenue de Neptune, 94100 SAINT-MAUR, FRANCE, xiaoni.wang@latmos.ipsl.fr

*CETP/LATMOS, 4 Avenue de Neptune, 94100 SAINT-MAUR, FRANCE, jean-jacques.berthelier@latmos.ipsl.fr

**ESTEC/ESA, RSSD, Keplerlaan, NOORDWIJK, THE NETHERLANDS

Résumé:

Nous présentons une étude expérimentale et par modélisation des effets de l'éclipse du 29 Mars 2006 sur l'ionosphère supérieure. Les observations ont été fournies par les instruments de mesure du plasma de la charge utile du micro-satellite DEMETER à l'altitude de 700 km. Au cours d'une demi-orbite de jour, DEMETER a survolé l'Afrique au voisinage de la position du maximum d'éclipse et, grâce au fonctionnement quasi permanent du satellite au dessous de 65° de latitude on dispose, en outre, de plusieurs orbites pour déterminer une "ionosphère de référence" telle qu'elle serait observée en l'absence d'éclipse, ce qui permet d'estimer avec une précision satisfaisante les perturbations induites par l'éclipse. Les effets thermiques de l'éclipse sont très rapides et se traduisent par une diminution des températures électronique et ionique de l'ordre de 150K en réponse à la diminution du rayonnement UV solaire. La densité du plasma diminue de ~ 30% mais est liée à la valeur moyenne du flux solaire sur 1 à 2 heures avant l'instant d'observation. Le modèle SAMI2 adapté aux conditions d'éclipse fournit des résultats en très bon accord avec les observations ce qui nous a permis de valider celles-ci et de les interpréter en termes d'échanges d'énergie le long des lignes de force et de transport du plasma dans l'ionosphère supérieure.

We present an experimental and modelling study of the effects of the solar eclipse on March 29, 2006 on the topside ionosphere. Observations of the electron and ion thermal populations were provided by instruments aboard the CNES micro-satellite DEMETER which flew over Europe and Africa near the time of maximum solar obscuration. We found a clear thermal effect with a noticeable decrease of the electron and ion temperatures over a fairly extended part of the orbit, from about 30°N to 10°S eccentric latitude, as well as a decrease of the plasma density in a region displaced towards southern latitudes. We have also performed a modelling of the ionosphere using the 2D SAMI2 code, and found the model reproduces very well the decrease in electron and ion temperatures as well as in plasma density with characteristics very similar to the data. The topside ionosphere responds very quickly to the variation of the photo-electron energy transfer towards thermal electrons and the plasma density variations are controlled by transport processes with longer time constants.

Mots Clés: éclipse solaire, ionosphère, DEMETER

Key words: solar eclipse, ionosphere, DEMETER

Introduction

[1] Les éclipses solaires présentent un grand intérêt pour les physiciens de l'ionosphère car elles offrent l'opportunité d'étudier la réponse de l'ionosphère à une variation rapide et connue du flux solaire. Malgré la rareté de ce type d'évènement, les publications ont été relativement nombreuses au cours des deux dernières décades, e.g. [1], [2], [3], [4]. Les variations de la densité électronique dans les régions E et F1 fournissent une information sur les processus photo-chimiques qui contrôlent la production du plasma dans une gamme d'altitude où l'hypothèse d'un équilibre photo-chimique local est assez justifiée. Dans l'ionosphère supérieure, au niveau et au dessus du maximum de la région F, les phénomènes sont beaucoup plus complexes car, à haute altitude, ce sont essentiellement les processus de transport, les échanges d'énergie et la diffusion le long du champ magnétique qui régissent l'évolution du plasma.

[2] Nous avons bénéficié d'une situation très favorable lors de l'éclipse du 29 Mars 2006 pour étudier les effets induits dans l'ionosphère supérieure puisque lors d'une demi-orbite de jour DEMETER a survolé la zone d'éclipse totale au-dessus de l'Afrique au voisinage immédiat en temps et en position du maximum de l'éclipse.

