

Importance de la prise en compte précise du champ électrique de convection dans la modélisation des ceintures de radiation à basse énergie

Rabia KIRAZ⁽¹⁾, Nour Allah DAHMEN⁽¹⁾, Benoit LAVRAUD⁽²⁾, Vincent MAGET⁽¹⁾

(1) ONERA, DPHY/ERS, Toulouse, France; (2) Laboratoire d'Astrophysique de Bordeaux (LAB), Bordeaux, France

I. Contexte : Dynamique de la magnétosphère interne

La **magnétosphère** joue un rôle de **bouclier** protecteur contre le vent solaire. À l'intérieur de celle-ci, le champ magnétique terrestre emprisonne des particules chargées **hautement énergétiques** (électrons et protons) dans les ceintures de radiation. Recouvrant la majorité des orbites satellites, elles induisent des **risques** pour les systèmes électroniques à bord.

Les acteurs de l'industrie spatiale s'appuient de plus en plus sur des outils dédiés à la météorologie et la climatologie de l'Espace pour comprendre et anticiper les perturbations intenses de l'environnement spatial : les **orages géomagnétiques**. Mesurés par des indices géomagnétiques, ces événements ont un impact sur une large gamme du spectre énergétique (de quelques keV à plusieurs MeV pour les électrons, et plusieurs centaines de MeV pour les protons). Améliorer notre compréhension des processus physiques en action pendant les orages géomagnétiques contribue certainement à renforcer les capacités de prévision de la météo de l'espace.

