Rapport d'activité CRPE pour l'année 1980

- Centre de Recherches En Physique de L'Environnement Terrestre Et Planétaire

▶ **To cite this version:**

- Centre de Recherches En Physique de L'Environnement Terrestre Et Planétaire. Rapport d'activité CRPE pour l'année 1980. Note technique CRPE n°105. 1981. hal-02192680

HAL Id: hal-02192680

https://hal-lara.archives-ouvertes.fr/hal-02192680

Submitted on 24 Jul 2019

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.

RP 1822 (47)

CENTRE NATIONAL D'ETUDES DES TELECOMMUNICATIONS

CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

CENTRE DE RECHERCHES EN PHYSIQUE DE L'ENVIRONNEMENT TERRESTRE ET PLANETAIRE

CRPE

NOTE TECHNIQUE
CRPE / 105

120

rapport d'activité CRPE pour l'année 1980

B

C.N.R.S.
Centre de Documentation Scientifique et Technique
Bibliothèque
16 SEP. 1981

CENTRE NATIONAL D'ETUDES
DES TELECOMMUNICATIONS
Centre PARIS B

CENTRE NATIONAL DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE
Secteur TOAE

CENTRE DE RECHERCHES EN PHYSIQUE DE L'ENVIRONNEMENT TERRESTRE ET PLANETAIRE

NOTE TECHNIQUE CRPE/105

RAPPORT D'ACTIVITE CRPE POUR L'ANNEE 1980

RPE
Echelon Issy
38-40 rue du Général Leclerc
92131 ISSY-LES-MOULINEAUX

RPE
Echelon Orléans
45045 ORLEANS CEDEX

Le Directeur

J. HIEBLOT

Le Directeur Adjoint

I. REVAH

Juillet 1981

TABLE DES MATIERES

I. INTRODUCTION 1

II. TROPOSPHERE ET CONDITIONS LIMITES AU SOL 5

II.1 ECHANGES SOL/ATMOSPHERE ET COUCHE LIMITE DE SURFACE 5

II.2 DYNAMIQUE DE LA COUCHE LIMITE ATMOSPHERIQUE 7

II.2.1 Couche limite hivernale 8

II.2.2 Couche limite convective 8

II.3 DYNAMIQUE DE LA CONVECTION NUAGEUSE ET DES PRECIPITATIONS 9

II.3.1 Préparation de la campagne COPT 81 10

II.3.2 Résultats scientifiques 11

III. PROPAGATION DES ONDES ELECTROMAGNETIQUES DANS L'ATMOSPHERE TERRESTRE 15

III.1 PROPAGATION HORIZONTALE EN AIR CLAIR 15

III.1.1 Dépouillement et interprétation de la manip. Landes 15

III.1.2 Effets du filtre atmosphérique sur les transmissions numériques ; expérience de Meudon 15

III.1.3 Projet d'étude de l'effet du filtre atmosphérique sur les transmissions numériques 19

III.2 INTERACTION ONDES E.M./HYDROMETEORES 19

III.2.1 Liaisons horizontales 19

III.2.2 Liaisons obliques 19

III.3 BALISE 20 - 30 - 40 - 90 GHz 21

IV. ETUDE DE L'ATMOSPHERE MOYENNE : PHYSICO-CHIMIE ET DYNAMIQUE 27

IV.1 DYNAMIQUE DE LA HAUTE MESOSPHERE : ETUDES PAR RADARS METEORIQUES 29

IV.2 PHOTOCHIMIE DE LA MESOSPHERE : ETUDES PAR DIFFUSION INCOHERENTE 30

IV.2.1 Etudes théoriques 35
IV.2.2 Techniques expérimentales 36

IV.3 DYNAMIQUE DE LA STRATOSPHERE : ETUDES PAR RADAR COHERENT 37

V. CHIMIE ATMOSPHERIQUE ET ASTROCHIMIE 39

VI. ELECTRODYNAMIQUE DE L'ATMOSPHERE IONISEE 41

VI.1 LA DYNAMO IONOSPHERIQUE : VARIATIONS REGULIERES EN BASSES ET MOYENNES LATITUDES 43

VI.1.1 Champ électrique en région F 43
VI.1.2 Champ électrique et fréquences de collision en région E 45
VI.1.3 Courants électriques en région E 45
VI.1.4 Conductivités ionosphériques 47
VI.1.5 Dynamique de l'ionosphère équatoriale 47

VI.2 LA DYNAMO VENT SOLAIRE/MAGNETOSPHERE 49

VI.2.1 Etudes théoriques sur la convection magnétosphérique 49
VI.2.2 Etude expérimentale de la convection en zone aurorale 53
VI.2.3 La convection au voisinage de la plasmapause 55
VI.2.4 La convection et ses effets aux moyennes latitudes 61

VII. RAYONNEMENT ELECTROMAGNETIQUE TERRESTRE ET PLANETAIRE 63

VII.1 ROLE DES ONDES D'ALFVEN DANS LA DYNAMIQUE DES COMPOSANTES DU PLASMA MAGNETOSPHERIQUE 67

VII.2 DIFFUSION ET PRECIPITATION DES ELECTRONS ENERGETIQUES 68

VII.3 RAYONNEMENT RADIO PLANETAIRE 69

VII.4 ONDES NATURELLES EN AMONT DU CHOC DE LA TERRE 70

VII.5 ROLE DES COURANTS ALIGNES DANS LA DYNAMIQUE DES SOUS-ORAGES 70

VII.6 STABILITE DE LA COUCHE NEUTRE DE LA QUEUE DE LA MAGNETOSPHERE 71

VII.7 ETUDE DES CHAMPS D'ONDES ELECTROMAGNETIQUES NATURELS 71

CONCLUSION 71

VIII. RESONANCE DES PLASMAS 73

VIII.1 MAGNETOSPHERE 74

VIII.1.1 Expérience "impédance mutuelle" sur GEOS 1-2 74
VIII.1.2 Expérience "sondage à relaxation" (S301) sur GEOS 1-2 75
VIII.1.3 Expérience sondage à relaxation sur ISEE 81

