L'electrojet équatorial: composante du circuit connectant le vent solaire, la magnétosphère, l'ionosphère, l'atmosphère, et la terre

Christine Mazaudier, Yves Cohen

▶ **To cite this version:**

Christine Mazaudier, Yves Cohen. L'electrojet équatorial: composante du circuit connectant le vent solaire, la magnétosphère, l'ionosphère, l'atmosphère, et la terre. 1991. hal-01009803

HAL Id: hal-01009803
https://hal.science/hal-01009803

Submitted on 4 Jul 2014

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

L' ELECTROJET EQUATORIAL: COMPOSANTE DU CIRCUIT ELECTRIQUE GLOBAL CONNECTANT LE VENT SOLAIRE, LA MAGNETOSPHERE, L'IONOSPHERE, L'ATMOSPHERE ET LA TERRE

CHRISTINE MAZAUDIER

Centre National d'Étude des Télécommunications
Centre de Recherches en Physique de l'Environnement
4 Avenue de Neptune - 94107 Saint-Maur des Fossés Cedex

YVES COHEN

Institut de Physique du Globe de Paris
4 place Jussieu - Tour 24-25 - 75252 Paris Cedex 05

INTRODUCTION

Les courants électriques ionosphériques circulant dans la région dynamo (90-160 km) résultent de l'influence de deux effets dynamo dans l'environnement terrestre : l'un produit par le mouvement de l'atmosphère neutre à travers les lignes de force du champ magnétique terrestre dans la région dynamo ionosphérique; l'autre crée par l'écoulement du vent solaire aux confins de la magnétosphère, où règne le champ magnétique interplanétaire.

Ces courants font partie d'un circuit connectant le vent solaire, la magnétosphère, l'ionosphère et l'atmosphère. Le champ magnétique transitoire créé par l'ensemble de ces courants induit des circulations de courants telluriques, qui dépendent de la conductivité de la croûte et du manteau terrestre.

La connaissance de ce circuit est d'une importance fondamentale en géophysique car:

- il contribue aux variations du champ magnétique terrestre observées au sol et à bord de satellites;
- le fonctionnement de ce circuit gouverne les variations du champ électrique qui est le moteur des mouvements du plasma ionosphérique dans l'ionosphère en région F (altitudes supérieures à 180 km) et dans la magnétosphère;
- enfin ce circuit couple entre elles les dynamiques des différentes composantes de la haute atmosphère, de la thermosphère, de l' ionosphère et de la magnétosphère.

L'électrojet équatorial est une composante de ce circuit dont l'étude à l'échelle globale reste à faire.

HISTORIQUE SUR LES COURANTS ELECTRIQUES IONOSPHERIQUES

La variation régulière

C'est par l'analyse des variations du champ magnétique terrestre que l'étude des courants électriques ionosphériques a débutée. En 1722, Graham mit en évidence la variation diurne du champ magnétique. Des travaux systématiques d'analyse de cette variation commencèrent en 1850, et c'est en 1882 que Balfour Stewart proposa pour expliquer cette variation la circulation d'un fluide partiellement ionisé dans la haute atmosphère. Cette circulation, dont la géométrie est liée à l'illumination solaire, donne naissance à des courants électriques réguliers dont les effets magnétiques seraient ceux observés journellement.

A la fin du siècle dernier, Schuster développa l'étude de ces courants en appliquant à la variation régulière d'origine solaire du champ magnétique, les méthodes d'analyse en harmoniques sphériques développées par Gauss en 1839.

Considérant la terre comme une surface fermée, qu'aucun courant ne traverse, il est alors possible de séparer le potentiel magnétique en deux termes: terme dû aux sources internes au globe terrestre; terme dû aux sources externes.

Schuster a montré que la source principale des variations temporelles diurnes du champ magnétique était externe à la terre. Se donnant des hypothèses sur la nappe de courant externe (une sphère conductrice de faible épaisseur, 45 km, entourant la terre à une distance de 1500 km) il a établi la première carte de courants électriques équivalents en 1889. Le problème n'est pas simple car une telle sphère conductrice induit des courants dans la terre, qui à leur tour génèrent un champ magnétique. Schuster a identifié la partie mineure de la variation temporelle diurne du champ magnétique due aux courants induits dans la terre conductrice par les courants externes.

Les sources externes et internes ne sont pas indépendantes

Le champ magnétique total est la somme des différentes composantes: le champ principal produit par la dynamo nucléaire (Bp), (source interne); le champ du à l'aimantation des roches crustales et lithosphériques (Ba), (source interne); le champ produit par les courants ionosphériques (Be), (source externe); le champ produit par les courants telluriques (Bi), (couplage externe-interne)

$$B = Bp + Ba + Be + Bi \qquad (1a)$$

Les amplitudes des composantes du champ magnétique terrestre sont très différentes; dans l'ionosphère, l'amplitude du champ principal, Bp, varie de 30000 nT à 60000 nT, de l'équateur au pôle; celle du terme d'aimantation, Ba, est constante et de l'ordre de 20 nT. Les amplitudes des composantes Be et Bi dues aux sources extérieures sont de l'ordre de 10 à 1000 nT, selon la latitude; elles ne sont pas indépendantes. Rappelons aussi que les échelles de temps des variations de ces composantes sont aussi très différentes: le terme

principal, Bp, varie à l'échelle séculaire, alors que les termes dus aux sources externes (Be et Bi), présentent des variations à des échelles de temps variant de la fraction de seconde au cycle solaire (11 ans).

Le champ d'aimantation étant constant, la variation de B ne dépend que des termes Bp, Be, et Bi.

$$\Delta B = \Delta Bp + \Delta Be + \Delta Bi \qquad (1b)$$

C'est aussi Schuster qui relia les variations barométriques aux variations magnétiques.

Il remarqua que le système de vents associés aux variations de pression est exactement identique en direction et phase à celui nécessaire pour expliquer les courants électriques à l'origine des variations du champ magnétique. Mais il ne réussit pas à trouver l'explication de cette observation, qui sera établie vers les années 1960.

Tous les travaux de Schuster ont été effectués avant la découverte de l'ionosphère.

En 1901, l'expérience de Marconi consistant à établir une liaison radio entre deux points éloignés du globe, conduisit Kennelly et Heaviside à postuler l'existence d'une couche conductrice permanente: l'Ionosphère. Au cours des années 1925 et 1929, les travaux d'Appleton et Hartree sur la propagation des ondes radio dans un milieu ionisé permirent le développement de la recherche expérimentale ionosphérique basée sur l'utilisation de la technique radar

Continuant les travaux de Schuster, Chapman, en 1919, établit la première carte du système de courants électriques équivalents Sq à partir des variations régulières du champ magnétique terrestre observées durant les périodes de faible activité magnétique aux moyennes et basses latitudes .

Chapman modélisa l'ionosphère (alors découverte), comme une couche plane conductrice infinie au-dessus d'une terre plane. L'effet magnétique produit à la surface de la terre, calculé en intégrant la loi de Biot et Savart sur l'ensemble de ce plan, est perpendiculaire au terme courant source et a pour expression:

$$\Delta B = (2\pi /10f).J \qquad (2)$$

ΔB est la variation magnétique en nanoteslas, J, le courant intégré sur l'épaisseur de la nappe ionosphérique en Ampère par kilomètre et f un facteur prenant en compte les courants telluriques.

La figure 1 présente le système de courant Sq "idéal". Il est composé principalement de deux vortex de courant, un par hémisphère, centrés sur le midi local. C'est un système fixe par rapport au soleil et une station de mesure le voit défiler au dessus d'elle au cours de la journée. La circulation des courants équivalents s'effectue dans le sens des aiguilles d'une montre dans l'hémisphère sud et en sens inverse dans l'hémisphère nord. A droite de la figure 1 sont dessinées les variations magnétiques observées au sol, pour l'équinoxe, qui correspondent au système de courant Sq (S: solar, q: quiet). La figure 1 ne prend pas en compte l'électrojet équatorial. Ce n'est qu'en 1922 que les premiers enregistrements de la variation régulière du champ magnétique à Huancayo révélèrent

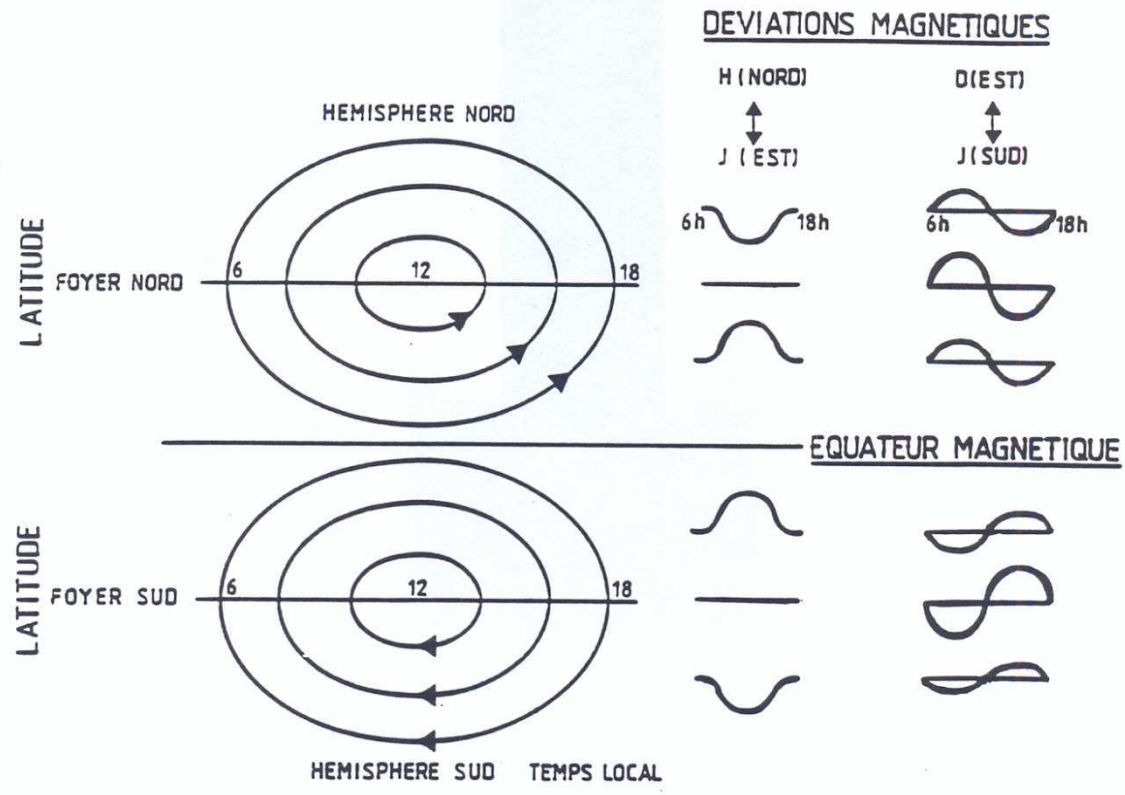


Fig. 1 Le système de courant Sq "Idéal"

que l'amplitude de cette variation régulière avait une amplitude deux fois et demi supérieure à l'amplitude observée aux moyennes latitudes. C'est en 1951 que Chapman donna le nom "d'électrojet équatorial" à cette intensification de l'amplitude de la variation régulière du champ magnétique en zone équatoriale.

La définition du système de courants Sq a été le point de départ de développements théoriques sur la dynamo ionosphérique.

La loi d'Ohm ionosphérique relie les différents paramètres électrodynamiques ionosphériques :

$$\vec{J} = \bar{\sigma}\left(\vec{Ep} + \vec{Vn} \times \vec{B}\right) \qquad (3)$$

La source de rayonnement solaire produit des mouvements de l'atmosphère neutre $(\vec{Vn})$ qui entraîne les ions dans son mouvement à travers les lignes de force du champ magnétique terrestre, créant ainsi un champ d'induction dynamo primaire $(\vec{Vn} \times \vec{B})$. Les accumulations de charge d'espace produites par la circulation de ces courants primaires créent alors un champ électrostatique $(\vec{Ep})$.

Le courant total est la somme des deux termes. Le tenseur de conductivité ionosphérique $(\bar{\sigma})$ est lié à la mobilité des particules; il s'exprime en fonction des gyrofréquences (Ω) et des fréquences de collisions (ν) entre les particules ionisées et les atomes neutres du plasma ionosphérique.

En 1940, Chapman et Bartels puis Maeda, en 1955, développèrent cette théorie. A partir des variations du champ magnétique terrestre, ils déterminèrent le système de vents, sources des courants électriques ionosphériques dont ils situèrent la circulation dans la zone d'altitude entre 110 et 120 km.

Ce n'est que plus tard, aux environs des années 1960, que les mesures faites à bord de fusées tirées dans l'atmosphère permirent de préciser la nature et l'origine des mouvements atmosphériques.

De 1954 à 1963, Siebert, Butler et Small identifièrent l'une des composantes dynamiques principales dans la génération des courants électriques: les marées atmosphériques dues à l'absorption du rayonnement solaire par la vapeur d'eau et la couche d'ozone stratosphérique. C'est Stening, en 1969, qui fit la première simulation de la théorie dynamo, introduisant les modes de marées atmosphériques pour décrire les mouvements atmosphériques à l'origine des courants électriques réguliers.

La variation perturbée

Dès le début de l'observation du champ magnétique terrestre, on observa que celui-ci présentait certains jours une variation particulière et irrégulière ne correspondant pas à la variation régulière observée les autres jours. Certaines observations en zone aurorale permirent de mettre en évidence le fait que les aurores étaient associées à une grande partie de ces variations irrégulières du champ magnétique. D'autres variations irrégulières sont observées durant des périodes de calme magnétique, tel que le contre-électrojet; ces perturbations ne sont pas reliées directement à l'activité aurorale; elles ont été appelées variations "anormales" du Sq.

En 1808, Humboldt donna le nom d'orage magnétique à ces phénomènes sporadiques. Gauss montra qu'ils provoquaient une perturbation du champ magnétique qui se superposait à la variation régulière diurne. Il fallut ensuite de nombreux travaux pour relier la statistique d'occurrence des orages magnétiques au cycle solaire.