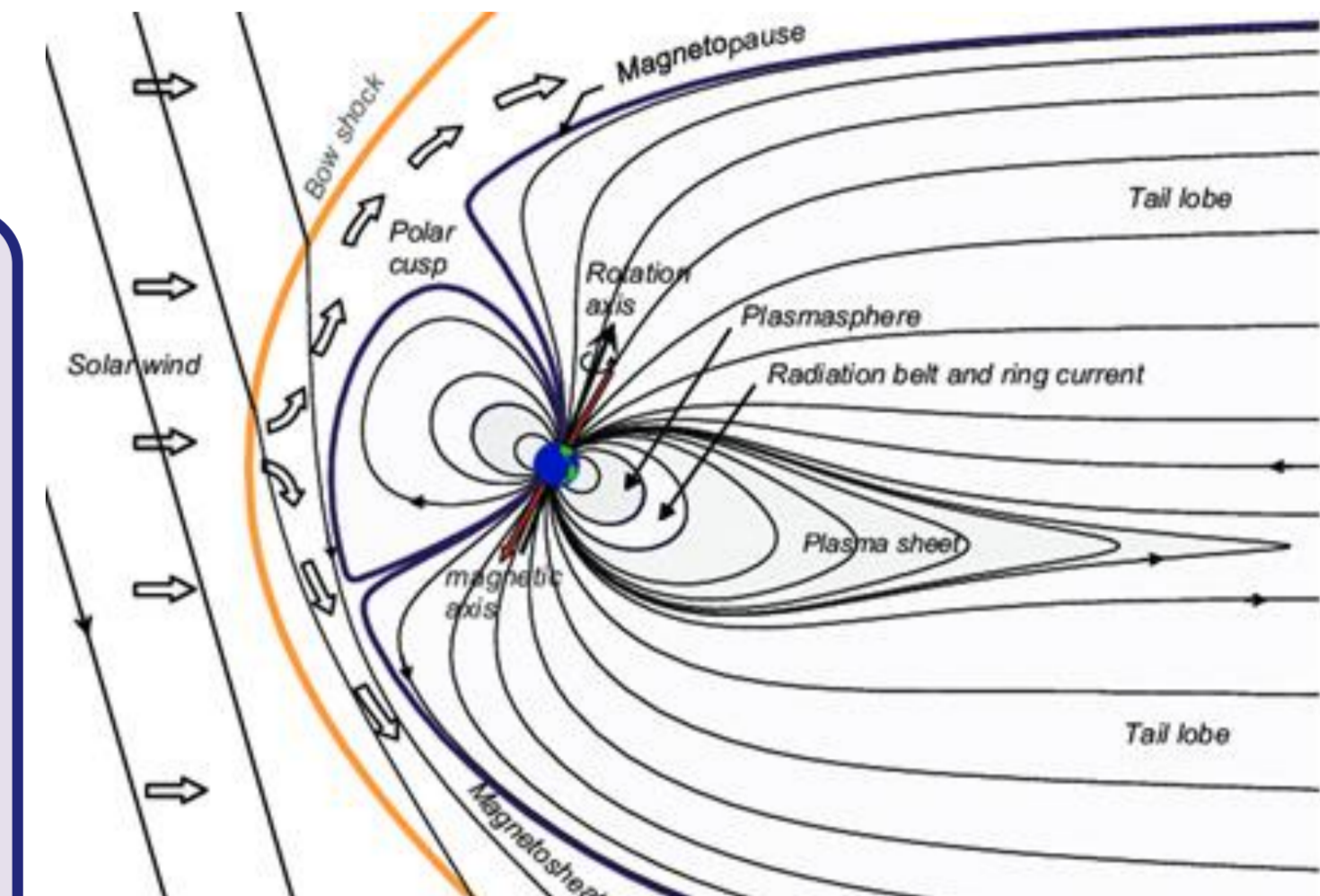


Fig 1. Schéma de la magnétosphère. [6]

II. Modélisation des ceintures de radiation : le code Salammbô

- Développé depuis 1990 [1][2] pour la **Terre** et décliné pour d'autres planètes magnétisées (*Jupiter* et *Saturne*).
- Un modèle **proton** (100keV à 300 MeV) et un modèle **électron** (100 keV à 10 MeV).
- Résolution de l'équation de **Fokker-Planck**.