VIII.2 COUPLAGE IONOSPHERE-MAGNETOSPHERE 81

VIII.2.1 Expérience "PORCUPINE" 81
VIII.2.2 Caractérisation du plasma ionosphérique et des champs électrostatiques à bord du satellite ARCAD 3 83
VIII.2.3 Expérience "SUBSTORM GEOS" 84

VIII.3 METROLOGIE DES PLASMAS SPATIAUX 84

VIII.4 TRAITEMENT DU SIGNAL 91

VIII.5 PHYSIQUE DES RESONANCES 91

IX. PHYSIQUE THEORIQUE ET MODELISATION 95

IX.1 SIMULATION SUR ORDINATEUR DES PLASMAS FORTEMENT CORRELES 95

IX.2 SIMULATION NUMERIQUE DES "DOUBLES COUCHES" 96

IX.3 THEORIE DES GROUPES ET PHYSIQUE NON LINEAIRE 97

IX.3.1 Théorie des faisceaux d'électrons 97
IX.3.2 Equation de Schroedinger pour un pulse de potentiel 97
IX.3.3 Invariants adiabatiques pour des puits de potentiel variant avec le temps 98
IX.3.4 Dynamique stellaire 99

IX.4 STRUCTURE ET SIMULATION DES RESEAUX DE CONNEXION 100

X. EXPERIENCES ACTIVES 103

X.1 EXPERIENCE PICPAB (Phenomena induced by charged particle beams) 103
X.2 EXPERIENCE ARAKS 103
X.3 ETUDES DE FAISABILITE DE LA MESURE DES CHAMPS ELECTRIQUES PARALLELES PAR INJECTION DE PARTICULES CHARGEES 103
X.4 ACCELERATEURS D'IONS 105
X.5 EXPERIENCES ACTIVES "ONDES TBF" 105

XI. ETUDES DIVERSES. QUELQUES REALISATIONS TECHNIQUES 109

XI.1 CHARGES UTILES DE SATELLITES DE TELECOMMUNICATIONS 109
XI.2 CARACTERISATION DES SURFACES PAR MICROSCOPIE AUGER ET MICROSCOPIE ELECTRONIQUE A MIROIR 110
XI.3 TRAITEMENT DE DONNEES DE TELEDETECTION 111

BIBLIOGRAPHIE 123 à 146

I. INTRODUCTION

Le CRPE est un laboratoire commun au CNET et au CNRS, aussi couvre-t-il un large éventail de discipline où ses deux tuteurs ont des intérêts communs. Son implantation, partie à Issy et partie à Orléans, l'amène à une diversité accrue pour tenir compte, dans la mesure du possible, du contexte universitaire et de recherche orléanais. Les recherches menées au CRPE relèvent du secteur TOAE, plus particulièrement des sections 7 et 16 et du secteur SPI.

Relèvent du secteur SPI les études décrites aux chapitres :

- III. Propagation horizontale en air clair dans des situations météorologiques définies de manière détaillée, cas des transmissions numériques - Interaction des ondes électromagnétiques et des hydrométéores - Projet d'étude de propagation satellite/sol jusqu'à 90 Gigaherz. Cette partie est exposée par Daniel VIDAL-MADJAR et Jean-Pierre MON.

- XI. (partie) Charges utiles de télécommunications, étude du prototype de commande d'une motrice de commutation de bord. Caractérisation de surfaces initialement développée pour l'étude du comportement de capteurs dans l'ambiance spatiale puis appliquée à l'étude de la corrosion des contacts en courants faibles. Cette contribution a été rassemblée par Yves de JAVEL.

De plus le Chapitre IX rédigé par Marc FEIX présente l'activité de son équipe. Elle se consacre à des problèmes de physique théorique et de modélisation dont les applications relèvent parfois du secteur TOAE (section 7) mais plus souvent du secteur SPI. Les études portent sur : la simulation sur ordinateur des plasmas fortement corrélés, la simulation numérique des "doubles couches", quelques applications de la théorie des groupes et des études de physique non linéaire, enfin l'étude de la structure et de la simulation des réseaux de connexion en vue de l'optimisation de la gestion d'un réseau commuté de télécommunications.

Relèvent de la section 16 du secteur TOAE les chapitres :

- II. Troposphère et conditions limites au sol. Ce chapitre décrit l'activité de l'équipe animée par Jacques TESTUD et a été rassemblé par Paul AMAYENC. Il traite des échanges sol/atmosphère, de la dynamique de la couche limite atmosphérique, de la dynamique de la convection nuageuse et des précipitations avec, en particulier, la préparation de la campagne en région tropicale, COPT 81.

- XI. (paragraphe 3 in fine) Philippe MARTIN y décrit une méthode de traitement des données de télédétection du satellite SEASAT-1.

Toutes les autres contributions relèvent de la géophysique externe et des relations avec le vent solaire, donc de la section 7 du secteur TOAE :

Au chapitre IV, François BERTIN a rassemblé les contributions du CRPE sur la physico-chimie et la dynamique de l'atmosphère moyenne.