En 1922, Chree établit définitivement la corrélation entre les forts évènements solaires et les orages magnétiques. De très nombreux travaux sur les orages magnétiques suivirent.

Deux contributions fondamentales à la connaissance du circuit global de courants ont été faites par Birkeland durant les années 1908 et 1913, et par Störmer au cours des années 1907, 1911 et 1913; elles ont permis la définition de deux éléments importants: les courants alignés, circulant le long des lignes du champ magnétique terrestre (particulièrement forts en zones aurorales), et le courant annulaire circulant dans le plan équatorial de la magnétosphère.

Ces derniers influencent directement les variations du champ magnétique

C'est en 1931 que Chapman et Ferraro proposèrent le premier modèle d'orage magnétique. Ils utilisèrent, pour représenter l'action magnétique du soleil durant les orages, l'image d'un plan conducteur non magnétisé en avant du dipôle terrestre. Des courants électriques sont associés à cette discontinuité magnétique et sont communément appelés courants Chapman-Ferraro. C'est en fait la première définition des courants électriques de la magnétopause (surface enveloppant la cavité magnétique du champ terrestre appelée magnétosphère).

En 1939, Alfven apportait l'idée fondamentale pour expliquer tous les phénomènes électriques magnétosphériques associés aux orages: la pénétration du champ électrique interplanétaire dans la cavité magnétosphérique, à l'origine de la convection du plasma magnétosphérique. Plus tard avec le lancement des premiers satellites vers les années 1960, les mesures dans la magnétosphère furent possible et permirent de vérifier certains de ces éléments . L'existence du vent solaire et du champ magnétique interplanétaire furent notamment établies, vérifiant ainsi l'idée de la dynamo vent solaire/magnétosphère

APPROCHE ACTUELLE DES MECANISMES À L'ORIGINE DES COURANTS: APPORT DES MESURES IN SITU (1961-1986)

Dynamo ionosphérique

L'absorption du rayonnement solaire ultraviolet par l'ozone, la vapeur d'eau de la stratosphère (altitude 40 à 50 km), et l'oxygène moléculaire dans la basse thermosphère (aux altitudes supérieures à 80 km) engendre des oscillations de l'atmosphère neutre organisées à l'échelle planétaire (marées thermiques atmosphériques) ou locale (ondes de gravité) qui se propagent vers le haut et interfèrent pour donner un système complexe de mouvements de l'atmosphère neutre.

Les travaux menés par la communauté française sur l'ionosphère aux moyennes latitudes durant les deux dernières décennies, à l'aide du sondeur ionosphérique à diffusion incohérente de Saint-Santin, ont permis de caractériser les variations régulières des paramètres électrodynamiques $\left(\bar{\sigma}, \vec{E_p}, \vec{V_n}, \vec{J}\right)$ et d'apporter ainsi la preuve expérimentale que la loi d'Ohm ionosphérique est applicable localement.

Trois études ont été fondamentales dans la compréhension des courants électriques ionosphériques: celle de Bernard sur les marées atmosphériques, celle de Blanc sur les champs électriques, et celle de Mazaudier sur les courants électriques. Les Travaux de Bernard ont montré que la source liée au vent

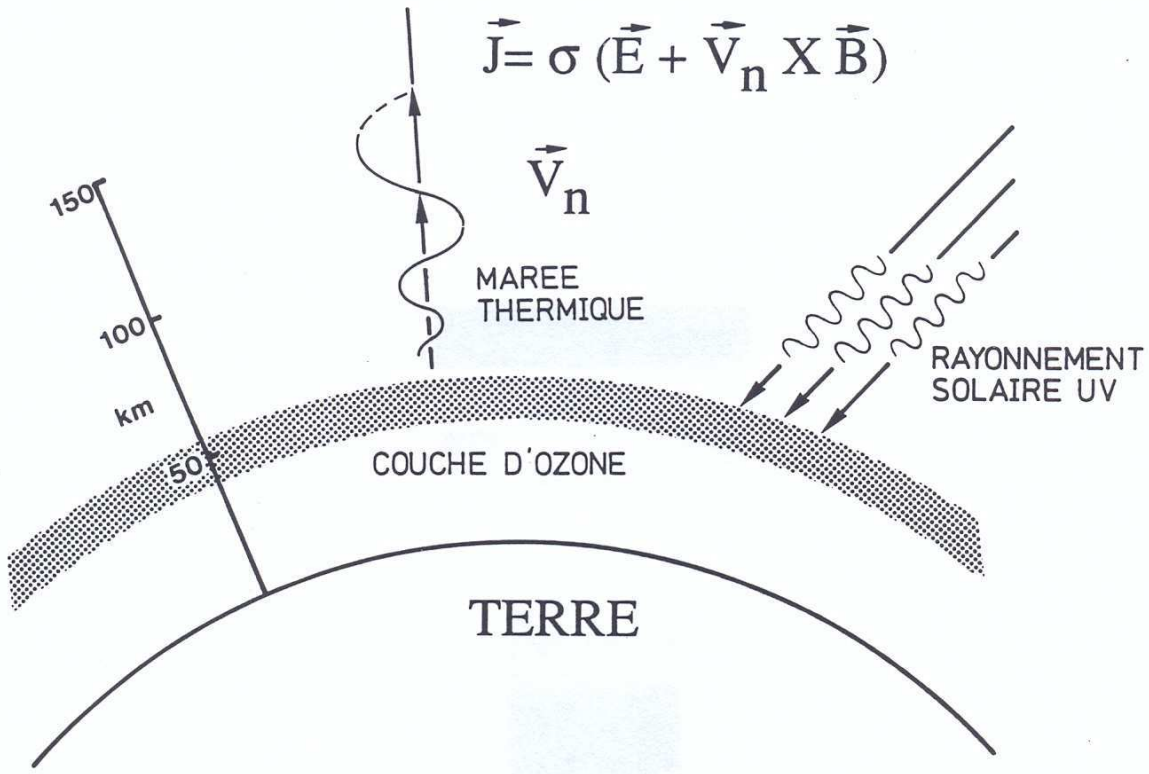


Fig. 2 Source principale des courants électriques ionosphériques : les marées atmosphériques [*Evans, Rev. Geophys. Space Phys., 16, 195*, 178]

neutre et créant les courants ionosphériques réguliers, était à Saint-Santin principalement constituée par des modes de marées générés au niveau de la couche d'ozone. La figure 2 illustre ce mécanisme.

Dynamo vent solaire/magnétosphère

Le vent solaire est un plasma magnétisé sans collision de faible densité qui s'écoule continuellement autour de la magnétosphère terrestre à une vitesse moyenne $(\vec{V}s)$ d'environ 400 km/s. Dans cet environnement règne le champ magnétique interplanétaire Bi.

Par ce mouvement un champ électrique dynamo $\vec{E} = -\vec{V}s \times \vec{B}i$ est vu dans le répère terrestre, conséquence du "gel" du champ magnétique interplanétaire dans le plasma solaire. Il est partiellement transmis à la magnétosphère.

Après la découverte du vent solaire, en 1961, différentes théories furent développées pour expliquer son interaction avec la magnétosphère. Deux mécanismes physiques sont actuellement invoqués pour ce transfert: l'interaction visqueuse entre le vent solaire et la magnétosphère, et la reconnexion des champs magnétiques terrestre et interplanétaire :

- l'interaction visqueuse entre le vent solaire et la magnétosphère proposée par Axford et Hines en 1961, est l'entraînement par le plasma solaire d'une partie du plasma magnétosphérique proche de la magnétopause, frontière extérieure de la magnétosphère en contact avec le milieu interplanétaire. La charge d'espace engendrée par ce processus au voisinage de cette frontière produirait un champ électrique dirigé de l'aube vers le crépuscule aux bornes de la magnétosphère. La figure 3a illustre le processus d'interaction visqueuse.

- la reconnexion des champs magnétiques terrestre et interplanétaire est la jonction entre les lignes des deux champs. Le potentiel électrique interplanétaire est alors transmis suivant les lignes magnétiques nouvelles ansi formées. Ce mécanisme, proposé par Dungey en 1961, est présenté sur la figure 3b.

L'influence de la dynamo vent solaire/magnétosphère et la présence de l'atmosphère neutre provoquent la circulation de courants électriques dans l'ionosphère des hautes latitudes. Durant les périodes de calme magnétique, ces courants restent confinés à la calotte polaire. La figure 4a illustre le système de courants équivalents déduit d es observations magnétiques par Nagata et Kokubun en 1962. Ce système nommé SqP (S: Solar, q: quiet P: Polar) est composé de deux vortex confinés sur la calotte polaire avec leurs foyers respectivement côté aube et côté crépuscule. Cette géométrie est expliquée par la source, la dynamo vent solaire/magnétosphère.

Aux environs des années 1975, les mesures radar en zone aurorale permirent d'obtenir des cartes décrivant le mouvement de convection du plasma dans l'ionosphère des hautes latitudes. La figure 4b représente une carte obtenue avec le radar EISCAT en 1987.

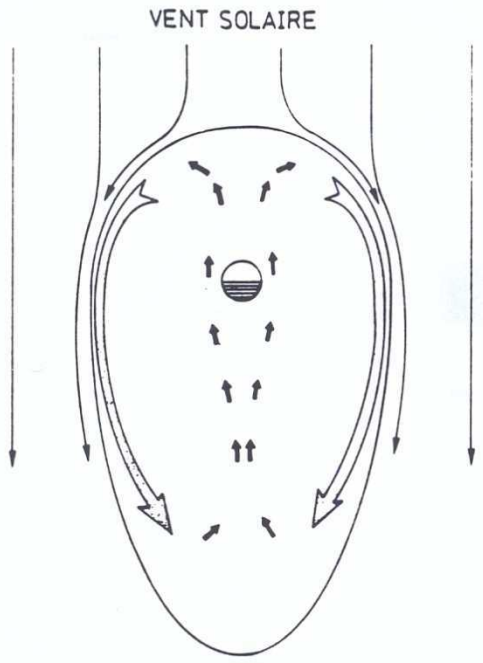


Fig. 3a Interaction visqueuse entre le vent solaire et la magnétosphère [*Axford et Hines, Can. J. Phys., 39, 1433*, 1961]

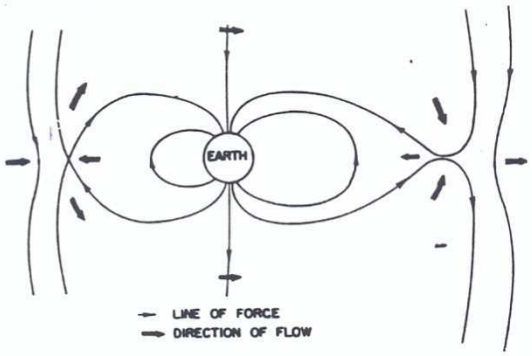


Fig. 3b Reconnection des champs magnétiques interplanétaire et terrestre [*Dingey, Phys. Rev. Lett., 6, 47*, 1961]

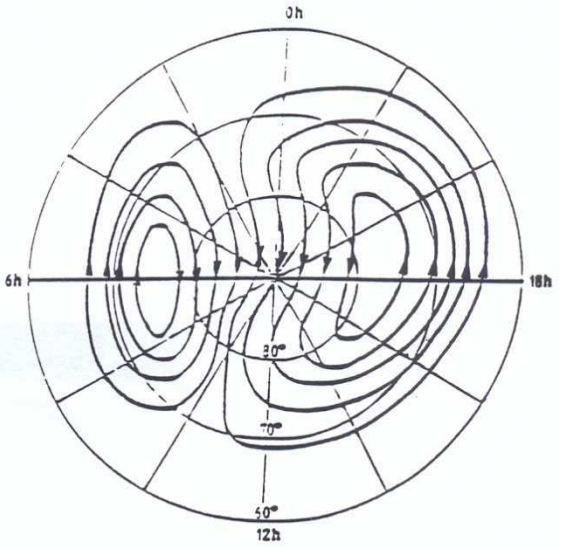


Fig. 4a Sq^p, déduit des observations du champs magnétique [*Nagata et Kokubun Rep. Ionosph. Space Res. Japan, 16, 250*, 1962]