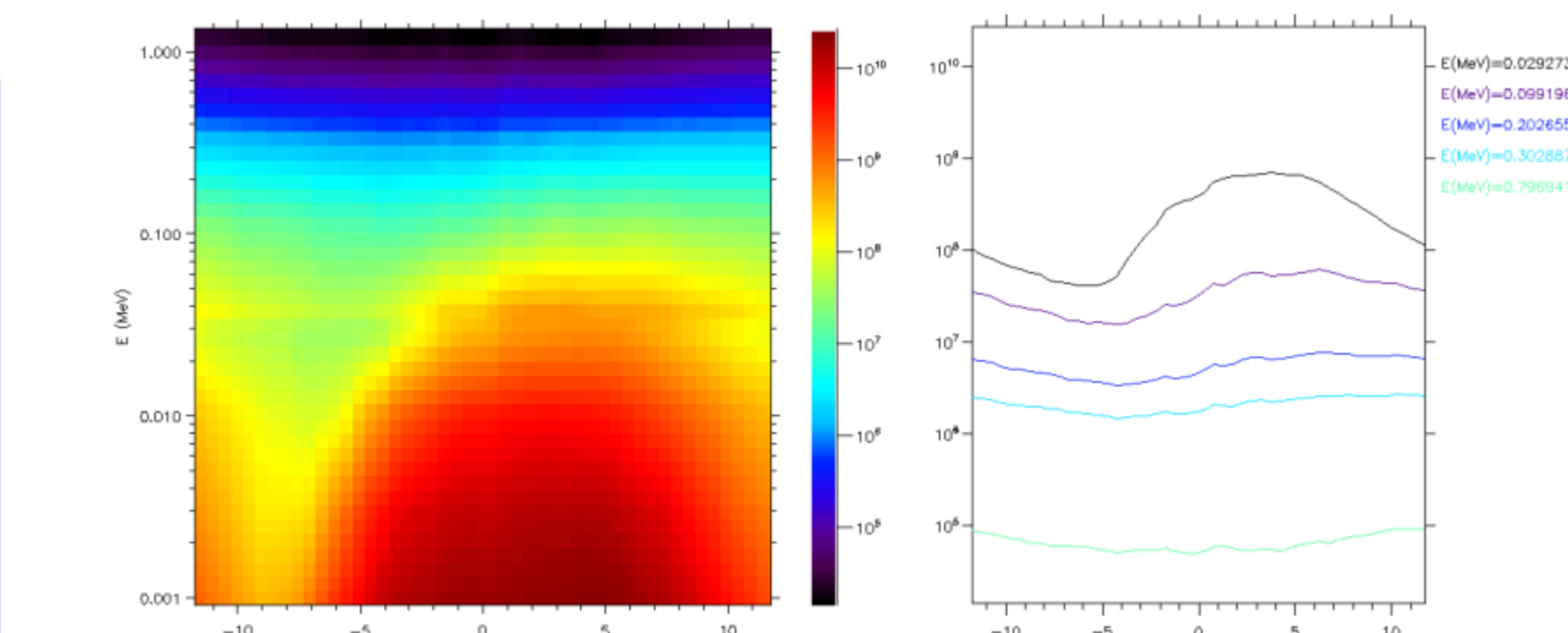


Fig 2. Gauche: Flux moyen des données LANL-GEO en fonction de MLT et de l'énergie des électrons à Kp = 4. Droite: Extraction à 30 keV (en noir), 100 keV (en violet), 200 keV (en bleu foncé), 300 keV (en bleu clair), et 800 keV (en vert). [3]

Equation de Fokker-Planck

$$\frac{d\phi_3}{dt} \frac{\partial f}{\partial \phi_3} + \frac{dJ_3}{dt} \frac{\partial f}{\partial J_3} + \frac{\partial f}{\partial t} = \sum_{i,j=1}^2 \frac{\partial}{\partial J_i} \left(D_{J_i J_j} * \frac{\partial f}{\partial J_j} \right) - \sum_{i=1}^2 \frac{\partial}{\partial J_i} \left[\left(\frac{dJ_i}{dt} \right)_{fric} f \right] + Sources - Pertes$$

Terme de transport dû au champ électrique à basse énergie

Terme de diffusion pure: Salammbô 3D moyenné sur le rebond

Salammbô 4D: ajout du **transport des particules** dû au champ électrique dans le modèle Salammbô. Accès à une résolution temporelle inférieure à la période de dérive. La **symétrie azimutale** autour de la Terre est **rompue** et il est nécessaire d'avoir une dépendance en MLT pour la modélisation des ceintures de radiations (fig 2). [2][3]

III. Transport dû au champ électrique

Le champ électrique magnétosphérique comprend trois composantes :

- Le champ de **corotation** (induit par la rotation de l'ionosphère avec la Terre)
- Le champ de **convection** (dû au couplage entre le vent solaire et la magnétosphère)
- Le champ **induit** (par les variations du champ magnétique).

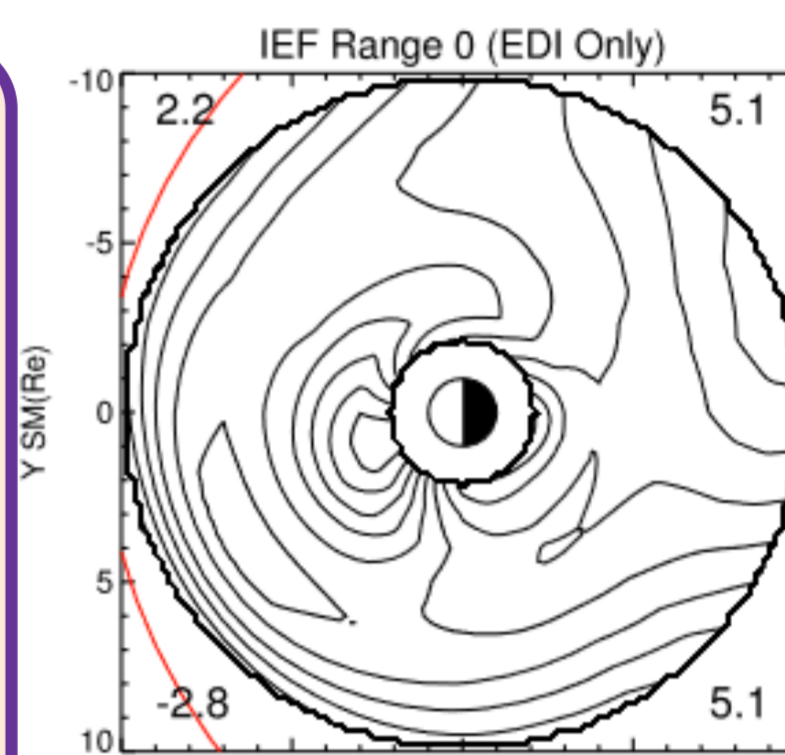


Fig 3. Equipotentiels du champ électrique magnétosphérique mesurés par CLUSTER à bas IEF. [5]