R. BURKE décrit, au chapitre V, l'apport de son équipe en chimie atmosphérique et astrochimie, résultats obtenus en collaboration avec André BARASSIN.

L'électrodynamique de l'atmosphère ionisée constitue un des grands objectifs du CRPE. Michel BLANC y a rassemblé des études effectuées par des méthodes expérimentales variées (satellites ISEE 1-2-3, GEOS-2, sondeurs à diffusion incohérente, sondeurs classiques) et qui s'insèrent dans des modèles locaux ou globaux de la dynamique du plasma dans le vent solaire, la magnétosphère, l'ionosphère aurorale et celle des latitudes moyennes.

Le rayonnement électromagnétique de la terre fait aussi l'objet de maintes études théoriques et expérimentales dues, en particulier, à l'équipe de Roger GENDRIN ; Alain ROUX présente, au chapitre VII, l'ensemble des résultats du CRPE.

Au chapitre VIII, Raymond POTTELETTE a rassemblé les études de géophysique externe obtenues à partir de l'étude des résonances du plasma, les principaux travaux ont été accomplis par les équipes de L.R.O. STOREY, Christian BEGHIN et par les expérimentateurs de GEOS 1 et 2.

Enfin, au chapitre X, Michel PIRRE expose les études préparatoires à PICPAB, les interprétations faites au CRPE, de l'expérience ARAKS et des réceptions, à bord de GEOS-1, d'émetteurs TBF au sol.

L'ensemble de ce rapport d'activité a été réalisé grâce à Gérard BELMONT.

L'activité elle-même du laboratoire a été organisée et animée par Isaac REVAH et Pierre BAUER.

J. HIEBLOT

II. TROPOSPHERE ET CONDITIONS LIMITES AU SOL

L'activité du CRPE dans le domaine de la basse atmosphère couvre trois domaines : les échanges sol/atmosphère et la physique de la couche de surface (0 à 100 m d'altitude), la physique de la couche limite atmosphérique, et les mouvements convectifs en atmosphère libre conduisant à la formation des précipitations. Ces trois programmes sont bien évidemment étroitement liés : les échanges sol/atmosphère dans la couche de surface définissent les flux de chaleur sensible et latente injectés à la base de la couche limite atmosphérique (C.L.A.). La dynamique de la C.L.A. (mouvements convectifs ou d'instabilité dynamique) détermine la façon dont ces flux se transmettent vers le haut et dont ils s'atténuent au voisinage de la couche d'inversion. Enfin, dans les conditions où le bilan énergétique de la C.L.A. est excédentaire (sous les tropiques par exemple), le déséquilibre énergétique qui s'ensuit entre la C.L.A. et l'atmosphère libre conduit au développement de la convection profonde.

II.1 ECHANGES SOL/ATMOSPHERE ET COUCHE LIMITE DE SURFACE

Ce domaine est abordé au CRPE depuis 1979 à partir de méthodes de télédétection utilisant les hyperfréquences actives et la Radiométrie Infra-Rouge.
L'année 1980 a vu la concrétisation des efforts de l'équipe dans deux directions : expérimentale et théorique. Pour le volet expérimental, la campagne de Vôves en septembre 1980 a pleinement réussi. Cette expérience a permis :

a) de qualifier la télédétection hyperfréquence active pour la mesure de l'humidité superficielle d'un sol couvert ou non de végétation. L'utilisation du diffusiomètre RAMSES du CNES sur trois types de surfaces a permis de confirmer les résultats obtenus par l'équipe de F.T. Ulaby (promoteur de la méthode). Un article est en préparation sur l'étalonnage du diffusiomètre ;

b) de montrer la possibilité d'utiliser les satellites à défilement du réseau NOAA/Tiros pour la mesure de l'évolution spatio-temporelle de la température de surface et son application à la détermination des flux d'énergie dans la couche de surface atmosphérique. Les images acquises au-dessus de la Beauce pendant le mois de septembre 80 sont en cours de traitement en collaboration avec le CMS à Lannion. L'expérience acquise sur les données de la campagne de Vôves doit être utilisée pour l'exploitation des données satellitaires acquises durant COPT 81 ;