1. Observations et détermination d'une « ionosphère de référence ».

1.1- Observations

[3] DEMETER, premier micro-satellite de la famille MYRIAD développé par le CNES, a été lancé le 29 juin 2004 sur une orbite quasi-héliosynchrone à ~ 715 km d'altitude avec une inclinaison de 98° et un nœud ascendant à 22.30 TL, les

observations de jour étant effectuées à ~ 10.30 TL aux moyennes et basses latitudes. Dédié principalement à la recherche d'un couplage entre l'activité sismique et l'ionosphère, il est équipé d'une charge utile scientifique très complète pour la mesure des ondes plasma dans les gammes UBF, VLF et HF jusqu'à 3.25 MHz, la détermination des paramètres du plasma ionosphérique et les précipitations de particules énergiques. Nous avons utilisé dans cette étude les mesures de la densité N_i et de la température T_i de l'ion majoritaire O^+ fournies par l'analyseur ionique IAP [5] et les mesures de densité N_e et de température T_e électroniques fournies par la sonde de Langmuir ISL [6].

[4] Débutant au lever du Soleil au Brésil à 8.36 TU l'éclipse a balayé les régions de moyenne latitude en Afrique et en Asie Centrale pour se terminer au coucher du Soleil en Mongolie à 11.48 TU. Le point d'éclipse maximale se situe en Afrique à 10.11.18 TU, à 16.48E et 23.15N, c'est-à-dire très proche en temps et en position de la trace de l'orbite de DEMETER sur la Terre. La zone où l'éclipse est partielle s'étend en latitude sur près de 50° vers le Nord et sur $\sim 30^\circ$ vers le Sud comme le montre la Figure 1.

1.2- Détermination de « l'ionosphère de référence ».

[5] La question la plus importante pour l'interprétation des données est de déterminer une « ionosphère de référence » c'est-à-dire, pour chacun des paramètres ionosphériques N_e , T_e , N_i et T_i , la courbe de base représentant sa variation le long de l'orbite pour des conditions normales, c'est-à-dire en l'absence d'éclipse. Les publications antérieures témoignent de la difficulté de cette opération due à la grande variabilité naturelle de l'ionosphère d'un jour à l'autre qui reflète notamment les effets complexes et à moyen terme de l'activité aurorale et des vents thermosphériques sur le transport du plasma. Cette variabilité naturelle et l'incertitude sur les courbes de base qui en résulte, peuvent, au moins pour la densité du plasma, fausser, voire masquer, les perturbations induites par la variation du flux solaire lors de l'éclipse. Plusieurs approches peuvent être envisagées pour déterminer les courbes de base en utilisant les observations effectuées sur des orbites voisines en temps et dans l'espace de l'orbite d'éclipse. On peut ainsi utiliser :

(i) les orbites du 28 et du 30 mars qui encadrent géographiquement l'orbite d'éclipse avec un faible écart en longitude de $\sim 7.5^\circ$ pour la position du nœud descendant et des conditions tout à fait équivalentes de faible activité aurorale, approche qui, a priori, évite les défauts des 2 autres approches indiquées ci-dessous

(ii) les orbites du 29 Mars qui précède et suit respectivement l'orbite d'éclipse mais avec des écarts en longitude plus importants de $\sim 26^\circ$ pour la position de leurs nœud descendant, l'orbite décalée vers l'Ouest étant alors dans l'anomalie de l'Atlantique Sud région où l'ionosphère est très perturbée

(iii) calculer une courbe moyenne à partir d'un nombre plus important d'orbites sur une période d'un mois environ choisies car elles correspondent à des conditions les plus voisines de celles de l'orbite d'éclipse. La moyenne d'un plus grand nombre d'observations permet de penser qu'on devrait diminuer l'effet de la variabilité naturelle de l'ionosphère mais la variation saisonnière et l'impossibilité de trouver des conditions d'activité magnétique vraiment semblables induisent des défauts non maîtrisables.

La conclusion de notre travail a été que l'approche (i) était préférable et fournissait une très bonne ionosphère de référence.