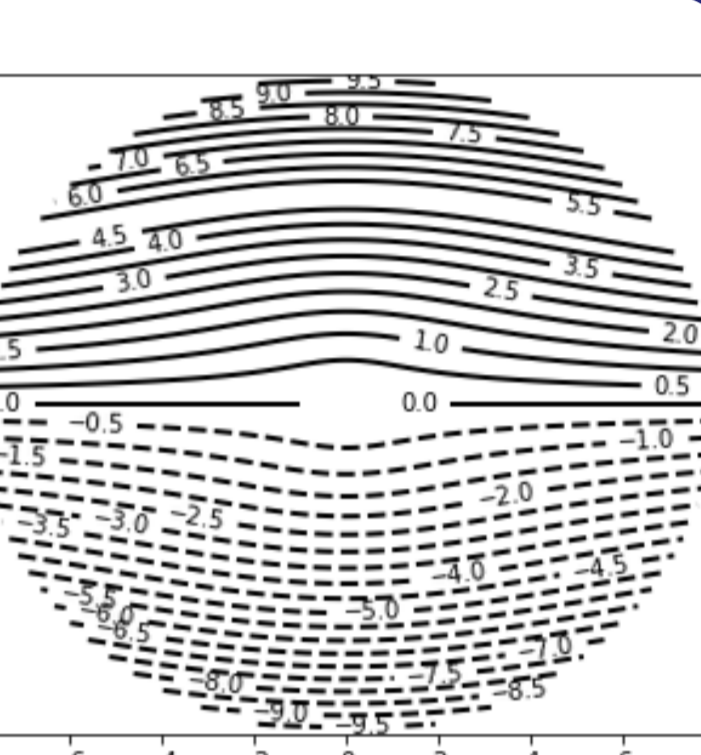


Fig 4. Equipotentiels du modèle Volland Stern - Boscher à Kp=1.

Salammbô 4D

- Le champ électrique induit pris en compte dans la **diffusion radiale**.
- Le modèle de champ électrique de convection : le modèle de **Volland Stern** [4] paramétrisé par Boscher (2010)[7].
- Le phénomène de **transport** caractérisé par deux composantes : radiale and azimutale. Pour un champ dérivant d'un potentiel:

$$\frac{dL^*}{dt} = - \frac{L^{*2}}{R_e^2 B_0} \frac{dV}{d\phi_3} \text{ et } \frac{d\phi_3}{dt} = \frac{L^{*2}}{R_e^2 B_0} \frac{dV}{dL^*}$$