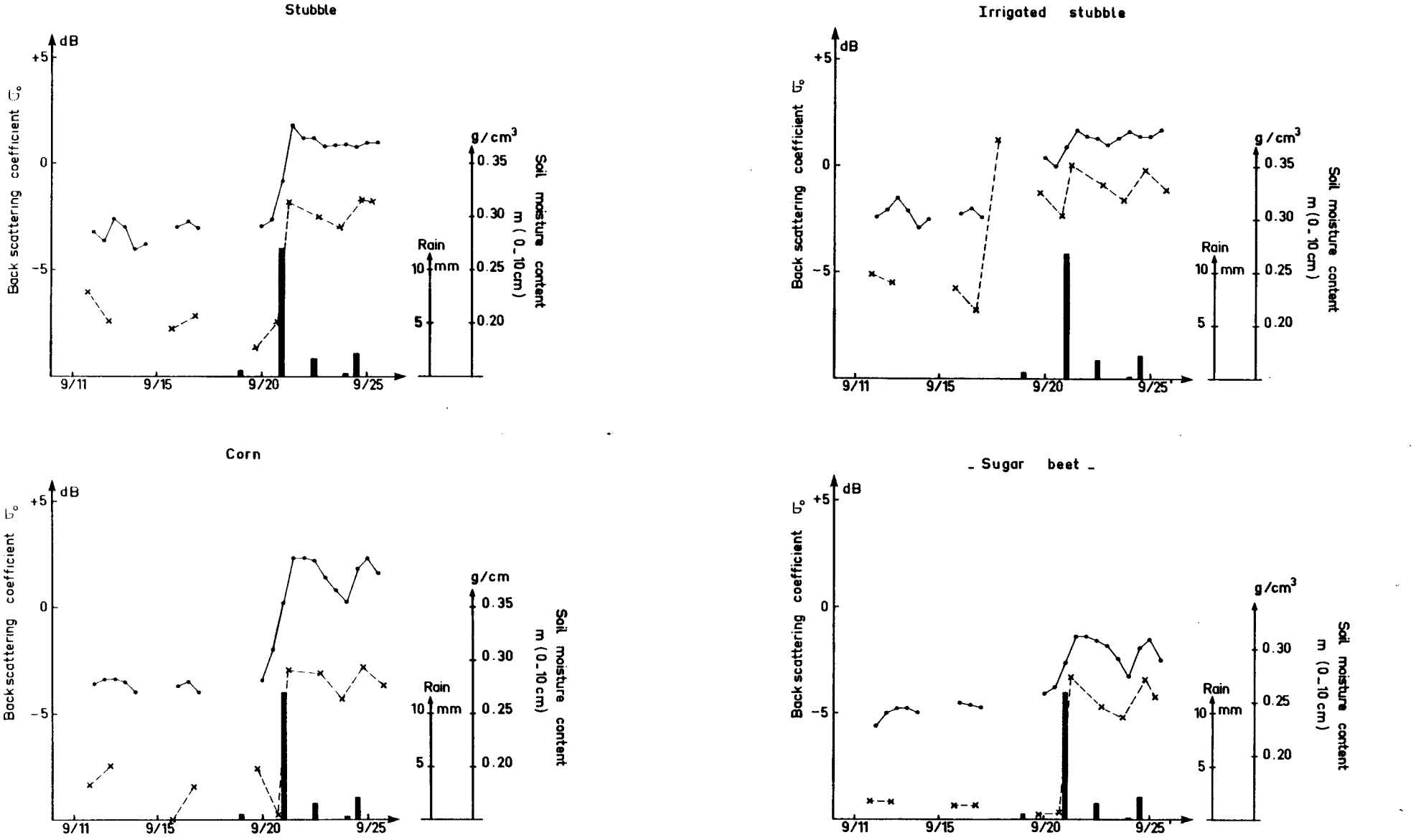


Figure 1 (II) : Evolution temporelle du coefficient de rétrodiffusion τ_o (courbe en points noirs) comparée à l'évolution de l'humidité de surface mesurée par prélèvements gravimétriques entre 0 - 10 cm. Comme on peut le voir, le couvert végétal n'affecte pas la corrélation du signal avec l'humidité de surface. Ceci est une propriété particulière des longueurs d'onde centimétriques qui rend la technique hyperfréquences complémentaire de la mesure de la température infra rouge du couvert végétal.

c) d'acquérir des mesures redondantes de bilan hydrique souterrain (Institut de Mécanique de Grenoble) et des flux dans la couche de surface atmosphérique (INRA) de façon à permettre un test des modèles physiques ou empiriques utilisant la température de surface et l'humidité superficielle du sol pour décrire les échanges sol/atmosphère.

Parallèlement à cet effort expérimental, un modèle théorique de transport d'eau dans les milieux non saturés a été développé, permettant d'obtenir l'évaporation réelle sur sol nu à partir de l'humidité de surface mesurée par diffusiomètre hyperfréquence. Ce modèle a permis d'étudier :

- l'effet des erreurs de mesure,
- l'effet de la périodicité de la mesure,
- l'effet des hétérogénéités du sol à l'échelle de la parcelle.

Un article est en préparation. Le modèle doit maintenant être testé à partir des données de l'expérience Vôves 80 en utilisant la variation dans le temps de la section efficace de rétrodiffusion (Figure 1). Ce travail fera l'objet d'une communication à l'assemblée générale de l'URSI.

Enfin, le projet de radar héliporté est entré dans la phase finale d'étude et de financement (par le CNES). La date prévue pour le fonctionnement de l'appareil est : 1er semestre 82.

II.2 DYNAMIQUE DE LA COUCHE LIMITE ATMOSPHERIQUE

L'activité dans ce domaine repose essentiellement sur les sondeurs acoustiques à effet Doppler (ou sodar Doppler) opérationnels depuis 1974. L'exploitation scientifique de ces appareils est le fait d'une équipe de trois chercheurs appuyés par les équipes technique et informatique. La philosophie des études est essentiellement la suivante : tout progrès en matière de modélisation, que ce soit en météorologie ou en climatologie nécessite une connaissance de la variabilité spatiale et temporelle des phénomènes atmosphériques ; en particulier, il est délicat de tester la sensibilité de modèles existants, alors que des mesures de flux par des méthodes souvent semblables en des points très voisins laissent apparaître des écarts relatifs importants attribuables à des effets locaux.

L'extension spatiale des mesures et la compréhension des effets d' "homogénéisation" à plus grande échelle devraient permettre de résoudre partiellement ces "incertitudes" : en septembre dernier s'est déroulée avec succès, une expérience prospective à mésoéchelle mettant en évidence le rôle des hétérogénéités. Les contributions les plus marquantes ont concerné les points décrits ci-après.