2. Effets observés à l'altitude de DEMETER (700 km).

[6] Comme nous le décrivons, nous avons cherché à comparer les observations fournies par DEMETER aux résultats d'une simulation numérique de l'ionosphère. La simulation a été réalisée en utilisant le code SAMI2 qui modélise l'évolution du plasma ionosphérique et plasmasphérique dans un plan géomagnétique défini à partir d'une approximation de dipôle excentré pour le champ magnétique terrestre. Pour représenter les perturbations ionosphériques induites par l'éclipse le long de l'orbite de DEMETER dans le même repère, nous avons donc, pour des points distants de ~ 2 minutes (~ 750 km) le long de l'orbite, déterminé le plan du dipôle excentré et la latitude magnétique correspondants. Les données obtenues le long de l'orbite seront donc représentées en fonction de la latitude magnétique excentrée puisque, dans le cas de l'orbite quasi polaire de DEMETER la variation en longitude est faible et c'est la latitude qui gouverne très majoritairement la variation des paramètres ionosphériques.

[7] Les perturbations dues à l'éclipse ont été calculées en faisant la différence entre les mesures de l'orbite d'éclipse et les courbes de base qui représentent l'ionosphère de référence. Les résultats sont représentés sur la Figure 2. On voit qu'à 700 km, l'altitude de DEMETER, les profils en latitude de la densité électronique N_e et de la densité N_i des ions O^+ et des températures électronique T_e et ionique T_i montrent des diminutions notables le long des lignes de force qui, à leur extrémité nord et vers 250 km d'altitude, subissent une variation importante du flux solaire dans la zone d'éclipse partielle. On remarque que les variations des densités et des températures ne sont pas simultanées : les températures diminuent plus tôt que les densités à une latitude de $\sim 38^\circ$ à 32° N et retrouvent le niveau de référence vers 15° à 10° N environ. Au contraire la décroissance de N_e et N_i (densité des ions majoritaires O^+) débute lorsque DEMETER atteint la latitude de $\sim 15^\circ$ N et est encore sensible jusqu'à une latitude de -10° S environ. Une analyse plus détaillée fait apparaître des décalages entre les variations de T_e et T_i : la décroissance de T_e précède celle de T_i de quelques degrés en latitude et s'achève avant celle-ci également de l'ordre de quelques degrés en latitude. Nous y reviendrons dans le dernier paragraphe où nous comparons les observations et la modélisation et donnons une interprétation de ces écarts dans le comportement des différents paramètres en examinant les processus physiques qui sont en jeu.

3. Modélisation de l'ionosphère soumise à l'éclipse.

[8] Pour progresser dans la compréhension des effets de l'éclipse et aboutir à une interprétation quantitative nous avons réalisé des simulations de l'ionosphère au moyen du code SAMI2 en l'absence et en présence d'éclipse pour déterminer les perturbations induites par l'éclipse. Ce code [7] décrit la dynamique du plasma dans l'ionosphère et la plasmasphère dans un plan méridien magnétique jusqu'à des latitudes de $\sim 55^\circ$. L'avantage essentiel de ce modèle est d'étendre le calcul à toute la longueur des tubes de force jusqu'à la région D à une altitude de 85 km où les conditions aux limites d'équilibre photo-chimique local peuvent être fixées de façon très réalistes. La production électronique et le dépôt d'énergie par les photo-électrons ont été modifiés pour tenir compte de l'évolution réelle du flux solaire dans le domaine de longitude et de latitude correspondent aux observations de DEMETER.

[9] Les résultats sont représentés sur la Figure 3 sur laquelle ont été également tracées les courbes de variation du flux solaire pour les différents points de l'ionosphère à 700 km correspondant aux positions successives de DEMETER et pour leurs points conjugués Nord et Sud à l'altitude de 250 km. L'altitude de 250 km correspond à l'altitude du maximum du taux d'ionisation et de la production des photo-électrons. Ces courbes ont été calculées de 2 façons différentes. Le premier jeu donne le flux solaire instantané calculé pour chaque temps le long de l'orbite. Le second jeu représente le flux solaire moyen intégré sur les 90 minutes précédentes.