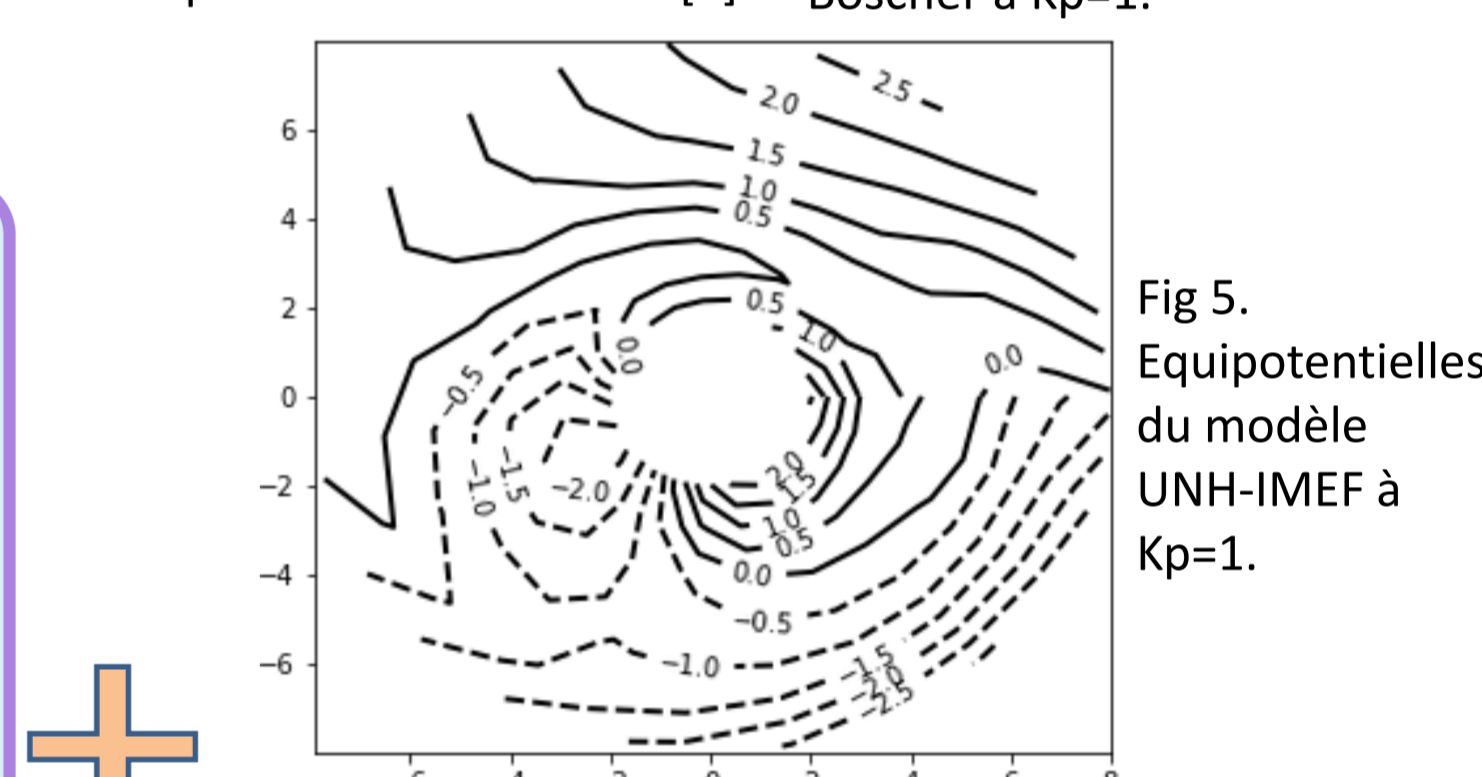
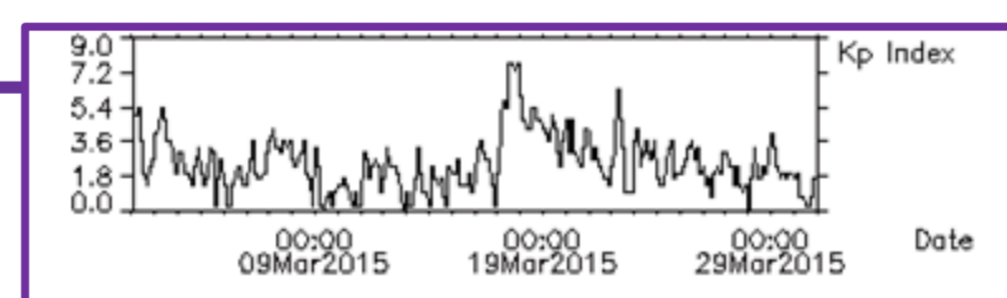


Fig 5. Equipotentiels du modèle UNH-IMEF à Kp=1.

Le modèle numérique **UNH-IMEF** [5] est dérivé des mesures du champ électrique de CLUSTER. C'est un modèle dépendant du Kp et du champ électrique interplanétaire (IEF) et est valide pour des valeurs de Kp allant jusqu'à 6.