II.2.1 Couche limite hivernale

L'analyse des données des Campagnes 1978-79 à Vôves a permis de mettre en évidence des caractéristiques générales des couches anticycloniques stables ; en particulier deux études ont été entreprises :

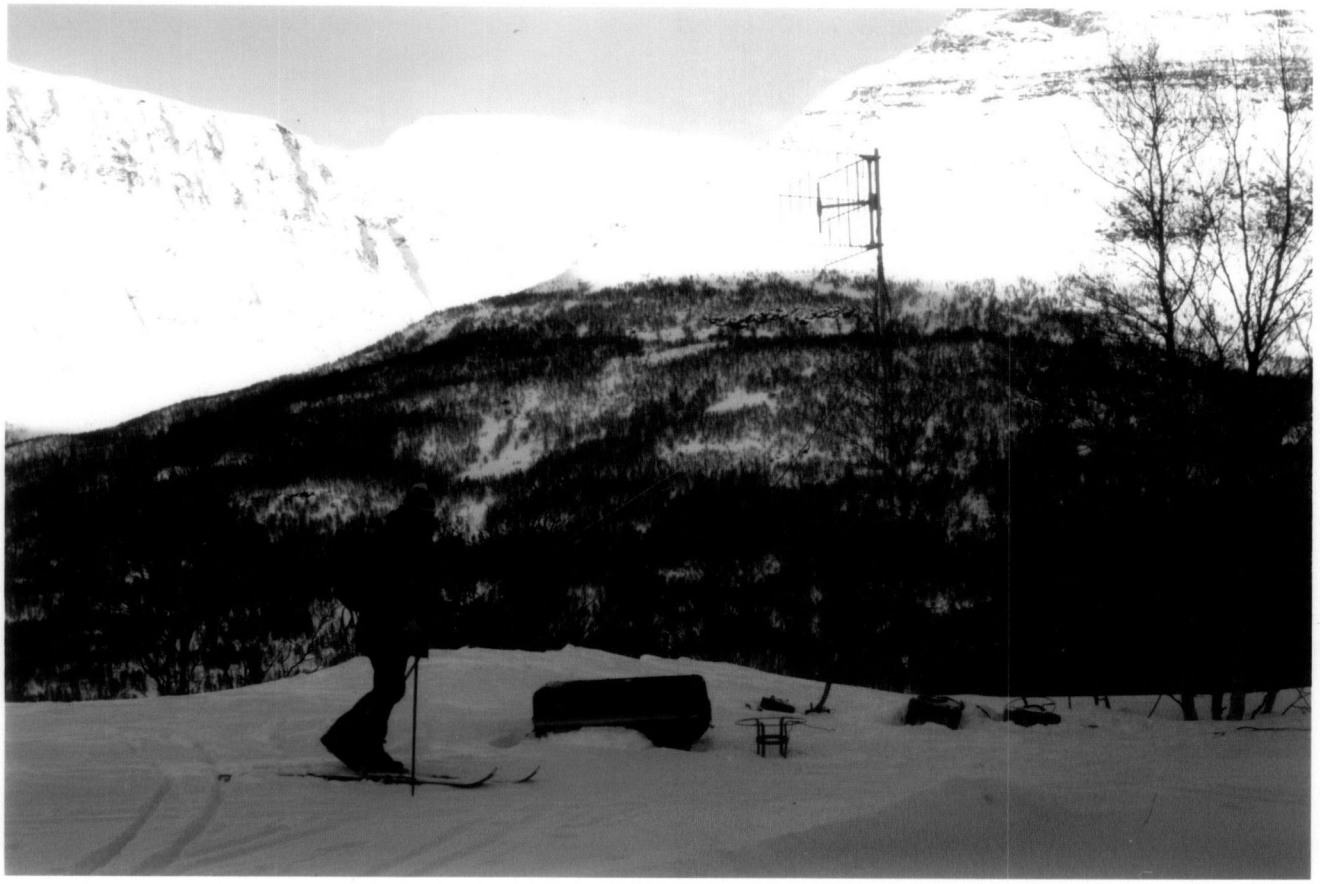
a) mise en évidence des altitudes caractéristiques des couches d'inversion hivernale, mal définies jusqu'à présent dans la littérature : (lieu des points de l'espace où existent simultanément un cisaillement du vecteur vent et un maximum de réflectivité acoustique). Cette définition permet de suivre correctement l'évolution de la couche stable contrairement au suivi du profil de température potentielle fortement perturbé par les effets radiatifs non négligeables au voisinage de la surface (152, 265).

b) étude critique des longueurs de dissipation dans les couches stratifiées stables ou sporadiquement stables.
A partir de l'analyse des fluctuations de vitesse mesurées sur un mât de 100 mètres (système GILL u, v, w) et de la considération des profils de température et de vitesse moyenne sur le mât, les longueurs de dissipation ont été calculées et reliées à la stabilité dynamique de l'écoulement.
Cette étude est particulièrement importante lorsqu'on envisage la fermeture à un ordre élevé des modèles de couche limite : une telle fermeture dépend de façon critique d'une paramétrisation correcte de cette longueur.

II.2.2 Couche limite convective

Deux aspects spécifiques des résultats déjà signalés en 1979 ont été généralisés :

- la mise en évidence du flux élémentaire de chaleur transporté par un thermique en utilisant les mesures de vitesses sodar (151, 415, 530) ;



La station mobile de réception de signaux naturels de l'INAG a été mise en place en Norvège dans la région conjuguée de GEOS-2 afin de détecter les ondes naturelles UBF et EBF-TBF qui peuvent se propager jusqu'au sol. Les sondes qui permettent de détecter ces signaux sont placées loin de toute source de courants parasites et les signaux sont transmis par télémesure jusqu'à la station d'enregistrement.