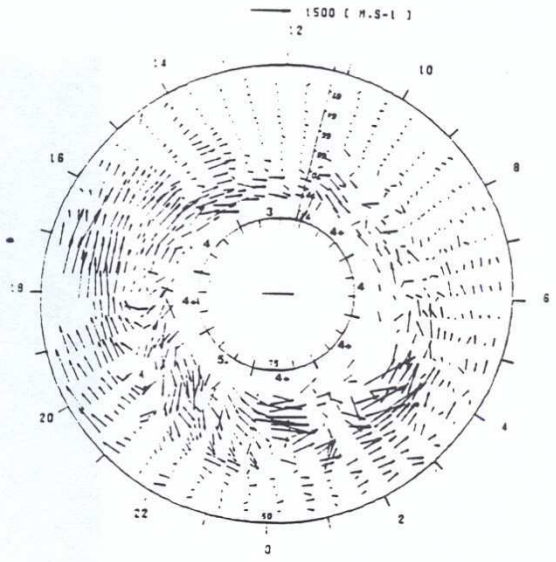


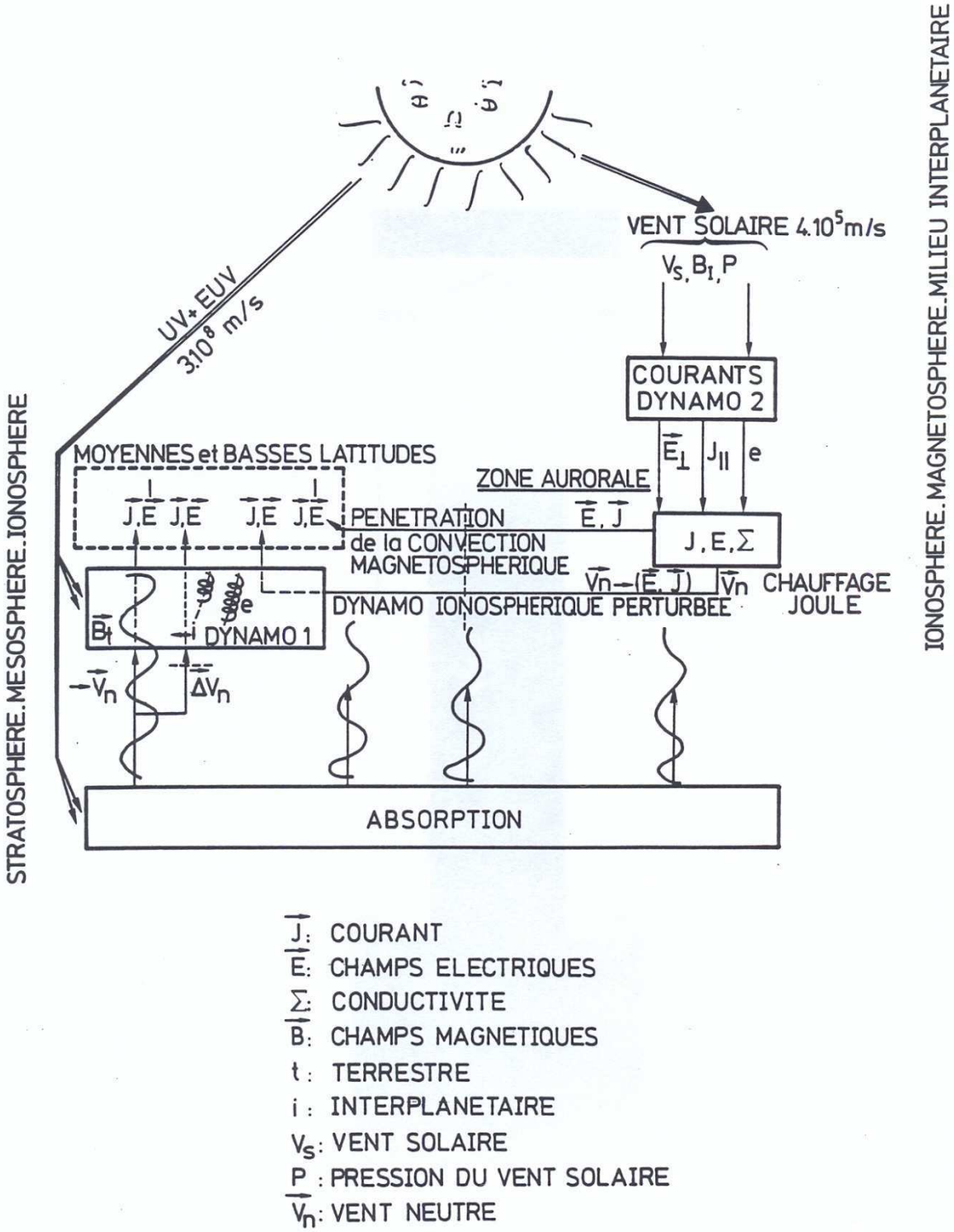
Fig. 4b Vitesse de convection du plasma ionosphérique, observé par le radar EISCAT, le 13 ocrobre 1987, à 275 km [*Senior et al., Ann. Geophyscae, 8, 257*,1990]

ETUDES DES RELATIONS ENTRE LES DYNAMOS EXTERNES ET L'ELECTROJET EQUATORIAL: LA CONTRIBUTION DE LA COMMUNAUTE FRANÇAISE DE GEOPHYSIQUE EXTERNE (1987-1991)

Avant de s'intéresser à l'ionosphère aurorale (avant 1978), les ionosphéristes français ont étudié l'ionosphère équatoriale. Au cours de la période 1967 à 1977, les travaux menés par Crochet et Hanuise sur les irrégularités de densité électronique et par Ducastel et Vila sur la densité électronique en région F équatoriale (h>180 km) ont permis de progresser dans la connaissance des intabilités du plasma équatorial, la physique de l'électrojet et la dynamique de l'ionosphère.

D'autres études de l'électrojet équatorial menées par la communauté s'intéressant au magnétisme terrestre, Gouin, Fambitakoye, Mayaud, ont permis de définir les caractéristiques morphologiques de l'électrojet dans le secteur Afrique de l'ouest, d'en étudier la variation régulière et ainsi de mettre en évidence le phénomène de contre-électrojet dont nous parlerons ultérieurement.

Les mesures des sondeurs à diffusion incohérente obtenues durant les deux dernières décennies ont permis de comprendre, à l'échelle planétaire, les mécanismes physiques de couplage entre l'ionosphère aurorale et l'ionosphère équatoriale, entre les basses couches de l'atmosphère et l'ionosphère. Il est donc nécessaire de reprendre les études sur l'électrojet équatorial en les plaçant dans le contexte des connaissances géophysiques actuelles.



$\vec{J}$: COURANT
$\vec{E}$: CHAMPS ELECTRIQUES
Σ: CONDUCTIVITE
$\vec{B}$: CHAMPS MAGNETIQUES
t : TERRESTRE
i : INTERPLANETAIRE
V_s: VENT SOLAIRE
P : PRESSION DU VENT SOLAIRE
$\vec{V_n}$: VENT NEUTRE

Fig. 5 Schéma général [*Mazaudier, Thèse d'Etat, Université Paris VI*, 1983]

Dans la suite de ce document nous décrirons les résultats acquis durant les quatre dernières années, concernant l'électrodynamique de l'ionosphère à l'échelle planétaire.

Les travaux effectués par la communauté française au cours des années 1975 à 1983 ont conduit au schéma de synthèse présenté sur la figure 5 et ont fait l'objet d'exposés et articles de synthèse [*Mazaudier*, 1987a; 1989]. Cette figure illustre les effets des sources (la source rayonnement et la source vent solaire), et les couplages entre les dynamos (la dynamo ionosphérique et la dynamo vent solaire/magnétosphère) au travers des processus physiques se développant à l'échelle planétaire, infuençant donc l'électrojet équatorial. Les figures 6a, 6b, 6c, présentent le développement spatial des phénomènes. La figure 6a correspond à la source rayonnement solaire et au système de courants réguliers. La figure 6b représente le mécanisme de pénétration du champ électrique dû à la convection magnétosphérique des hautes vers les basses latitudes (première ligne horizontale dirigée de la droite vers la gauche de la figure 5: des hautes vers les basses latitudes) La figure 6c représente le mécanisme de la dynamo ionosphérique perturbée (deuxième ligne horizontale de la figure 5).

D'autres études de synthèse ont été réalisées sur la convection magnétosphérique [*Caudal*, 1987; *Caudal et Blanc*, 1988] et sur les modèles thermosphériques [*Oliver et al.*, 1988].

Dynamo ionosphérique - connection avec l'électrojet équatorial

L'analyse de la variation régulière diurne du champ magnétique SR à l'équateur magnétique durant les périodes de calme magnétique "absolu" (périodes pour lesquelles l'action de la source vent solaire est très faible) a montré que

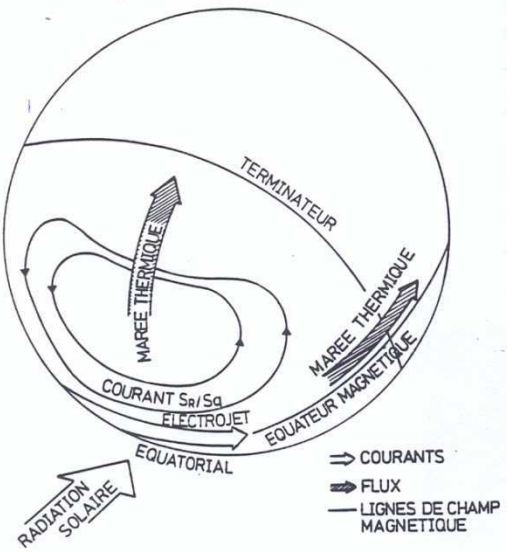


Fig. 6a La dynamo ionosphérique régulière. Sur la face éclairée de la terre est représenté le système de courant équivalent Sr/Sq déduit des composantes H et D du champ magnétique terrestre. Les courants circulent en sens inverse des aiguilles d'une montre dans l'hémisphère nord. Sur cette figure sont aussi représentés les mouvements de migration zonal et méridional des marées atmosphériques, ainsi que l'électrojet équatorial.

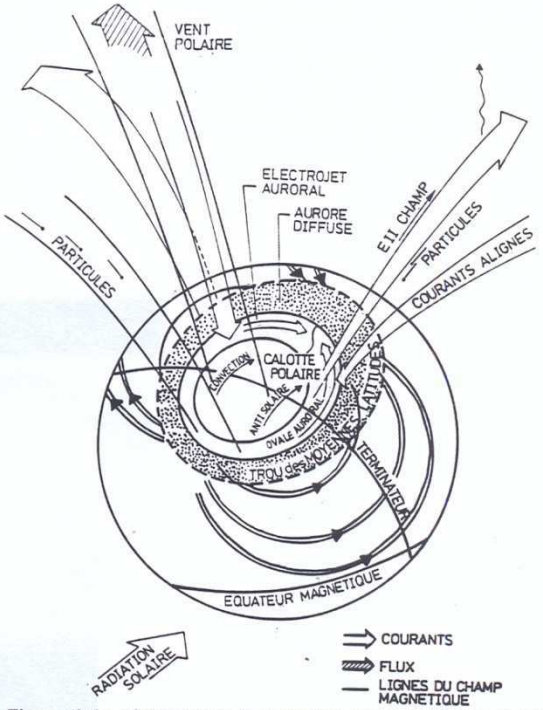


Figure 6b La pénétration de la convection magnétosphérique. Sur la calotte polaire encerclée par la zone aurorale, est représenté le mouvement ainti-solaire du plasma ionosphérique. Dans l'ionosphère auroral, durant les périodes d'activité magnétique, circulent des courants électriques intenses: l'électrojet Est, côté matin, et électrojet Ouest, côté soir. A Saint-Santin, on observe généralement, une extension de l'électrojet vers les basses latitudes.

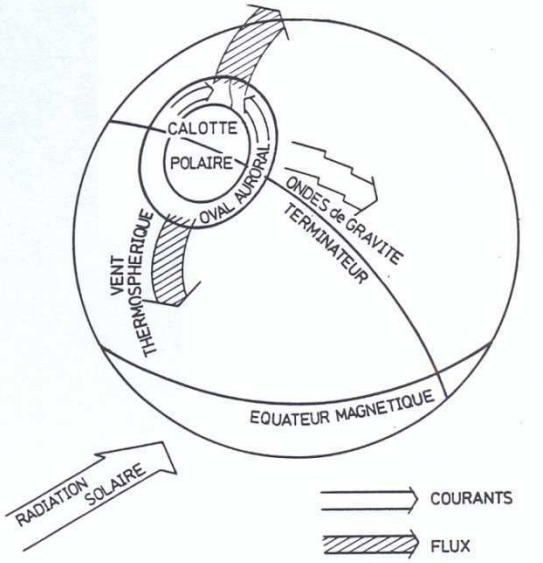


Fig. 6c La dynamo ionosphérique perturbée. Durant les périodes de forte activité magnétique, les électrojets auroraux chauffent par effet Joule l'atmosphère, et créent dans la thermosphère un mouvement de convection de l'air du pôle vers l'équateur.

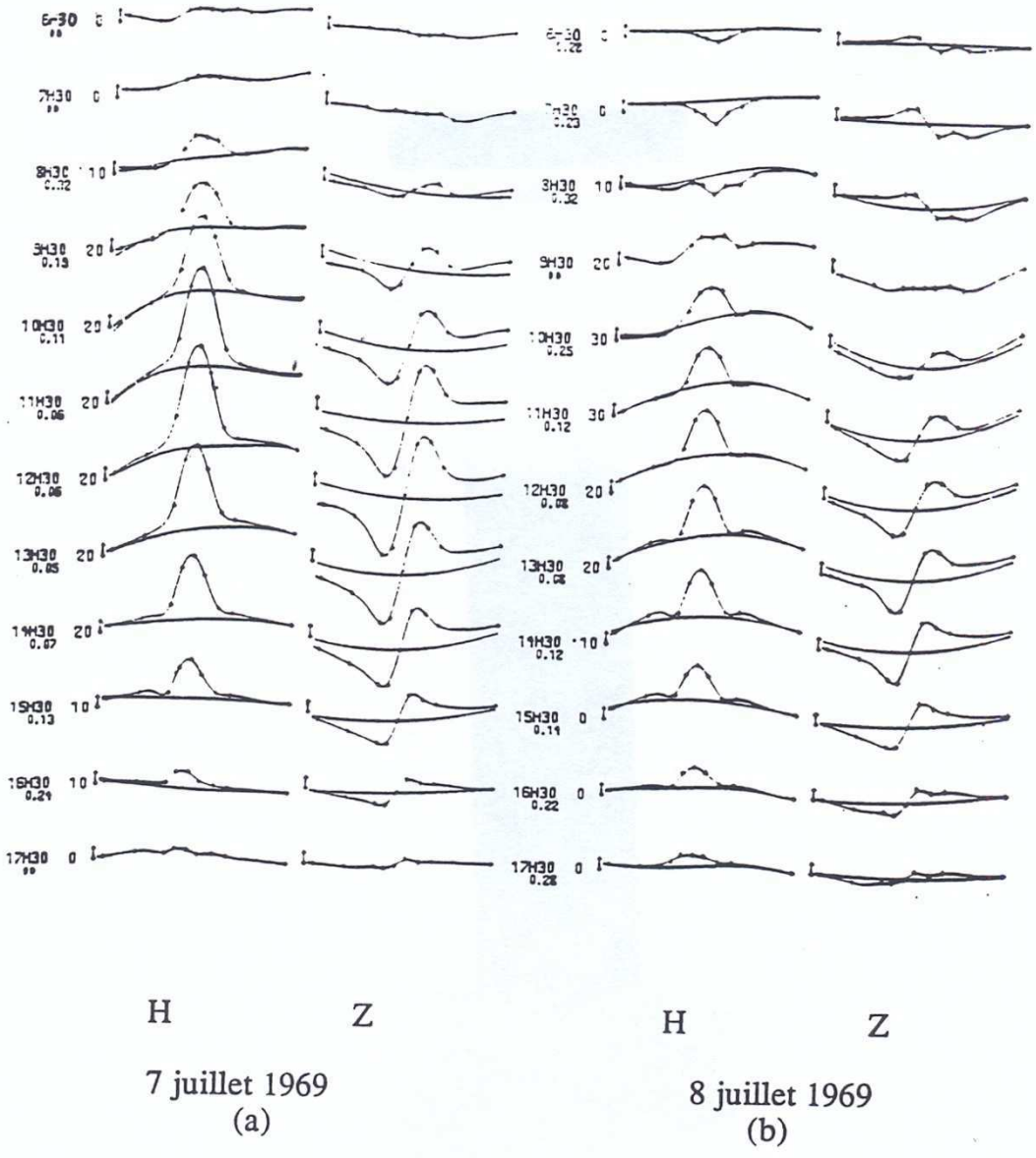


Fig. 7 Exemple de la variabilité jour à jour de la variation des composantes H et Z du champ magnétique terrestre à l'équateur obtenues pour une chaine latitudinale de magnétomètres. Le 8 juillet (b), on observe un contre-électrojet le matin. [*Fambitakoye and Mayaud, J. Atmos. Terr. Phys., 38, 123*, 1975]