V. Cas d'étude : l'orage de mars de 2015 de la Saint Patrick

Flux différentiel d'électrons à 300 keV



Flux différentiel d'électrons à 30 keV

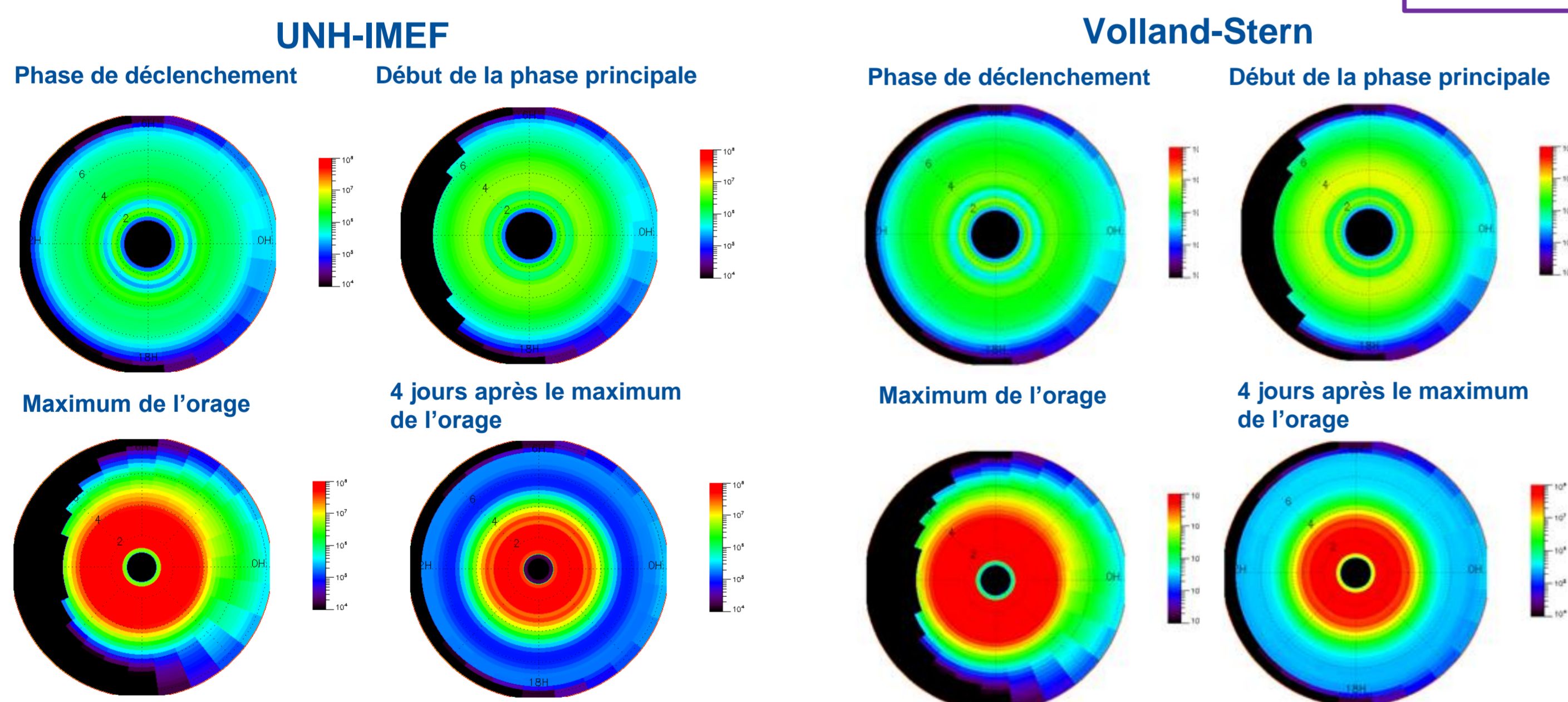


Fig 6. Flux différentiel électron 300 keV vs MLT à différents instants de l'orage géomagnétique de mars 2015 pour des simulations Salammbô 4D avec le modèle de champ électrique de convection de UNH-IMEF (à gauche) et Volland Stern (à droite).

- Les ceintures sont globalement homogènes en MLT sauf au moment du pic de l'orage.
- La simulation avec le champ électrique de convection de Volland Stern présente des flux plus forts qu'avec le champ de convection UNH-IMEF. Cela est dû au fait que l'amplitude du potentiel électrique du modèle de Volland Stern est plus grande que celle du modèle UNH-IMEF.