- la production d'ondes par intrusion convective dans la couche d'inversion. Ce phénomène est intéressant dans la mesure où il traduit un échappement d'énergie au sommet de la C.L.A.. On a pu montrer que l'excitation d'ondes par les mouvements convectifs s'effectuait non pas à l'échelle de thermiques individuels, mais à celles de structures convectives organisées à échelle supérieure (ou "grosses structures") : ce résultat établi sur plusieurs cas a été quantifié, on connait maintenant le taux d'énergie transféré par ces ondes de gravité.

C'est le problème de la couche limite hétérogène qui sera abordé au cours des prochaines années. L'équipe "couche limite" s'en est donné les moyens techniques : un second sodar triple a été réalisé par le département T.E.S. "Techniques Sols" et partiellement un micro-sodar qui sera utilisé comme "fluxmètre acoustique". Par ailleurs l'équipe a dépouillé l'expérience "Chaff" des Landes utilisant le radar Doppler "Ronsard" en air clair. Des résultats originaux ont été obtenus sur les "grosses" structures convectives en air clair observées par le sodar et le radar. Le champ de vitesse tridimensionnel a été analysé et interprété. Les différences entre spectres de vitesses verticales spatiaux (Radar) et eulériens (Sodar) ont fait l'objet d'une étude particulière.

Les thèmes essentiels lors de la campagne COPT 81 en Côte d'Ivoire seront de restituer les flux à l'intérieur du domaine d'expérience, d'analyser les hétérogénéités convectives en site homogène et les relier aux paramètres essentiels de la convection en ciel clair (219, 220).

En 1983 nous espérons nous associer à une expérience internationale en collaboration avec le Royal Netherlands Meteorological Institute dans le but d'étudier la "mésoéchelle" en associant un réseau de sodars, le micro-sodar et les mesures de flux à l'échelle régionale, ainsi que d'autres instruments dont d'autres équipes de notre communauté scientifique ont la maîtrise.

II.3 DYNAMIQUE DE LA CONVECTION NUAGEUSE ET DES PRECIPITATIONS

Ce thème d'étude repose au CRPE sur l'utilisation de deux radars météorologiques à effet Doppler (système RONSARD). Les performances du système, opérationnel depuis 1977, sont comparables à celles des meilleurs instruments existant aux Etats-Unis. La mise en oeuvre opérationnelle, la maintenance et l'exploitation des

données de cet appareillage lourd et complexe sont obtenues grâce à une étroite collaboration entre les équipes scientifique (7 personnes), technique (5 personnes) et mini-informatique (3 personnes).

Au cours de l'année 1980, il s'est agit d'une part, de valoriser les résultats obtenus et d'autre part, de préparer aux plans scientifiques et techniques la campagne d'observation de la convection profonde tropicale (COPT 81) qui se déroulera en Côte d'Ivoire, dans la région de Korhogo en mai-juin 1981.

II.3.1 Préparation de la campagne COPT 81

Un effort intensif a été consenti en ce qui concerne les derniers développements technologiques des instruments, l'amélioration des méthodes d'analyse des données et enfin, la préparation scientifique et opérationnelle de l'expérience proprement dite.

a) Les améliorations techniques des instruments ont été réalisées et tentées au cours de l'expérience Fronts 80 en région parisienne. Outre des améliorations de caractère logistique (mise sur remorque des conteneurs de gestion, doublement des calculateurs de prétraitement MITRA 15/115, amélioration des climatisations) elles portent essentiellement sur l'amélioration du rapport signal/bruit, l'extension de la gamme de vitesses radiales observables, l'augmentation de la résolution spectrale, la possibilité de commutation rapide de la polarisation à la réception, la mise au point de procédures de contrôle du fonctionnement de l'équipement.
On a également rendu opérationnel un spectro pluviomètre photoélectrique au sol (conçu et réalisé antérieurement au CRPE), destiné à être systématiquement associé aux mesures radar dans l'avenir.

b) Les diverses méthodes d'analyse des données ont subi d'importants développements : i) correction de l'advection et minimisation des effets parasites dus à l'absence de données à basse altitude (effets de masque ou de relief), dans la méthode de restitution du champ de vitesse tridimensionnel ; ii) sensibilité de la méthode de restitution des caractéristiques granulométriques des précipitations aux effets d'élargissements parasites dans la méthodologie d'utilisation en tir vertical ; iii) certification des méthodes d'étalonnage absolu de la réflectivité radar.

c) La préparation de l'expérience proprement dite a été effectuée en coordination avec les chercheurs et techniciens des autres organismes participants (la

structure de coordination de l'expérience COPT repose sur un Comité "Scientifique" et un Comité "Technique"). En ce qui nous concerne, l'analyse des données de l'expérience préliminaire COPT 79 a permis d'affiner nos objectifs scientifiques et de proposer à nos partenaires des procédures précises de prise de données, qui ont remporté leur adhésion. La préparation logistique, pour le CRPE, a été assurée par les équipes du département TES en liaison avec les responsables techniques des autres organismes participants.

II.3.2 Résultats scientifiques

a) Etude des écoulements convectifs

La méthodologie de restitution du champ de vitesse tridimensionnel à partir de l'observation simultanée des radars opérant en balayages coplanaires est actuellement bien rodée après les derniers développements dont elle a fait l'objet. Un traitement numérique original fondé sur l'utilisation d'une méthode variationnelle avec contraintes permet de rendre minimum, de façon optimale, les effets de distorsions de la composante verticale qui résultent de la variance des erreurs statistiques dans les mesures de vitesses radiales en fonction de la distance aux radars et de l'absence éventuelle de données à basse altitude (effets de masques, existence de relief, ou augmentation de l'altitude minimale du faisceau radar avec la distance).