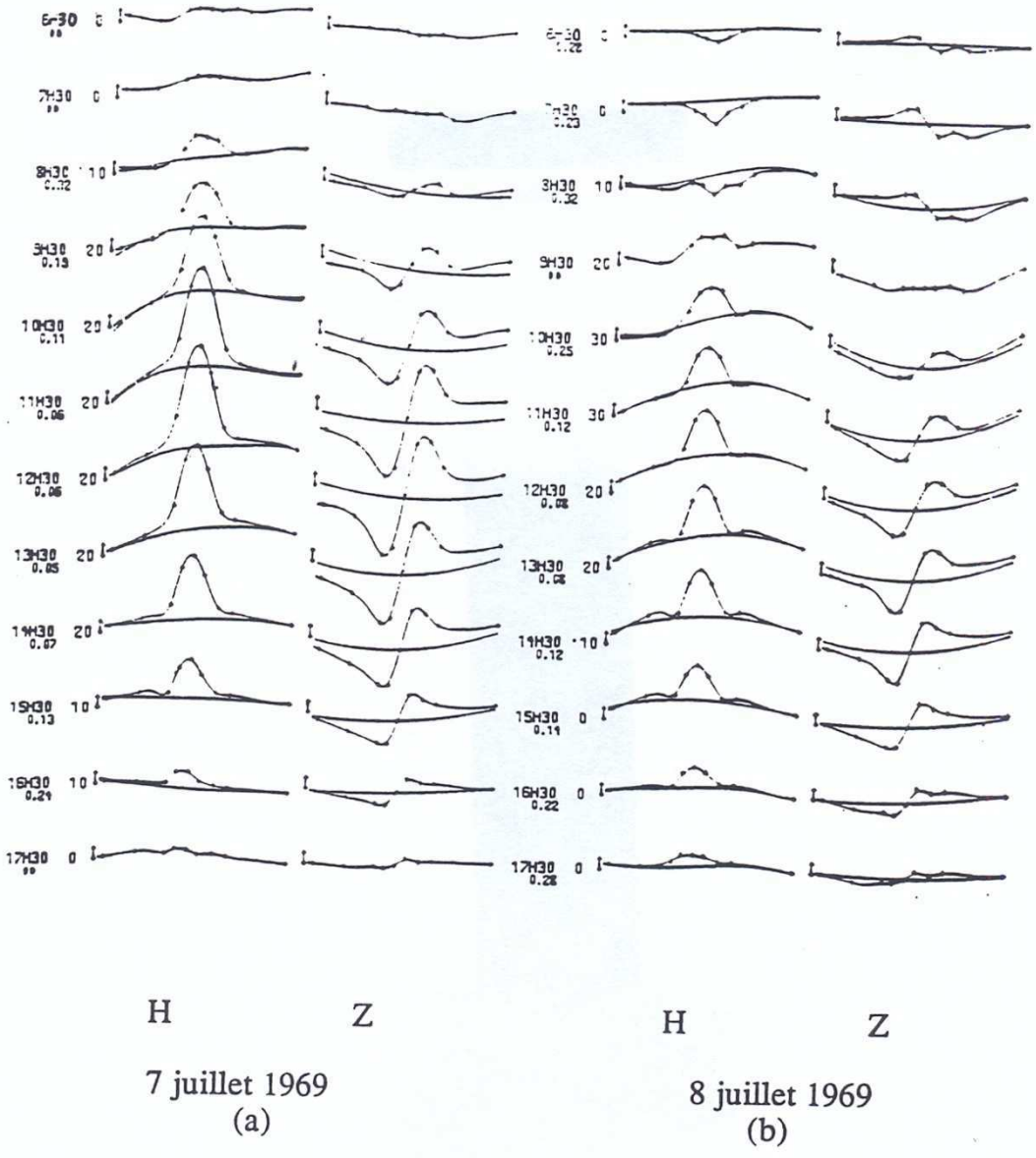


Fig. 7 Exemple de la variabilité jour à jour de la variation des composantes H et Z du champ magnétique terrestre à l'équateur obtenues pour une chaine latitudinale de magnétomètres. Le 8 juillet (b), on observe un contre-électrojet le matin. [*Fambitakoye and Mayaud, J. Atmos. Terr. Phys., 38, 123*, 1975]

l'intensité de la variation diurne était deux à deux fois et demi plus forte qu'aux autres latitudes .

Ce phénomène observé tout le long de l'équateur géomagnétique a été interprété comme résultant de la circulation d'un courant ionosphérique intense: l'électrojet équatorial.

Rappelons que le Sq (voir Figure 1), correspond, pour un observatoire donné, à une variation magnétique moyennée sur les cinq jours les plus calmes d'un même mois: il correspond à une "moyenne de SR"

La variation diurne magnétique au sol de la composante H du champ magnétique à l'équateur (effet de l'électrojet) est représentée sur la figure 7a.

L'amplification du SR à l'équateur est expliquée par une forte anisotropie des conductivités ionosphériques associée à la configuration du champ magnétique terrestre, qui est horizontal à l'équateur géomagnétique. Le développement d'un champ électrique de polarisation intense est rendu possible sous l'influence d'un champ électrique appliqué parallèlement à l'équateur magnétique.

Il existe aussi des renversements de la circulation des courants à l'équateur. Ces évènements sont appelés contre-électrojets. La figure 7b extraite des travaux de Fambitakoye et Mayaud montre qu'il n'est pas rare d'observer le matin un renversement des courants. D'autres contre-électrojets d'intensité plus forte sont aussi observés l'après midi, mais ces derniers cas sont moins fréquents. Le pourcentage d'occurrence de ces événements varie avec le temps local, (voir tableau 1 extrait des travaux de *Fambitakoye* [1976]).

Peu de travaux ont été faits sur cette dynamo par la communauté géophysique externe pendant la période considérée. Il est cependant important de rappeler le point où cette communauté était arrivée, après les études faites de 1975 à 1985.

Les simulations de la dynamo ionosphérique effectuées entre 1979 et 1982 par Hanuise et ses collaborateurs ont montré que l'on pouvait aisément reproduire l'électrojet avec un modèle dynamo simple intégrant la loi d'Ohm ionosphérique sur une couche mince, avec comme conditions aux limites un potentiel nul à la latitude de 70°, et comme condition aux basses latitudes la fermeture des courants pour chaque hémisphère dans une bande de latitude de 10° à l'équateur magnétique.

La source de vents neutres utilisée incluait différents modes de marées atmosphériques déduits des observations de Saint-Santin. Le contre-électrojet était reproduit en utilisant le même modèle dynamo avec une source "vents neutres" différente, incluant des modes de marées semi diurnes renforcés.

Le renforcement de certains modes de marées atmosphériques est une hypothèse acceptable compte tenu du fait que la variabilité jour à jour des marées est connue. Cependant, nous ne disposions pas pour les cas de contre-électrojets étudiés de mesures de vents neutres simultanées.

La figures 8a présente un cas d'électrojet reproduit avec les modes de marées S(2,2) et S(1,2) et la figure 8b un contre-électrojet d'après-midi reproduit avec les modes S(2,2) et S(2,4).

Toutes ces simulations utilisant une source "vents neutres" parfaitement symétrique par rapport à l'équateur géomagnétique (axe du dipôle magnétique confondu avec l'axe géographique) n'ont pas pris en compte les courants circulant le long des lignes du champ magnétique terrestre entre les hémisphères, révélés par les mesures du sondeur à diffusion incohérente de Saint-Santin, ainsi que celles des variations du champ magnétique faites par Van Sabben et Mayaud dans le secteur de longitude Europe-Afrique. Ces observations ont montré qu'il y avait une asymétrie des courants, ces derniers circulent vers le nord la majeure partie de la journée. Ceci est contraire au schéma simple de la figure 1.

Il faut donc abandonner le schéma simple des courants électriques ionosphériques horizontaux déduits des données magnétiques (figure 1) ou calculés par un modèle simplifié de dynamo.

Récemment les observations magnétiques faites à bord du satellite MAGSAT par Maeda et ses collaborateurs ont montré l'existence de structure de courants circulant dans un plan vertical à l'équateur magnétique "côté soir" et "côté matin" du terminateur. L'étude de ces courants sera présentée dans la suite du texte. La question qui se pose alors, est :

Comment cette structure de courants circulant dans un plan vertical se connecte -t-elle à la structure de courants ionosphériques horizontaux au travers de l'électrojet équatorial?

Il faut repenser la fermeture des courants ionosphériques à l'échelle planétaire et imaginer un système tridimensionnel intégrant les différentes structures de courants analysées et comprises séparément (courants horizontaux planétaires, courants verticaux à l'équateur, électrojet équatorial)

Dynamo vent solaire/magnétosphère: connection avec l'électrojet équatorial

C'est sur ce thème que la communauté scientifique française a développé des études concernant l'électrodynamique à

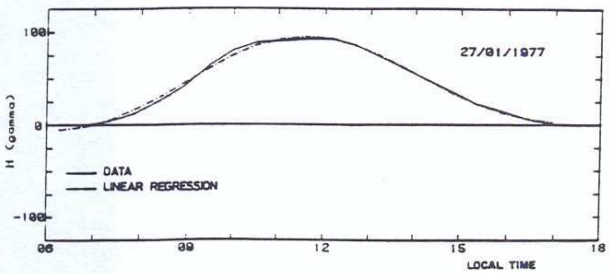


Fig. 8a Electrojet reproduit par le modèle dynamo avec les modes S(1,2) et S(2,2) [*Hanuise et al., J. Geophys. Res., 88, 253*, 1983]

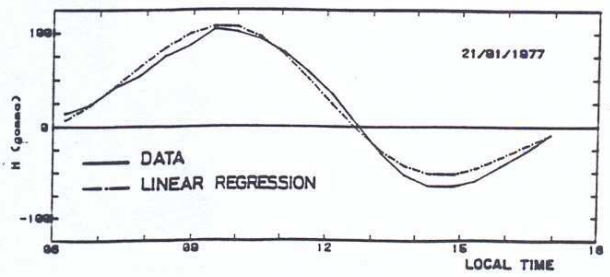


Fig. 8b Contre-électrojet reproduit par le modèle dynamo avec les modes S(2,2) et S(2,4) [*Hanuise et al., J. Geophys. Res., 88, 253*, 1983]

temps:	6h30	7h30	8h30	9h30	10h30	11h30	12h30	13h30	14h30	15h30	16h30	17h30
(%):	95.6	62	13	1.2	0	1.1	1.2	6.9	12.8	15.4	5.2	0

Tableau 1

grande échelle, tout faisant porter la plus grande part de ses efforts sur les études électrodynamiques en zone aurorale, afin de mieux comprendre la source des perturbations observées aux moyennes latitudes durant les périodes d'activité magnétiques de 1966 à 1987.

Dans ce document, nous ne nous intéresserons qu'aux résultats concernant l' échelle planétaire, en indiquant les relations avec les phénomènes se déroulant en zone aurorale.

La zone aurorale est le siège de phénomènes particuliers: c'est une région où des particules du vent solaire précipitent dans l'ionosphère (phénomène des aurores), où de forts courants alignés convergent, et où s'exerce l'influence quasi permanente du champ électrique de convection produit par la dynamo vent solaire/magnétosphère.

Tous ces phénomènes affectent directement les paramètres électrodynamiques, champ, courant et conductivités électriques, ainsi que les paramètres de l'atmosphère. Les figures 5, 6b et 6c, décrivent, de façon simplifiée, les paramètres et les processus qui se développent à l'échelle planétaire.

La pénétration du champ électrique de la convection magnétosphérique

Comme nous l'avons décrit dans le chapitre précédent, la dynamo vent solaire/magnétosphère produit la circulation de courants électriques dans l'ionosphère aux hautes latitudes (Figure 4).

Durant les périodes d'activité magnétique, ces courants ne restent pas confinés sur la calotte polaire, mais s'étendent vers l'équateur. Dès 1966, Nishida, Iwasaki et Nagata ont proposé pour expliquer ce phénomène, la transmission d'un champ électrique et établi à partir des données magnétiques la carte de courants équivalents à cette perturbation magnétique (similaire à celle du SqP mais s'étendant du pôle à l'équateur).