[10] On retrouve une séquence de perturbations très semblable à celle qui est observée par DEMETER. La température électronique T_e décroît dès la latitude de $\sim 44^\circ\text{N}$ avec un écart maximum $\Delta T_e \sim -200\text{K}$ à $\sim 30^\circ\text{N}$, retrouve son niveau normal vers 15°N ; on observe par la suite une augmentation dans un assez grand intervalle de latitude jusqu'à $\sim 20^\circ\text{S}$ avec un maximum vers l'équateur de $\Delta T_e \sim +200\text{K}$. La température ionique T_i décroît avec un léger retard par rapport à T_e à partir de $\sim 35^\circ\text{N}$ et demeure inférieure à la normale jusqu'à $\sim 15^\circ\text{N}$ avec un écart maximum vers 22°N de $\Delta T_i \sim -150\text{K}$. Comme T_e , T_i devient supérieure à la normale entre 15°N et 15°S avec un maximum d'effet $\Delta T_i \sim +200\text{K}$ vers l'équateur. La décroissance de la densité électronique N_e et de la densité des ions majoritaires O^+ Ni intéresse un secteur beaucoup plus étendu en latitude pratiquement entre 30°N et 25°S avec une décroissance maximale $\Delta N_e/N_e$ de l'ordre de ~ 10 à 15% entre 10°N et 10°S .

4. Discussion et conclusion.

[11] Comme le montrent les Figures 2 et 3 les observations fournies par DEMETER et les résultats de la modélisation réalisée avec SAMI2 sont en très bon accord, en ce qui concerne à la fois la gamme de latitude et l'amplitude des effets observés, ce qui est assez remarquable étant donné la difficulté de détermination d'une ionosphère de référence d'une part et, d'autre part, la nécessité de définir de façon relativement empirique les termes de transport (champ électrique de convection et vents thermosphériques) dans le modèle. On distingue 3 effets principaux :

- une décroissance de la densité électronique N_e et de celle des ions majoritaires O^+ Ni sur une région qui s'étend sur un assez grand intervalle de latitude entre 15°N et 10°S sur les données (30°N à 25°S pour le modèle) avec une amplitude maximale comparable $\Delta N_e/N_e \sim -30\%$ centrée vers 10°N (-15% pour le modèle sur une région plus étendue).
- une décroissance des températures électronique T_e et ionique T_i plus rapide, puisqu'elle est sensible, pour T_e , entre 38°N et 15°N sur les données (44°N et 15°N sur le modèle) et, pour T_i , entre 32°N et 15°N sur les données (35°N et 15°N sur le modèle) et avec des amplitudes comparables $\Delta T_e \sim -300\text{K}$ pour les données (-200K pour le modèle) et $\Delta T_i \sim -200\text{K}$ pour les données (-150K pour le modèle). La caractéristique principale est que cette décroissance des températures se manifeste très rapidement, nettement avant celle de la densité, mais sur un intervalle plus réduit en latitude puisque la décroissance T_e et T_i se termine alors que la décroissance de la densité atteint son maximum. L'effet sur la température électronique précède l'effet sur la température ionique.
- pour le modèle, une augmentation des températures après le retour à la normale entre $\sim 15^\circ\text{N}$ et $\sim 15^\circ\text{S}$, effet qu'on peut observer, mais avec une amplitude moindre, sur les mesures de T_e mais qui n'est pas distinguable sur les profils de T_i .

[12] En considérant simultanément les courbes de variation du flux solaire intégrée sur 90 minutes et instantanée, les observations de DEMETER et les résultats du modèle SAMI2 on peut fournir l'interprétation suivante :