En ce qui concerne la restitution de paramètres dynamiques à partir des champs tridimensionnels de vitesses et de réflectivités, des améliorations sensibles ont été apportées à la méthode utilisée. Tout d'abord, la reconstitution des forces horizontales de pression s'effectue désormais par l'intermédiaire d'une méthode d'ajustement au sens des moindres carrés avec contrainte, présentant l'avantage d'un formalisme mathématique rigoureux (recherche de gradients de perturbation de pression le plus proche au sens de la norme d'un espace de Hilbert, des accélérations horizontales calculées).

Le second point concerne la restitution des forces verticales : l'écriture de l'équation du mouvement sous deux formes utilisant deux couples de variables thermodynamiques propres, permet maintenant, en utilisant également les gradients horizontaux de pression, de séparer dans les accélérations verticales les contributions respectives des forces de flottabilité, de perturbation de pression et de gradient vertical de perturbation de pression. On a pu montrer que les résultats ainsi obtenus à partir de données de l'expérience FRONTS 77 mettent en évidence des comportements dynamiques similaires à ceux déduits de modèles numériques tridimensionnels ou d'observation (214, 258, 259, 413).

On a également pu, en ce qui concerne deux situations observées au cours de la campagne "Landes 79", rapprocher des données radar et des mesures d'électricité atmosphériques réalisées simultanément (212, 237, 507).

b) Etude de la granulométrie des hydrométéores précipitants

On a procédé à des améliorations fondamentales de la méthodologie d'acquisition des données des radars Doppler en tir vertical, permettant une mesure de la granulométrie des hydrométéores précipitants et de la vitesse verticale de l'air au zénith du radar.

Au niveau de la mesure, ceci s'est traduit par des améliorations de la résolution en altitude et de la résolution spectrale ainsi que par la possibilité nouvelle de commutation de la polarisation à la réception, visant une distinction de la phase eau/glace dans les systèmes précipitants.

La méthode d'analyse des données a également subi un approfondissement en ce qui concerne sa sensibilité à la présence éventuelle de turbulence de petite échelle ou à la non-unicité de la relation vitesse de chute - diamètre. Deux séries de résultats obtenus à partir de données recueillies en 1977 et 1978 (408) ont été mis en forme, présentés en communication (201, 232) et acceptés pour publication (515, 516). Le dépouillement et l'interprétation de données plus récentes (expériences "Landes 79" et "Fronts 80") a également été engagé.

Au cours de l'expérience FRONTS 80, on a pu réaliser quelques observations mettant en jeu simultanément un radar en tir vertical et un avion instrumenté en capteurs microphysiques (EERM, Météorologie Nationale). Ces observations sont destinées à obtenir un enseignement préliminaire à la reconduction d'une expérience similaire plus ambitieuse, dans l'avenir.

c) Dynamique des systèmes frontaux

Les études sur ce thème (151) ont été poursuivies sur une observation de front chaud (213). L'existence de mouvements à l'échelle de 5 à 10 km a été mise en évidence dans la région située en avant de la zone frontale. Une technique d'analyse bidimensionnelle a été développée pour appréhender la répartition énergétique du spectre de ces mouvements qui peuvent être interprétés comme la manifestation d'instabilité du cisaillement de vitesse horizontal à l'interface air chaud/air froid.

d) Etude des lignes de grains tropicales

Dans les régions tropicales, la convection profonde du type nuage cumulonimbus se présente fréquemment organisée en systèmes linéaires appelés "lignes de grains". Les observations réalisées au cours de la campagne préparatoire (COPT 79) à COPT 81 montrent que ce type d'événements représente environ 50 % des perturbations en Côte d'Ivoire.

Les mesures effectuées sur le site de Korhogo (radiosondages, mesures vent, clichés radar) ont permis d'étudier le cycle d'énergie atmosphérique, accumulation et décharge, associé au passage de ces lignes de grains ainsi que leur dynamique. Un modèle a été développé pour rendre compte de ces observations. Il fait appel à des concepts d'écoulements stationnaires qui résultent de l'interaction continue de courants ascendants et descendants. Il utilise la notion de courant de densité lié à la propagation du front de rafale (241).

Les résultats encourageants obtenus dans ce type d'approche indiquent une grande stabilité des structures étudiées, qui permet d'envisager lors de COPT 81, une étude expérimentale fine de la dynamique tridimensionnelle dans les structures convectives en question.

Au cours de l'année 1981 l'activité de l'équipe visera essentiellement à :

- assurer le succès de la réalisation de l'expérience COPT 81 à l'aide des équipements du CRPE mis en oeuvre pour engager le dépouillement et l'interprétation des données recueillies ;

- poursuivre la publication des résultats (méthodologie et observations) acquis antérieurement ;

- élaborer à partir de notre expérience de 3 ans d'utilisation du système Ronsard, un ensemble de modifications techniques destinées d'une part, à améliorer les performances de l'instrument (ex. : augmentation du nombre de portes de distance observables, amélioration du lobe d'antenne), d'autre part à en élargir les possibilités (identification de la phase eau/glace des hydrométéores en effectuant des mesures dans deux polarisations orthogonales).