Ce système de courant a été appelé DP2. Le DP2 est l'image magnétique du processus de pénétration de la convection magnétosphérique. C'est en 1970 que Vasyliunas proposa la théorie de la convection magnétosphérique pour expliquer ces observations et en 1972 que les observations, faites par Evans, avec le radar de Millstone Hill, permirent de vérifier l'hypothèse d'extension du champ électrique dû à la convection magnétosphérique des hautes vers les basses latitudes avec des mesures in situ.

Les études faites à l'aide de radars ont montré que durant les périodes d'activité magnétique on observait en zone aurorale un champ électrique intense, dirigé vers le nord côté soir et vers le sud côté matin. Ce champ électrique est déduit du mouvement de convection du plasma ionosphérique produit par la source vent solaire ($\vec{Vi} = \vec{Ec} \times \vec{B}/B^2$, avec $\vec{Ec}$: champ de convection, $\vec{Vi}$: vitesse des ions mesurée).

En zone aurorale, ce champ a une amplitude variant de 10 à 100 $mV.m^{-1}$ et aux moyennes latitudes on peut observer simultanément une perturbation de l'ordre de 1 à 5 $mV.m^{-1}$.

Il faut rappeler que Akasofu et Chapman, en 1961, ont défini la perturbation du champ magnétique D due aux sources externes comme la somme de plusieurs termes :

$$D = DR + DP + DCF + DT \qquad (5)$$

DR correspond à la perturbation magnétique associée à la circulation du courant annulaire, DP, à celle associée aux courants électriques ionosphériques; DCF correspond aux courants de la magnétopause (CF pour Chapman Ferraro), et DT aux courants circulant dans la queue de la magnétosphère.

Le système de courant DP2 ne représente qu'un type de perturbation des courants électriques ionosphériques, celui dû à la pénétration de la convection magnétosphérique.

Avant 1987, l'étude des champs électriques faite par Blanc, en 1980 a permis de caractériser expérimentalement les perturbations de champ électrique observées à Saint-Santin, et de les relier aux variations temporelles du courant annulaire, du champ magnétique interplanétaire, et des indices magnétiques auroraux. Ces travaux ont conduit à la réalisation par Senior et Blanc, en 1984, d'un modèle simple de convection magnétosphérique.

De 1987 à 1990, les études entreprises par la communauté scientifique française sur le processus de la pénétration du champ électrique dû à la convection magnétosphérique des hautes vers les basses latitudes [*Mazaudier at al.*, 1987; *Senior et Blanc*, 1987], ont été faites en alliant les résulats expérimentaux et la modélisation, sur la base de données principalement obtenues dans le secteur de longitude européen.

Le modèle de convection de Senior et Blanc, basé sur le schéma théorique de Vasyliunas, permet de calculer la distribution des courants ionosphériques circulant dans l'ionosphère à partir de la distribution des courants alignés connectant le courant annulaire équatorial à l'ionosphère aurorale.

Ce modèle permet de reproduire les champs électriques observés à Saint-Santin durant les périodes pendant lesquelles le processus de pénétration de la convection magnétosphérique est dominant. C'est à dire lorsque le champ magnétique interplanétaire varie et lorsque l'atmosphère neutre n'est pas perturbée à l'échelle planétaire. Ces périodes correspondent soit à des perturbation faibles, soit aux premières heures d'une forte perturbation. Pour de telles périodes, le champ électrique observé aux moyennes latitudes suit les variations du champ magnétique interplanétaire. Au contraire lorsque l'atmosphère neutre est très perturbée, le mécanisme de la "dynamo ionosphérique perturbée", proposé par Blanc et Richmond en 1980, doit être pris en compte pour expliquer les courants et champs électriques observés aux moyennes et basses latitudes [*Mazaudier et al.*, 1987].

Sur la figure 6b, nous avons représenté la signature de cette perturbation de courant observée à Saint-Santin dans la majorité des cas. Des courants circulant vers l'est ($J = 50\ A.km^{-1}$, $\Delta B = 50$ nT), correspondant à la pénétration d'un champ électrique dirigé vers le Nord (quelques mV.m-1), se superposent aux courants réguliers: c'est une extension de l'électrojet auroral vers les moyennes et basses latitudes.

Comment ce système de courant s'inscrit-il dans le schéma général et comment se ferme-t-il à l'équateur ?

Les études faites dans le secteur européen ont été généralisées et développées à l'échelle planétaire [*Richmond et al.*, 1988; *Richmond et al.*, 1990; *Fejer et al.*, 1990, *Emery et al.*, 1990], grâce à la base de données internationale du NCAR (National Center for Atmospheric Research) à laquelle l'équipe française a participé [*Mazaudier et al.*, 1989].

La dynamo ionosphérique perturbée

L'étude de la dynamo ionosphérique perturbée correspond au thème scientifique sur lequel la communauté française a fait preuve d'originalité et de continuité (1969 à 1990). Les

deux premières simulations numériques de ce processus ont été faites par Blanc et Richmond en 1980 et *Mazaudier et ses collaborateurs* [1987], en couplant le modèle de circulation thermosphérique de Richmond à un modèle dynamo.

Les figures 5 et 6c permettent d'expliquer ce processus. Durant les orages magnétiques, énergie et impulsion sont transmis à la zone aurorale. De forts courants électriques circulent dans l'ovale auroral: les électrojets auroraux (l'un circule vers l'est côté après-midi, et l'autre circule vers l'ouest côté matin, voir figure 6b). Ces courants ont une action thermodynamique (J.E), et dynamique $(\vec{J} \times \vec{B})$ sur l'atmosphère.

La communauté française s'est intéressée à caractériser à l'échelle planétaire la première de ces actions: le chauffage Joule de l'atmosphère par les électrojets auroraux. Ce processus donne naissance à une circulation des vents thermosphériques des hautes vers les basses latitudes (cellule de Hadley entre le pôle et l'équateur, figure 6). Notons que cette circulation est opposée à la circulation régulière dirigée de l'équateur vers le pôle, "côté jour" (Figure 6a). Nous verrons dans la suite de l'exposé que ceci provoque une circulation des courants électriques dans l'ionosphère opposée à la circulation régulière.

Les observations de Saint-Santin ont permis de détecter la signature ionosphérique de cette source de chauffage [*Mazaudier*, 1987b; *Duboin et Lafeuille*, 1988]. En effet lorsque la "source convection magnétosphérique" est arrêtée, la perturbation atmosphérique (Figure 5c) provoquée se poursuit les jours suivants en raison de la constante de temps très longue des variations de la circulation zonale thermosphérique. Il est alors possible de l'étudier. Des comparaisons de mesures de vents thermosphériques obtenues dans les secteurs de longitudes européen et américain ont montré que cette cellule est planétaire [*Salah et al.*, 1987]. L 'analyse des variations du champ magnétique à l'équateur a permis d'identifier la signature de ce processus au niveau de l'électrojet équatorial dans des cas pour lesquels on avait simultanément des mesures de vents neutres in situ et des mesures magnétiques [*Mazaudier and Venkateswaran*, 1990].

Cette analyse a apporté la preuve expérimentale que la diminution de l'intensité de l'électrojet équatorial observée les jours suivant un orage est bien une signature du mécanisme de la dynamo ionosphérique perturbée comme l'avaient proposé Blanc et Richmond en 1980 et Mayaud en 1982.

Rappelons que Mayaud avait observé cette diminution de l'intensité de l'électrojet équatorial après les forts orages mais, n'ayant pas de mesures simultanées dans l'ionosphère, il ne lui avait pas été possible de relier cette observation à une perturbation ionosphérique.

Récemment, l'analyse faite par *Fambitakoye* [1990], a permis de décrire à l'échelle planétaire la signature magnétique de ce mécanisme: une cellule de courant circulant (Figure 9) dans le sens des aiguilles d'une montre (sens opposé à la circulation régulière dans l'hémisphère nord) se superpose à la cellule de courant régulière (Figure 5a) et provoque une diminution de

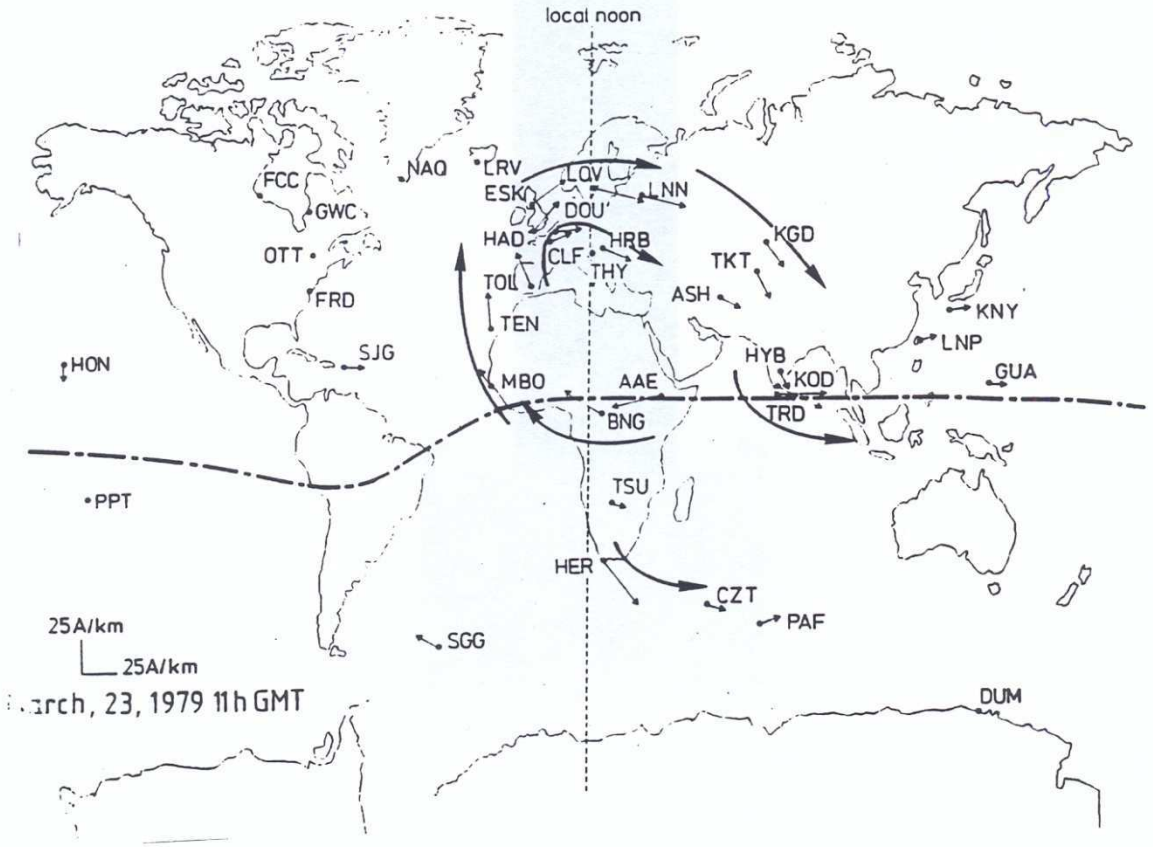


Fig. 9 Cellule de courant anti-Sq créée par la dynamo ionosphérique perturbée [*Fambitakoye et al., J. Geophys. Res., 95, 15209*, 1990]

l'intensité de l'électrojet équatorial. Cette analyse a été faite de la même façon que les analyses ayant conduit à la définition des systèmes de courants Sq, SqP, DP2. Seules les composantes H et D ont été utilisées, en considérant l'ionosphère comme une couche plane infinie au dessus d'une terre plane.

L'Etude de la perturbation magnétique globale a permis de définir expérimentalement la signature à l'échelle planétaire du mécanisme de la dynamo ionosphérique perturbée détectée à Saint-Santin.

Ces différents résultats laissent des questions sans réponse: la figure 9 montre que les systèmes des deux hémisphères ne sont pas indépendants comme le laisse supposer la figure 1. Nous n'avons pas pris ce fait en compte dans les simulations.

Comment se ferment les courants planétaires dans une telle configuration?

Rappelons que Mayaud avait introduit le concept d'invasion d'un hémisphère pour expliquer de telles observations.

- Les travaux de simulation numérique de cas réels de la dynamo ionosphérique perturbée [*Mazaudier et al.*, 1987], ont permis de reproduire les vents observés à Saint-Santin en ajustant la source de chauffage sur l'indice magnétique AE pour un seul cas. Ce cas présentait deux caractéristiques morphologiques correspondant aux limitations de symétrie zonale du modèle et à la dynamique du modèle: toute la zone aurorale était affectée par l'orage de la même façon (équilibre entre les électrojets ouest et est) et le chauffage était quasi-constant durant deux périodes de plusieurs heures.

Dans les autres cas, la simulation reproduit la direction des vents mais pas leurs variations temporelles, et ne donne pas toujours le temps de propagation observé entre la source et le lieu considéré. Tout ceci nous conduit à rechercher une meilleure paramétrisation de la source de chauffage et à développer la modélisation.

Les études des vents thermosphériques ont été poursuivies à l'échelle planétaire à partir de la base de données du NCAR. Elles ont conduit à l'établissement d'un modèle planétaire basé sur des mesures d'interféromètres, de sondeurs à diffusion incohérente et de mesures satellitaires [*Hedin et al.*, 1991]. Ce modèle [*Hedin et al.*, 1991], issu de deux cycles solaires d'observations, intègre les variations en latitude, longitude, temps local, saison et cycle solaire de l'atmosphère neutre. Ce modèle existe sous forme d'un sous-programme qui peut être utilisé dans les simulations numériques pour définir l' état standard de l'atmosphère.

Conclusion

L'étude des courants électriques ionosphériques à grande échelle durant les 18 mois d'expérimentation du projet AIEE (Année Internationale de l'Electrojet Equatorial), introduit dans la suite du texte, permettra d'analyser la variabilité jour à jour du SR à l'équateur. Elle permettra aussi de relier cette variabilité à des processus d'origine dynamo vent solaire/magnétosphère comme ceux que nous venons de présenter ou encore à des processus liés à l'aéronomie équatoriale.