- les effets thermiques sont quasi instantanés et liés à la variation instantanée du flux solaire, ce qui peut s'expliquer par la très grande conductivité thermique le long du champ magnétique. Les électrons répondent immédiatement puisque le transfert d'énergie à partir des photo-électrons est quasi-instantané, les ions avec une certaine constante de temps puisqu'ils sont chauffés à partir des collisions avec les électrons et que ce processus est plus lent que le précédent.
- L'effet sur la densité est à la fois plus lent et subsiste plus longtemps puisqu'il résulte d'un ensemble de processus qui sont caractérisés par des constantes de temps beaucoup plus longues, liés à la photo-chimie de la région F, à la diffusion du plasma le long du champ magnétique et au transport sous l'effet du champ électrique et des vents neutres. La densité répond ainsi à la variation du flux solaire intégrée sur une durée de l'ordre de 1 à 2h comme le montre la bonne concordance avec la courbe de la variation du flux solaire moyen sur 90 minutes.
- La conjonction de la décroissance de la densité et du retour progressif à la normale du flux solaire donc de

l'énergie apportée par les photo-électrons, entraîne un effet apparemment paradoxal, l'augmentation de Te et Ti après le maximum de l'éclipse.

[13] Nous avons entrepris un travail d'analyse similaire en utilisant les observations de 2 autres éclipses, l'une en Mars 2007 au dessus de la Chine à plus haute latitude, et l'autre en Juillet 2009 au dessus de la Chine et du Japon. L'ensemble de ces travaux ainsi que la prise en compte des observations ionosphériques effectuées à partir du sol, en particulier au cours de l'éclipse de 2006, devrait apporter un ensemble de résultats nouveaux et intéressants qui permettront d'améliorer la connaissance et la compréhension de la dynamique du plasma dans l'ionosphère et la plasmasphère.

Références bibliographiques

- [1] Bamford, R.A. (2001), The effect of the 1999 total solar eclipse on the ionosphere, *Phys. Chem. Earth (C)*, 26, 373-377
- [2] Boitman, O.N., A.D. Kalikhman and A.V. Tashchilin, (1999), The midlatitude ionosphere during the total solar eclipse of March 9, 1997, *J. Geophys. Res.*, 104, 28,197-28,206
- [3] Cheng, K., Y.-N. Huang and S.-W. Chen (1992), Ionospheric effects of the Solar Eclipse of September 23, 1987, around the equatorial anomaly crest region, *J. Geophys. Res.*, 97, 103-111
- [4] MacPherson, B., S.A. Gonzalez, M.P. Sulzer, G.J. Bailey, F.Djuth and P. Rodriguez, (2000), Measurements of the topside ionosphere over Arecibo during the total solar eclipse of February 26, 1998, *J. Geophys. Res.*, 105, 23,055-23,067
- [5] Berthelier, J.-J., M. Godefroy, F. Leblanc, E. Seran, D. Peschard, P. Gilbert and J. Artru, IAP the thermal plasma analyzer on DEMETER, *Planet. Space Sci.*, 54, 5, 487-501, 2006.
- [6] Lebreton, J.-P., S. Stverak, P. Travnicek, M. Maksimovic, D. Klinge, S. Merikallio, D. Lagoutte, B. Poirier, P.-L. Blelly, Z. Kozacek, M. Salaquarda, The ISL Langmuir probe experiment processing onboard DEMETER: scientific objectives, description and first results, *Planet. Space Sci.*, 54, 5, 472-486, 2006.
- [7] Huba, J.D., G. Joyce and J.A. Fedder, Sami2 is Another Model of the Ionosphere (SAMI2), a new low-latitude ionosphere model, *J. Geophys. Res.*, 105, 23,035, 2000.