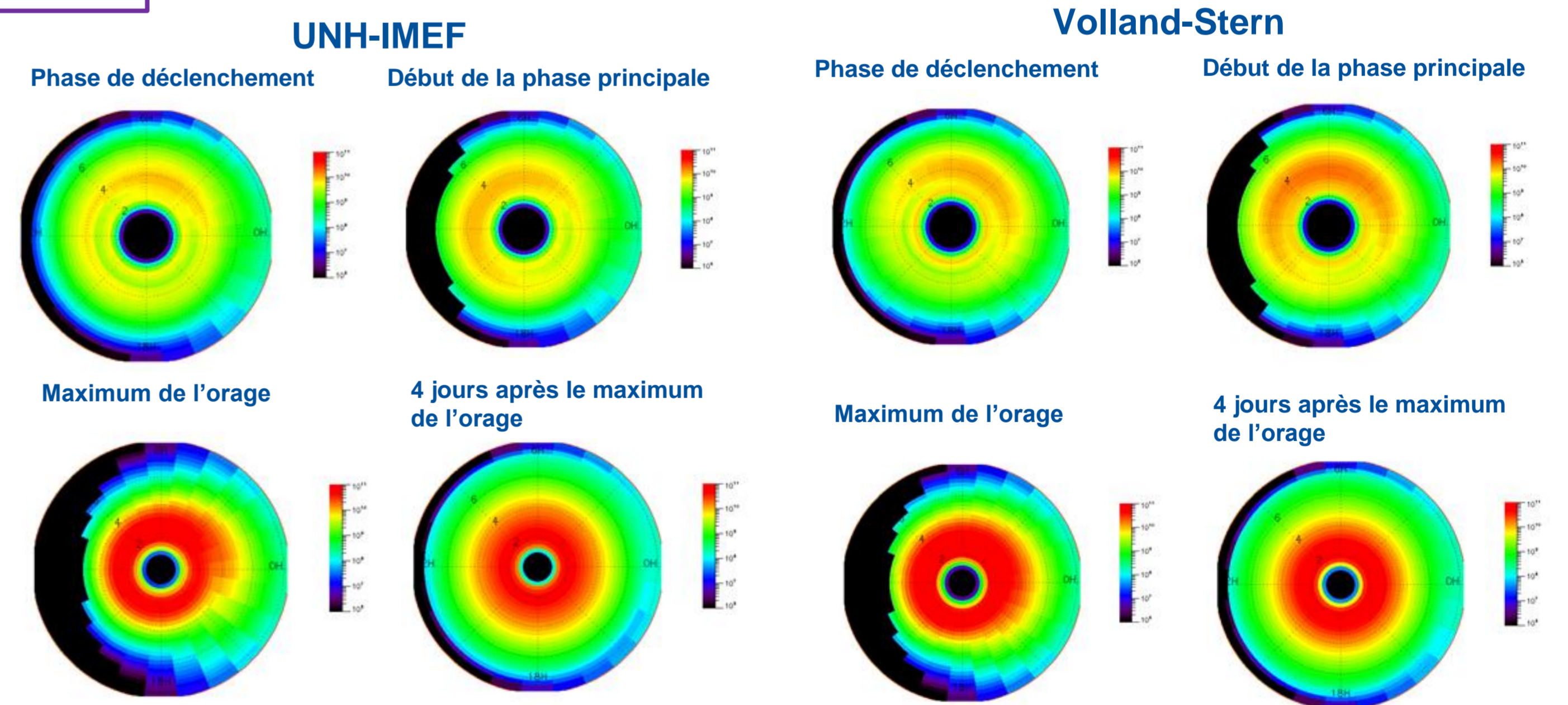


Fig 7. Flux différentiel électron 30 keV vs MLT à différents instants de l'orage géomagnétique de mars 2015 pour des simulations Salammbô 4D avec le modèle de champ électrique de convection de UNH-IMEF (à gauche) et Volland Stern (à droite).

- Les ceintures sont non homogènes en MLT dû au transport des particules.
- Homogénéisation des ceintures seulement 4 jours après l'orage.
- Homogénéisation plus rapide avec le modèle de Volland Stern au maximum de l'orage. Cela s'explique par le fait que le champ électrique de Volland Stern est de plus grande amplitude, les particules sont transportées plus rapidement autour de la Terre par rapport au modèle UNH-IMEF.

Conclusion & Perspectives

- La comparaison des résultats de simulation aux mesures in-situ permettra d'évaluer l'apport du modèle de champs électrique UNH-IMEF sur la dynamique.
- Etude des implications de l'intégration d'une plasmopause dynamique dépendante du Temps Local Magnétique (MLT) dans le modèle 4D de Salammbô.
- Développement d'un modèle pour les protons de basses énergies.

Bibliographie

- [1] Thierry Beutier (1993) – Thèse de Doctorat
- [2] Sébastien Bourdarie (1996) -Thèse de Doctorat
- [3] D. Herrera (2017) - Thèse de Doctorat
- [4] H. Volland (1973) - JGR - Space Physics
- [5] H. Matsui et al. (2013) - Ann. Geophys.
- [6] A. Tenerani (2013) - Thèse de Doctorat
- [7] Boscher et al. (2010) - R&T CNES