LA CONTRIBUTION DE LA COMMUNAUTE GEOPHYSIQUE INTERNE 1987-1991

Le contexte international

La communauté des géophysiciens impliqués dans l'étude du champ magnétique d'origine interne s'est intéressée à l'Electrojet Equatorial (EE) à l'occasion du traitement des données acquises par les satellites de la série POGO. Ces satellites étaient avant tout destinés à étudier le champ principal de la Terre (terme Bp de l'équation 1) en réalisant des mesures précises du module du champ avec une distribution dense et homogène impossible à obtenir avec des mesures de surface. Ces satellites ont permis de mettre en évidence l'existence d'un champ d'anomalies de grandes longueurs d'ondes (terme Ba de l'équation 1) susceptible d'apporter des renseignements nouveaux sur les hétérogénéités latérales de la croûte et de la lithosphère terrestres. Ces satellites étaient placés à des altitudes variant entre 400 et 800 km. A ces altitudes, les sources ionosphériques apparaissent comme "internes", puisque placées sous l'orbite du satellite, et influencent notablement les mesures effectuées à bord, de par leur proximité.

L'étude de l'électrojet équatorial faisait d'ailleurs partie des objectifs scientifiques des missions POGO. En 1973, Cain et Sweeney ont analysé plus de 2000 profils de mesures du champ total réalisées par les satellites à des heures locales variant entre 9h et 15h. Ces profils présentaient la signature d'un courant circulant principalement d'Est en Ouest dans une bande d'une dizaine de degrés de part et d'autre de l'équateur géomagnétique, et qui fut attribué à l'électrojet équatorial. Ces auteurs ont pu étudier en détail différents paramètres de l'électrojet équatorial tels que sa position, sa largeur et son intensité. Ils se sont attachés à décrire les variations en longitude et dans le temps de ces paramètres, montrant en particulier l'existence d'un renforcement de l'intensité aux alentours de 100° Est, qui n'était pas prévu par les modèles de conductivités ionosphériques.

Il est apparu que la présence de ces courants produisait un champ magnétique se superposant au champ d'anomalies et rendant difficile la description de celui-ci dans la région équatoriale. Pourtant, aucun effort particulier n'a été fait pour éliminer la contribution de l'électrojet équatorial, aussi bien lors de l'établissement du modèle de champ principal que des cartes d'anomalies

En 1980, le satellite MAGSAT réalisait pour la première fois 6 mois de mesures précises des composantes du vecteur champ magnétique terrestre à des altitudes variant entre 350 km et 550 km et aux heures locales fixes 6h et 18h. Dans ces conditions, l'effet magnétique créé par l'électrojet équatorial est faible (comme prévu le long des terminateurs), de l'ordre de 10 nT. Il est néanmoins comparable au champ créé par l'aimantation de la lithosphère, négligeable par rapport au champ principal (50 000 nT) mais comparable au champ créé par l'aimantation de la lithosphère. L'étude précise des 3 composantes vectorielles du champ d'anomalies représentait l'objectif nouveau de la mission MAGSAT.

Cette mission devait permettre de caractériser les sources de ces anomalies de grandes longueurs d'ondes (plusieurs milliers de kilomètres).

Pourtant, lors de l'établissement des premières cartes d'anomalies, Langel et ses collaborateurs se sont contentés de moyenner des profils pour éliminer la contribution de l'électrojet équatorial. Sur ces cartes ainsi obtenues, on observe des anomalies étirées longitudinalement d'origine vraisemblablement ionosphérique, et qui rendent douteuse toute tentative d'interprétation globale.

La contribution française

Cohen et Achache [1990] ont ensuite établi deux jeux de cartes des 3 composantes du champ d'anomalies, en soustrayant aux mesures un modèle de champ principal (Ba = B-Bp) et cela séparément à partir des mesures acquises à 18h (dusk) et 6h (dawn). Sur ces cartes, l'effet de l'électrojet à 18h (Figure 10a) est faible mais clairement reconnaissable. Les composantes X (Nord) présentent un signal négatif à toutes les longitudes le long de l'équateur magnétique. La composante Z (verticale) présentent une ligne de zéro le long de l'équateur bordée d'un minimum au Nord et d'un maximum au Sud. Ces effets correspondent clairement à la signature d'un courant circulant d'Ouest en Est sous le satellite, le long de l'équateur magnétique, l'électrojet équatorial. Les cartes correspondant aux mesures faites à 6h (figure 10b) montrent un effet similaire mais inversé et de plus faible amplitude, suggérant l'existence quasi systématique d'un contre-électrojet le matin.

De plus, la carte de la composante Y (Est) présente à 18h un effet qui dépasse 12 nT. Cet effet ne peut être créé par l'électrojet équatorial lui-même. Maeda et ses collaborateurs, en 1982, ont étudié cet effet et ont montré qu'il ne pouvait être créé que par des courants méridiens circulant dans un plan vertical. Cet effet n'est pas visible sur la composante Y mesurée à 6h.

Pour améliorer la définition du champ d'anomalies, *Cohen et Achache* [1990] ont proposé alors une méthode originale de réduction de la contribution de l'électrojet équatorial qui, en corrigeant indépendamment chaque profil de l'influence de celui-ci, prend en compte la variabilité jour à jour de l'intensité des courants. Cette méthode met en évidence la forte variabilité temporelle de l'électrojet équatorial autour d'un régime moyen correspondant à un contre-électrojet à 6h et à un électrojet à 18h, en accord avec les observations faites au sol par Fambitakoye et Mayaud dans les années 1970.

Ces observations n'ont pour l'instant été incluses dans aucune tentative de modélisation de la circulation ionosphérique globale.

La méthode de réduction utilisée permet d'obtenir la meilleure description du champ d'anomalies publiée à ce jour. Sur la carte réduite (Figure 11), l'influence de l'électrojet équatorial a été presque totalement éliminée. Outre les fortes anomalies présentes dans les régions continentales (Amérique du Nord, Afrique Centrale, Himalaya et Tibet, etc ..), cette carte met en évidence des anomalies significatives en domaine océanique. La réduction de l'effet de l'électrojet équatorial fait en particulier apparaître clairement les relations existant entre la distribution d'anomalies et la direction des dorsales dans les quatre bassins océaniques. L'étude de ces relations renseigne sur l'aimantation rémanente portée par la croûte océanique. Elle permet aussi d'obtenir des renseignements sur les variations avec l'âge de l'aimantation de la lithosphère sous les océans, à des longeurs d'ondes impossibles à extraire des mesures faites au niveau de la mer

Cohen [1989] a ensuite étudié l'influence sur la description de l'effet magnétique associé à l'électrojet équatorial, de la technique de séparation champ interne-champ externe couramment utilisée pour le traitement des données satellitaires (troncature d'un développement en harmoniques sphériques des mesures).

Il a montré que l'utilisation de cette technique pouvait conduire à sous-estimer d'un facteur 2 ou 3 l'amplitude de l'effet magnétique créé par l'électrojet équatorial. De plus, la prise en compte de la composante Y introduit, lors du calcul du champ principal sous forme d'un développement en harmoniques sphériques, des anomalies résiduelles significatives en particulier le long de l'équateur magnétique. Ces anomalies expliquent les variations apparentes d'amplitudes des courants de l'électrojet équatorial avec la longitude. Cet artefact est lié au fait que la composante Y n'est pas créée par le même système de courants que X et Z. Les courants à l'origine de l'effet observé sur Y traversent l'orbite du satellite et brisent la condition d'harmonicité nécessaire à l'utilisation du développement en harmoniques sphériques.

La modélisation de tous les courants associés à l'électrojet équatorial est donc nécessaire à l'obtention par mesures satellitaires de cartes d'anomalies précises. L'effet de l'électrojet équatorial reste négligeable par rapport au champ principal même si sa contribution n'est pas nulle, en particulier pour les ordres 5 et 7 du développement en harmoniques sphériques. L'exploitation des futures missions spatiales en Géomagnétisme nécessitera de toute façon de bien prendre en compte les effets ionosphériques et en particulier celui de l'électrojet équatorial. Cela sera d'autant plus nécessaire que ces satellites seront lancés à des altitudes plus basses que MAGSAT.

Influence de l'Electrojet Equatorial sur les courants induits dans la Terre

Les variations transitoires du champ magnétique induisent des courants électriques dans la Terre conductrice. L'étude de ces courants permet d'obtenir des informations sur la distribution de conductivité dans le sous-sol et donc sur la structure de celui-ci. Aux latitudes moyennes, on considère généralement que les variations transitoires ont pour origine les courants magnétosphériques et on approxime les champs électriques et magnétiques d'origine externe à la Terre comme dus à des ondes planes. L'étude des conductivités à partir des mesures des champs électriques et magnétiques à la surface du sol dans cette hypothèse, constitue la méthode magnétotellurique.

Aux latitudes équatoriales, l'influence de l'électrojet équatorial doit être prise en compte . Son effet sur les courants induits doit être étudié en détail si l'on veut obtenir des renseignements sur la conductivité du sous-sol. A partir de mesures magnétiques uniquement, Fambitakoye et Mayaud, en 1976, ont montré qu'au midi local, les effets induits par l'électrojet équatorial étaient négligeables.

Ducruix et ses collaborateurs en 1977 ont ensuite modélisé rigoureusement ses effets. Ils ont démontré que, lorsque l'électrojet équatorial est bien établi (à midi), il ne crée pas de variations de flux magnétique et donc n'induit pas de courants. Au contraire le matin et le soir, des effets induits doivent être observés. A ces heures locales, Ducruix et ses collaborateurs ont montré, à partir de modélisations simples, que les effets induits par les courants de fermeture associés à l'électrojet équatorial sont sans doute prépondérants. En l'absence de connaissances précises sur ces courants, ces études sont restées sans suite.

La résolution du problème de l'induction aux latitudes équatoriales nécessite de reconsidérer ce problème en disposant de mesures des champs électrique et magnétique à toute les heures du jour et de la nuit. C'est l'un des aspects qui motivent une reprise d'études détaillées de l'électrojet équatorial.

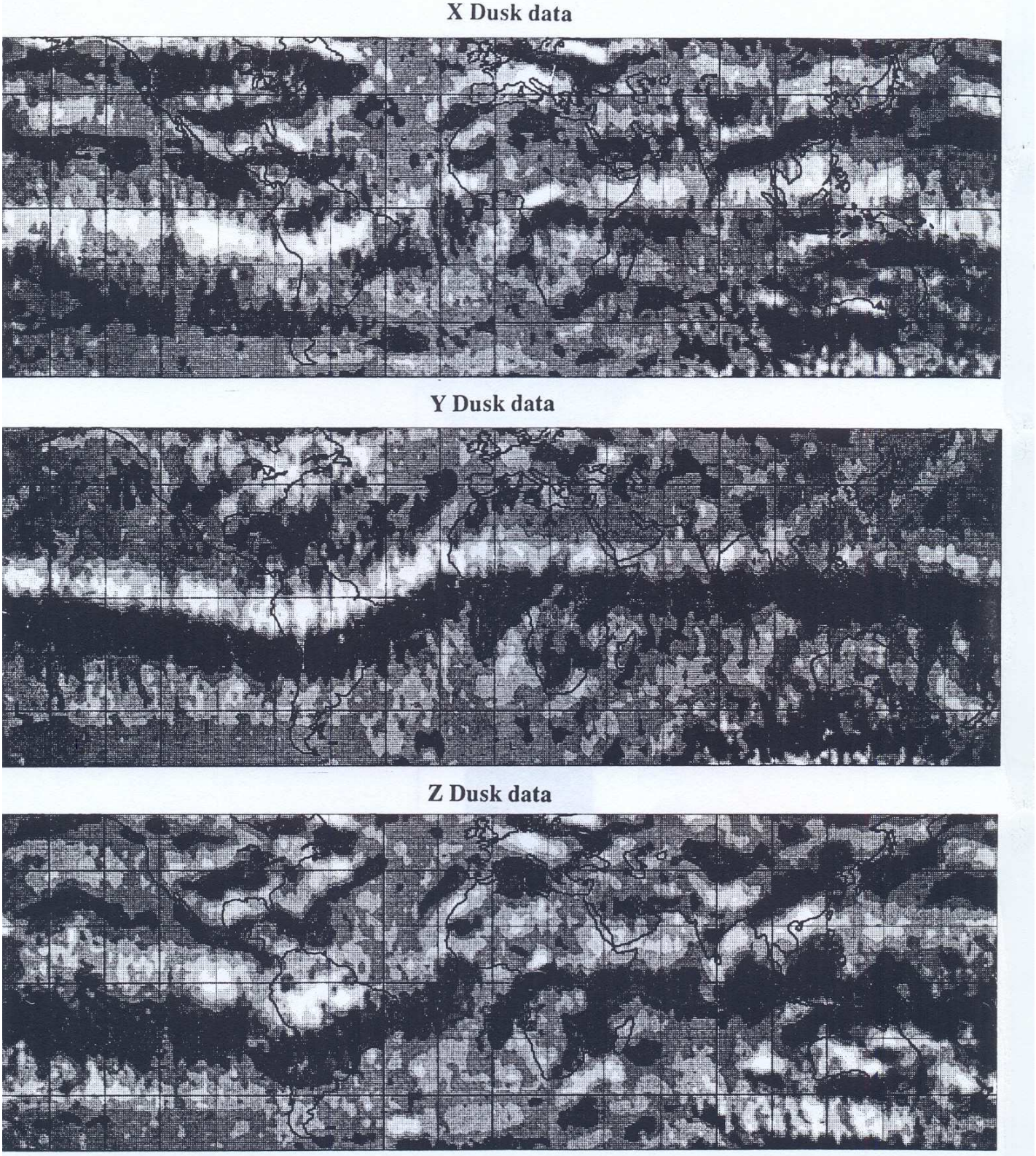


Fig. 10a Carte des 3 composantes (X: Nord, Y: Est, Z: Verticale descendante) du champ magnétique terrestre obtenues uniquement à partir de mesures réalisées à 18h (heure locale) par le satellite MAGSAT. La contribution du champ principal (champ dynamo nucléaire) à été soustraite. Superposée au champ dû à l'aimantation de la lithosphère, on voit apparaitre, sur les composantes X et Z, la signature d'un courant circulant d'Est en Ouesst dans l'ionosphère le long de l'équateur géomagnétique: l'électrojet équatorial, circulant dans un plan méridien passant par le terminateur [d'après *Cohen et Achache*, 1990]