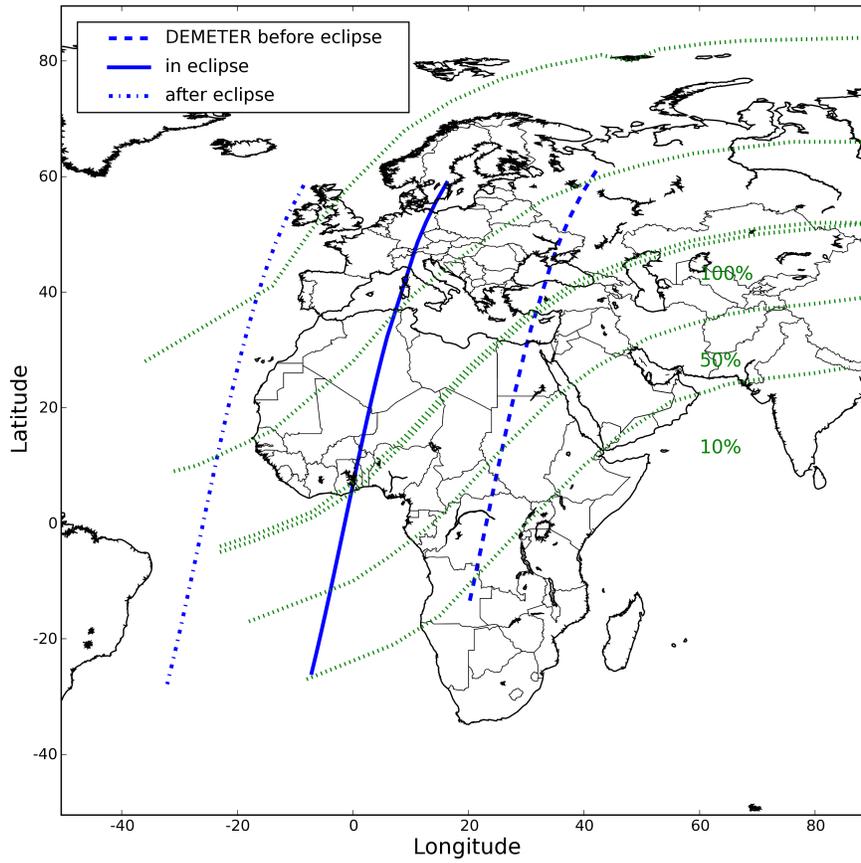


Figure 1. Traces de l'éclipse totale et partielle (courbes pointillées vertes). Trace de la trajectoire de DEMETER (ligne bleue continue) lors de l'éclipse et des deux orbites avant et après l'éclipse (courbes bleues pointillées)

DEMETER observations with approach I

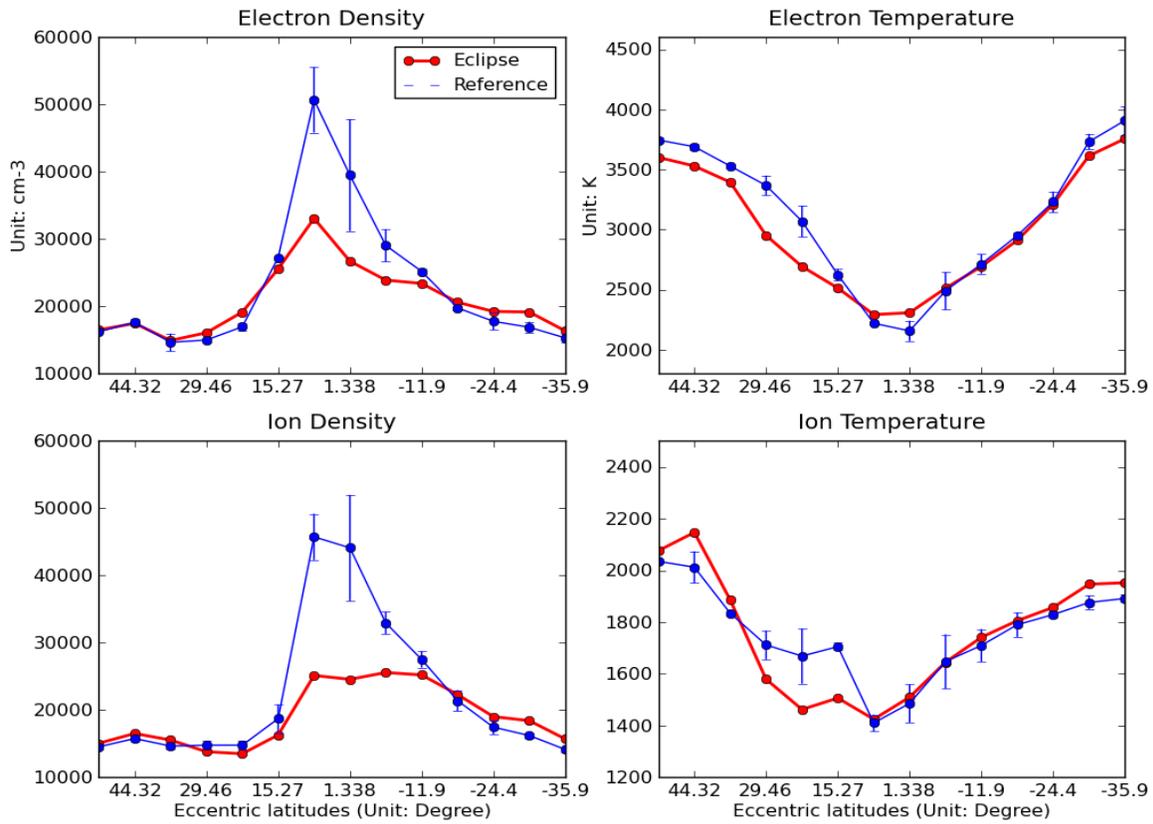


Figure 2. Observations de DEMETER au cours de l'orbite d'éclipse et courbes de base représentant l'ionosphère de référence.

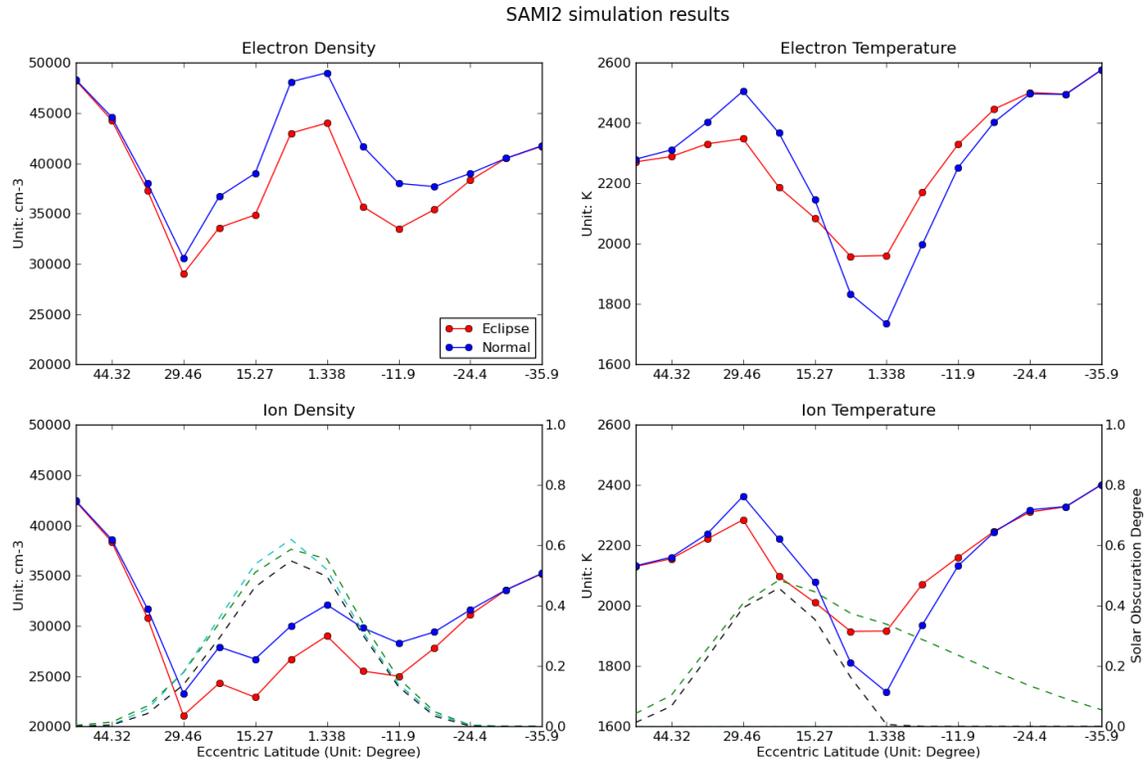


Figure 3. Résultats du modèle SAMI2 en l'absence et en présence d'éclipse permettant de déterminer les perturbation induites par l'éclipse.