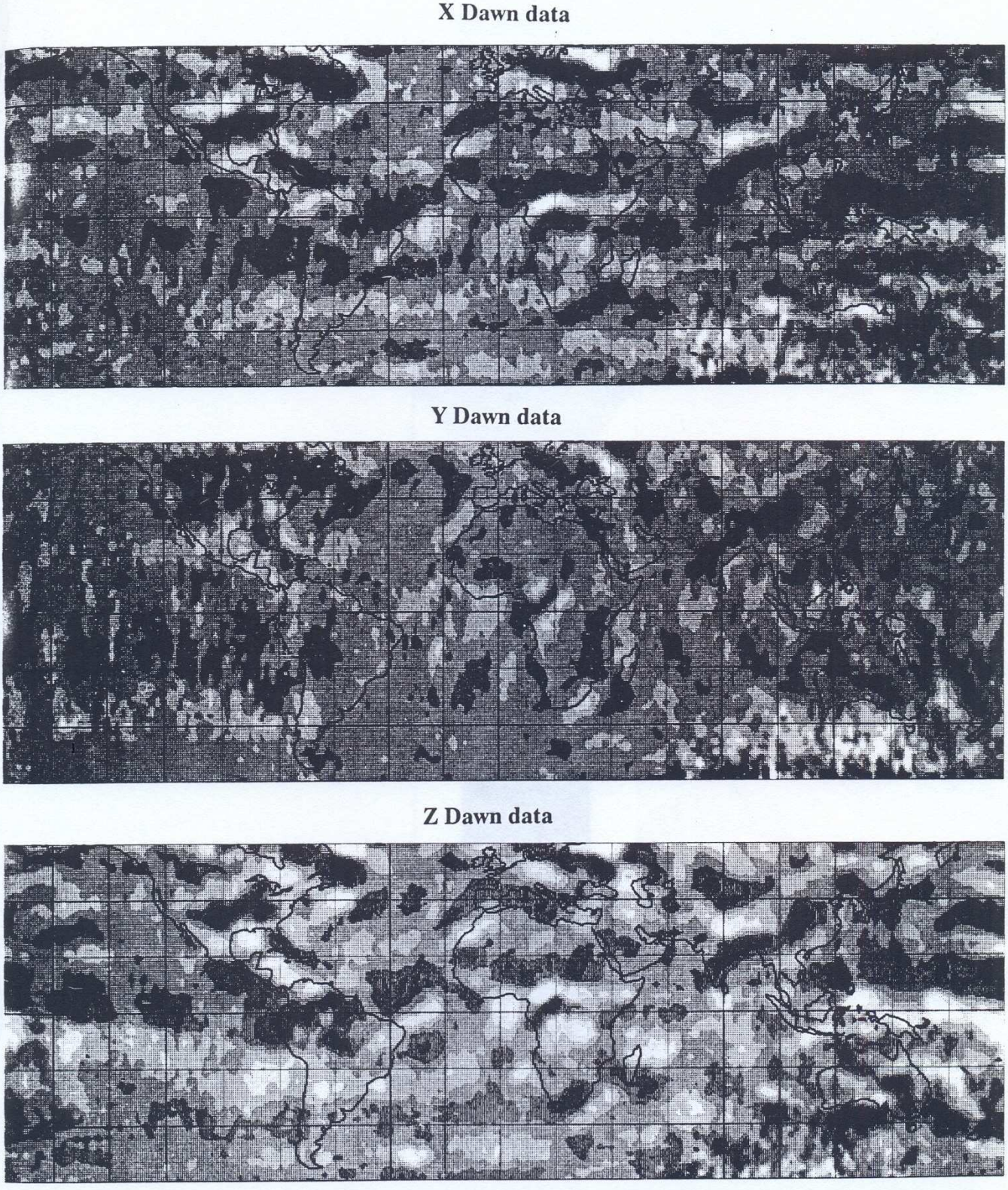


Fig. 10b Similaire à la Figure 10a, mais pour les mesures réalisées uniquement à 6h (heure locale). Sur les composantes X et Z, la signature observée est celle d'un courant circulant en moyenne d'Ouest en Est le long de l'équateur géomagnétique, le contre-électrojet. Son amplitude est plus faible que sur la figure précédente. Aucune signature n'est observable sur la composante Y [d'après *Cohen et Achache*, 1990]

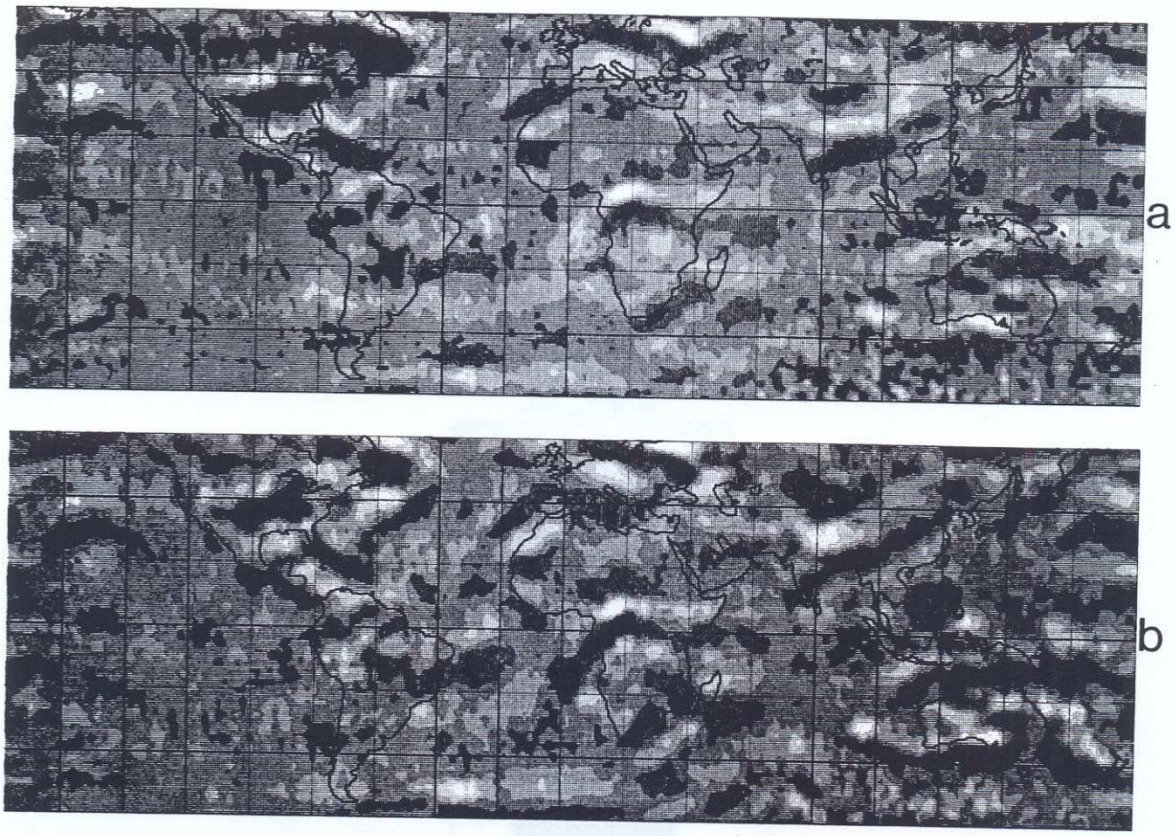


Fig. 11 Carte des composantes X(a) et Z(b) du champ magnétique terrestre obtenues à partir des cartes des figures 10a et 10b (même échelle que la Figure 10). Les contributions respectives de l'électrojet équatorial et du conte-électrojet ont été soustraites. Le champ résiduel est dû aux variations latérales d'alimentation dans lithosphère terrestre, jusqu'à des profondeurs de quelques dizaines de kilomètres. Ces signaux observés sont représentatifs des variations des propriétés thermiques et minéralogiques de la lithosphère terrestre [d'après *Cohen et Achache*, 1990]

L'ANNEE INTERNATIONALE DE L'ELECTROJET EQUATORIAL OBJECTIFS DES DEUX COMMUNAUTES

Le projet d'Année Internationale de l'Electrojet Equatorial (AIEE), septembre 1991 à mars 1993

Durant l'Assemblée Générale du IAGA (International Association for Geomagnetism and Aeronomy) à Vancouver, en 1987, la commission IDCDC (Interdivisional Commission on Developing Countries) a proposé à la communauté internationale d'intensifier l'étude de l'électrojet équatorial et de planifier une période de mesures intensives en zone équatoriale.

Il s'agit en effet d'une étude quelque peu délaissée depuis les grandes campagnes de l'Année Internationale du Soleil Calme (IQSY, 1964-1966). Les connaissances acquises depuis lors sur la structure globale et les mécanismes agissant à grande échelle dans la magnétosphère, l' ionosphère et l'atmosphère permettent d'aborder l'étude le l'électrojet dans un cadre neuf. L'avènement de techniques nouvelles permettant de combiner les mesures aéronomiques (à partir du sol et de l'espace) aux observations ionosphériques et magnétiques, constitue également un atout important dans la réussite de ce projet. Enfin, ce programme est l'occasion d'engager une vaste coopération scientifique entre pays avancés et pays en développement, dont un grand nombre sont situés à proximité de l'électrojet équatorial.

Les communautés françaises de géophysique interne et externe ont défini, dans le contexte de ce programme international, un projet basé sur les études les intéressant .

Objectifs de la communauté scientifique française

Etude globale. Les études ont montré qu'il y avait à l'équateur magnétique rencontre de différents systèmes de courants électriques.

Durant les périodes de calme magnétique, deux systèmes principaux associés à la dynamo ionosphérique régulière ont été observés: courants horizontaux circulant sur la face éclairé de la terre; courants verticaux circulant le long du terminateur découverts récemment par MAGSAT

Comment ces deux systèmes de courants se connectent-ils ?

Durant les périodes d'activité magnétique, deux autres systèmes de courants se superposent aux précédents : courants dus à la pénétration du champ électrique de la convection magnétosphérique; courants créés par la dynamo ionosphérique perturbée (cellule de Hadley pôle-équateur)

Comment s'organise alors, la fermeture du circuit global de courants à l'équateur ?

Pour répondre à ces questions, nous étudierons la variabilité

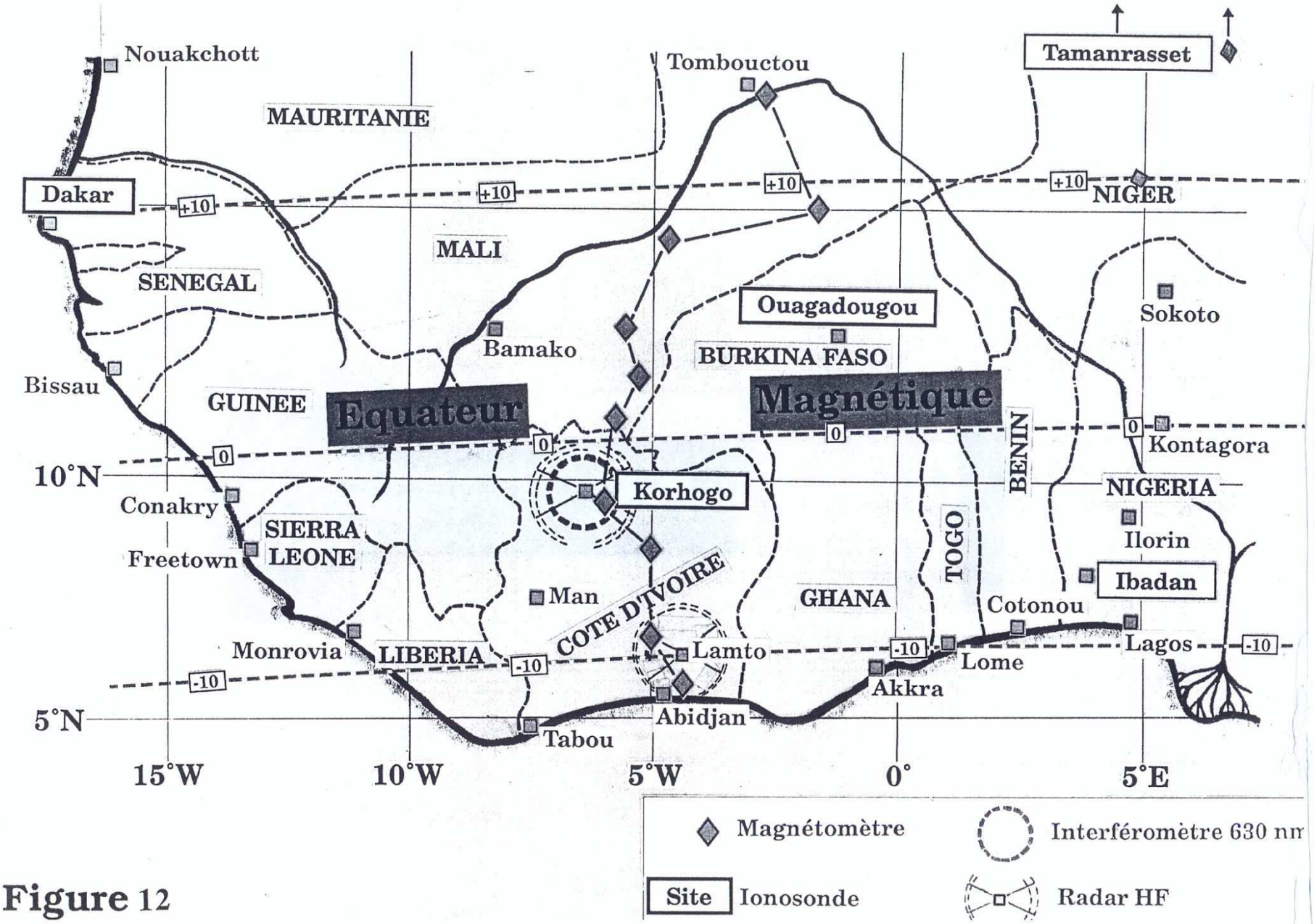

Nouakchott
Tombouctou
Tamanrasset
MAURITANIE
Dakar
+10
NIGER
MALI
SENEGAL
Ouagadougou
Sokoto
Bamako
BURKINA FASO
Bissau
GUINEE
Equateur
Magnétique
0
Kontagora
10°N
Korhogo
BENIN
NIGERIA
Conakry
SIERRA LEONE
TOGO
Ilorin
Freetown
Man
COTE D'IVOIRE
GHANA
Ibadan
Cotonou
Monrovia
LIBERIA
-10
Lamto
Lagos
Lome
Akkra
5°N
Abidjan
Tabou
15°W
10°W
5°W
0°
5°E
Magnétomètre
Interféromètre 630 nm
Site
Ionosonde
Radar HF

Figure 12

jour à jour de l'électrojet équatorial en relation avec l' aéronomie équatoriale (source régulière), et en prenant en compte le contexte magnéto- sphérique (source irrégulière) et le contexte solaire.

Etude régionale.

- Sondages magnétotelluriques. Tout champ magnétique transitoire induit des courants dans le sous-sol. Tous les courants circulant dans l'ionosphère et la magnétosphère créent un champ magnétique.

De nuit, l'activité ionosphérique est quasiment nulle. Les courants induits sont dus à l'activité magnétosphérique et l'étude de ces derniers permet d'obtenir des renseignements sur la distribution des conductivités et donc la structure de la croûte continentale.

Durant les jours magnétiquement calmes, les courants liés à l'activité magnétosphérique sont très faibles. Comme il n'y a pas d'induction due à l'électrojet équatorial à midi, les courants induits sont dûs aux courants centrés le long du terminateur le matin et le soir. On pourra donc étudier ceux-ci en mesurant les courants telluriques.

- Sondage ionosphérique. Des études de la propagation des ondes radioélectriques permettront d'obtenir une cartographie des caractéristiques ionosphériques et la validation de modèles verticaux de la densité électronique au dessus des zones intertropicales, et ainsi d'améliorer les connaissances nécessaires au développement des télécommunications régionales.

Etude locale. L'utilisation de radars performants va permettre de progresser dans les études de microphysique du plasma équatorial concernant les instabilités.

Dispositif expérimental mis en place en zone équatoriale

Durant les 18 mois d'expérience, le dispositif expérimental décrit par la figure 12, sera opérationnel. Il est composé d'un réseau de 6 ionosondes, d'un réseau de 10 magnétomètres, de deux radars HF et d'un interféromètre; un tel dispositif permettra d'estimer ou de mesurer certains paramètres électrodynamiques à l'équateur, entre autre: les densités électroniques (ionosondes), dont on pourra dériver les conductivités ionosphériques; la vitesse de dérive des irrégularités du plasma ionosphérique (radars HF), donnant accès au champ électrique; la dynamique des vents neutres (interféromètre); les courants ionosphériques horizontaux (magnétomètres, composantes H et D); les gradients latitudinaux des courants ionosphériques et donc les courants alignés le long du champ magnétique terrestre (magnétomètres, composante H, D et Z); les courants centrés sur le terminateur matin et soir, (potentiels telluriques).

Nous aurons à intégrer le jeu de données équatoriales obtenues durant les dix-huit mois de campagne dans l'ensemble des données obtenues avec les réseaux mondiaux de radars (HF ou incohérent), d'ionosondes et de magnétomètres.

Ce projet doit permettre l'amélioration de notre connaissance du champ magnétique terrestre en privilégiant l'approche globale basée sur l'utilisation de données recueillies sur l'ensemble du globe (réseaux existants de mesures au sol et données satellitaires). Nous avons pour objectif d'établir l'état des connaissances sur les variations du champ magnétique en fonction des sources externes et internes.

CONCLUSION

Ce projet Europe Afrique s'inscrit dans un contexte international et mobilisera les compétences de différentes communautés: communauté "atmosphère"; communauté "géophysique interne"; communauté "géophysique externe"

Ce projet sera mené en coordination avec d'autres projets intéressant les communautés citées, par exemple:

- UARS (Upper Atmospheric Research Satellite), qui permettra d'étudier les variations des paramètres atmosphériques dans les différentes couches de l'atmosphère, nous pourrons ainsi étudier à l'échelle planétaire les relations atmosphère / électrojet équatorial au travers de différents processus dynamos: la dynamo ionosphérique régulière (les marées atmosphériques, et perturbations météorologiques), la dynamo ionosphérique perturbée (cellule de Hadley pôle équateur) ;

- LTCS (Lower Thermospheric Coupling Study), concernant la communauté de géophysique externe, est basé sur des campagnes de mesures coordonnées des sondeurs à diffusion incohérente. Des mesures des paramètres électrodynamiques (champ électriques, courants électriques, vents neutres etc..) seront faites pour les basses, moyennes et hautes latitudes. Nous pourrons en outre estimer l'apport global d'énergie en zone aurorale durant les orages magnétiques et ainsi définir une paramétrisation de ce terme, utile pour la modélisation des variations de l'électrojet équatorial durant les orages magnétiques .

Remerciements. Les auteurs remercient R. Gendrin et M. Blanc pour leurs critiques constructives.

LISTE DE LABORATOIRE IMPLIQUES DANS LE PROJET AIEE SECTEUR DE LONGITUDE "AFRIQUE DE L'OUEST/EUROPE" CETTE LISTE N'EST PAS DEFINITIVE

AFRIQUE

Algérie. Haut Commissariat à la Recherche; CRAAG (Centre de Recherche en Astronomie Astrophysique et Géophysique), B.P. 63 Bouzareah, Alger.

Sénégal. Université Cheikh Anta Diop; ITNA (Institut de Technologie Nucléaire Appliquée) département de physique, Dakar-Fann, Sénégal; ORSTOM (Institut français de Recherche Scientifique pour le développement en Coopération) Centre de Dakar, B.P. 1386, Dakar, Sénégal; STATION CNET, Dakar-Cambérène, Sénégal.

Côte d'Ivoire. Faculté des Sciences d'Abidjan; Département de Physique, B.P. 582, Abidjan 22, Côte d'Ivoire

Nigeria. Université d'Ilorin; Faculty of Science, Department of physics, Ilorin, Nigeria.

Burkina Faso. Station CNET, Ouagadougou, Burkina Fasso.

Mali. ORSTOM, Centre de Bamako, B.P. 2528, Mali.

EUROPE

France. IPGP (Institut de Physique du Globe de Paris) 4 Place Jussieu, Tour 24-25, 2ème étage, 75252 Paris cédex 05, France; ORSTOM (Institut français de Recherche Scientifique pour le développement en Coopération) Centre de Bondy, 70-74, route d'Aulnay, 93143 Bondy, France; CEA (Commissariat à l'Energie Atomique) Centre de Bruyères le Chatel, B.P. 12, 91680 Bruyères-le-Chatel, France; CNET (Centre National d'Etude des Télécommunications); LAB/MER/SPI, Route de Trégastel-B.P. 40, 22301 Lannion, France; CRPE (Centre de Recherche en Physique de l'Environnement), 38-40, rue du Général Leclerc, 92131 Issy-les-Moulineaux, France; Université Paris Sud; LETTI (Laboratoire d'Etude des Transmissions Ionosphériques), Université Paris Sud, Bât. 214, 91405, ORSAY cédex, France; Laboratoire de géophysique, Bât 304, Université Paris Sud, 91405, ORSAY cédex, France.

Espagne. Observatorio del Ebre, 43520 Roquetes, Tarragona, Espagne.

Allemagne. Institut für Geophysik der Universität Göttingen, Herzberger Landstrabe 180, Postfach 2341, D-3400 Göttingen

Royaume Uni. UCL (University College London); Atmospheric Physics laboratory, 67-73, Riding House Street, London WIP 7PP, UK.

AMERIQUES

U.S.A. NCAR (National Center for Atmospheric Research); HAO, P.O. Box 3000 Boulder, Colorado, 80307 USA.

REFERENCES

Caudal, G., Sur la façon dont le plasma piégé à l'intérieur des magnétosphères planétaires déforme le champ électrique et le champ magnétique qui y régnent, *Thèse de Doctorat d'Etat, Paris 6, juin* 1987.

Caudal, G., M. Blanc, Magnetospheric convection during quiet or moderately disturbed times, *Rev. Geophys., 26*, 809-822, 1988.

Cohen, Y., Traitements et interprétations de données spatiales en Géomagnétisme: Etude des variations latérales d'aimantation de la lithosphère terrestre, *Thèse d'Etat, Univ. Paris 7, juin* 1989.

Cohen, Y., J. Achache, New global vector anomaly maps derived from Magsat data, *J. Geophys. Res., 95*, 10783-10800, 1990.

Duboin, M.L. and M. Lafeuille, E. F-region measurements at Saint-Santin during the September 1987 LTCS Campaign, *Adv. Space Res., 10*, 179-182, 1990.

Emery, B. A., A. D. Richmond, H. W. Kroehl, C .D. Wells, J.M. Ruohoniemi, M. Lester, D. J. Knipp, F. J. Rich, J. C. Foster, O. De La Beaujardière, C. Senior, L. M. Shier, J. F. McKee, and S. Maeda, Electric potential patterns deduced from the SUNDIAL period of September 23-26, 1986, *Ann. Geophysicae, 8*, 399-408, 1990.

Fejer, B. G., M. C. Kelley, C. Senior, O. De La Beaujardière, J. A. Holt, C. A. Tepley, R. Burnside, M. A. Abdu, J. H. A. Sobral, R. F. Woodman, Y. Kamide and R. Lepping, Low and Mid-latitude Ionospheric Electric Fields During the January 1984 GISMOS Campaign, *J. Geophys. Res., 95*, 2367-2377, 1990.

Fambitakoye, O., M. Menvielle, C. Mazaudier, Global disturbance of the transient magnetic field associated to thermospheric storm winds on March 23, 1979, *J. Geophys. Res., 95(A9)*, 209-218, 1990.

Hedin, A. E., M. A. Biondi, R. G. Burnside, G. Hernandez, R. M. Johnson, T. L. Killeen, C. Mazaudier, J. W. Meriwether, J. E. Salah, R. J. Sica, R. W. Smith, N. W. Spencer, V. B. Wickwar, T. S. Virdi, Revised Global Model of Thermosphere Winds using satellite and Ground based observations, *J. Geophys. Res.*, à paraître, 1991.

Mazaudier, C., A. Richmond, D. Brinkman, On thermospheric winds produced by auroral heating during magnetic storms and associated dynamo electric fields, *Ann. Geophysicae, 5*, 443-448, 1987.

Mazaudier, C., C. Senior, E. Nielsen, Global convection electric field and current: Comparisons between model's predictions and data from STARE, SAINT-SANTIN and magnetometers, *J. Geophys. Res., 92 (A6)*, 5991-5999, 1987.24

Mazaudier, C., Couplage électrodynamique entre l'ionosphère et la basse thermosphère: Revue sur les principaux résultats acquis durant les dix dernières années par les sondeurs à diffusion incohérente, *Adv. Space Res., 7*, 303-316, 1987a.

Mazaudier, C., Saint-Santin observations of electric fields and neutral winds in the dynamo layer during the GTMS period of June 1984, *Adv. Space Res., 7*, 285-290, 1987b.

Mazaudier, C., On the Saint-Santin results (1966-1987), in *Proceedings of the workshop WITS, 84-105, edited by A. Feldstein, Academy of Sciences of URSS*, 1989.

Mazaudier, C., S.V. Venkateswaran, Delayed ionospheric effects of March 22, 1979 studied by the sixth Coordinated Data Analysis Workshop (CDAW-6), *Ann. Geophysicae, 8*, 511-518, 1990.

Mazaudier C., J. Bouvet, M. Bouvard, M. Lafeuille, La Base de données Saint-Santin au NCAR, The NCAR Saint-Santin Data Base, *Document de Travail, DT/CRPE/1159*, février 1989.

Oliver, W.L., D. Alcaydé, P. Bauer, Incoherent Scatter radar contributions, Part 1: Thermosphere models, CIRA 1986, *Adv. Space Res., 8*, 119-147, 1988.

Richmond, A.D., Y. Kamide, B.-H. Ahn, S-I Akasofu, D. Alcaydé, M. Blanc, O. De La Beaujardière, D. S. Evans, J. C. Foster, E. Friss-Christensen, T. J. Fuller-Rowelle, J. M. Holt, D. Knipp, H. W. Kroehl, R. P. Lepping, J. Pellinen, C. Senior, and A. N. A. Zaitev, Mapping Elctrodynamic Features of the High-latitude Ionosphere From Localized Observations: Combined Incoherent-scatter Radar and Magnetometer measurements for January 18-19, 1984, J. *Geophys. Res., 93*, 5760-5776, 1988.

Richmond, A.D., Y. Kamide, S-I Akasofu, D. Alcaydé, M. Blanc, O. De la Beaujardière, D. S. Evans, J. C. Foster, E. Friis-Christensen, J. M. Holt, R. J. Pellinen, C. Senior, and A. N. Zaitev, Global measures of Ionospheric Electrodynamic Activity Inferred From Combined Incoherent Scatter Radar and Ground Magnetometer Observations, *J. Geophys. Res., 95*, 1061-1071, 1990.

Salah, J.E., M.L. Duboin, C. Mazaudier, Ionospheric electrodynamics over Saint-Santin and Millstone Hill during 26-28 June 1984, *Ann. Geophysicae, 5*, 351-358, 1987.

Senior, C., M. Blanc, Convection in the inner magnetosphere: Model predictions and data, *Ann. Geophysicae, 5*, 405-420, 1987.