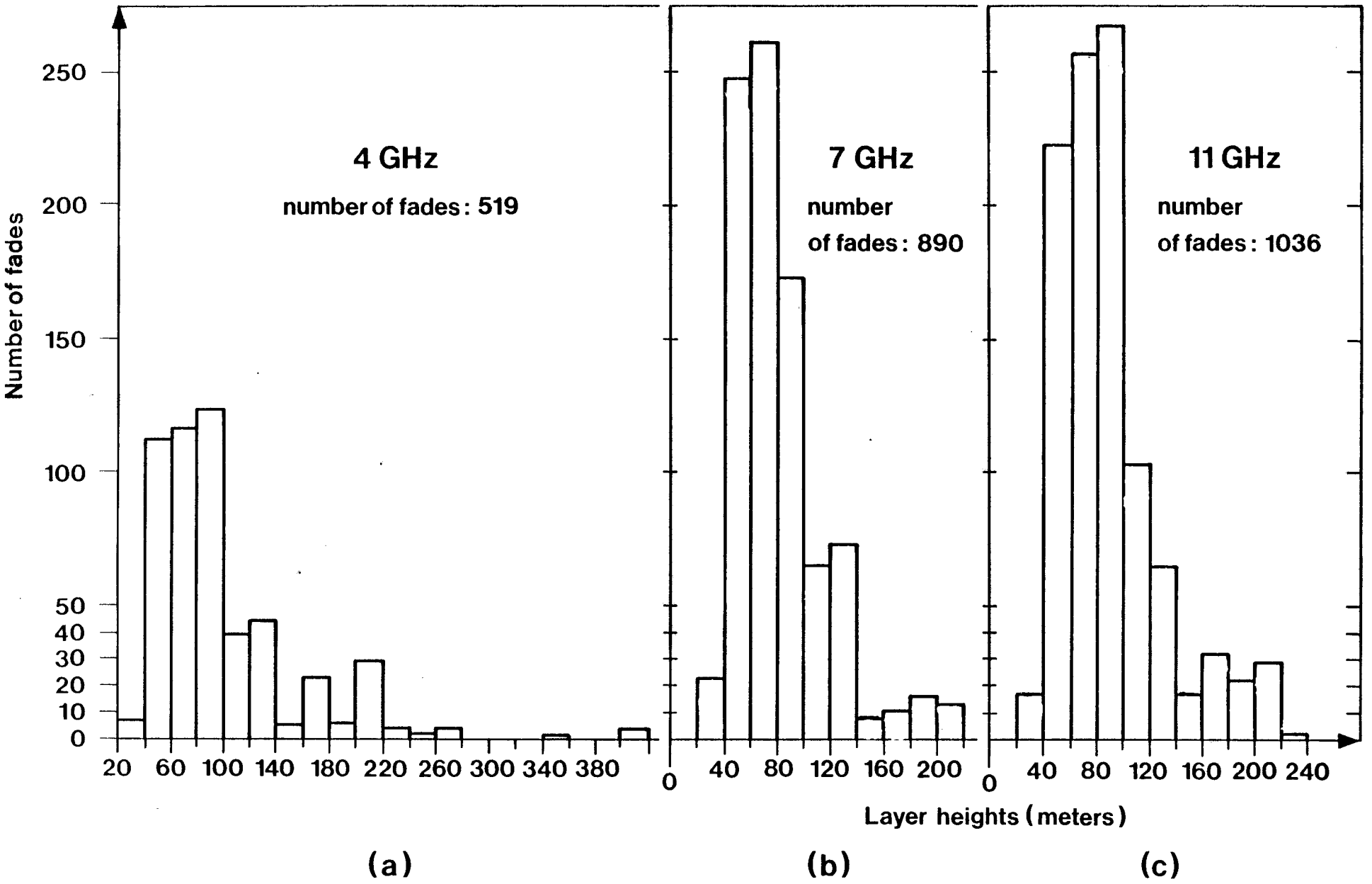


Figure 1 (III) : Nombre d'affaiblissements à 4,7 et 11 GHz provoqués par des stratifications atmosphériques dont l'altitude du sommet est donnée par l'abscisse (les échelles d'ordonnées de droite donnent le pourcentage du nombre total des affaiblissements pour chacune des fréquences).

III. PROPAGATION DES ONDES ELECTROMAGNETIQUES DANS L'ATMOSPHERE TERRESTRE

Les études sur la propagation troposphérique ont vu la continuation du travail sur les liaisons horizontales et obliques et l'arrivée à maturité de deux projets : à moyen terme concernant l'influence de la propagation horizontale en ciel clair sur les transmissions numériques, à long terme avec la Balise à 20, 30, 40 et 90 GHz.

III.1 PROPAGATION HORIZONTALE EN AIR CLAIR

III.1.1 Dépouillement et interprétation de la manip. Landes

La campagne "Landes" d'août à septembre 1979 associait des liaisons radioélectriques à 4,7 et 11 GHz et des dispositifs de mesures météorologiques (sondeur acoustique, mât instrumenté, ballon sonde). Les premiers résultats du traitement ont été obtenus au cours de l'année 80. On a pu montrer en particulier une excellente corrélation entre la hauteur de la couche d'inversion (mesurée par le SODAR) et les évanouissements de la puissance sur les trois liaisons (figure 1) (522).

III.1.2 Effets du filtre atmosphérique sur les transmissions numériques ; expérience de Meudon

L'expérience de Meudon de mesure du module de la fonction de transfert atmosphérique en air clair a fonctionné une partie de l'année 1980. Des premiers résultats du dépouillement donnant en fonction du temps l'évolution de la distorsion du spectre ont été obtenus (figure 2). La modification du système de mesure permettant l'acquisition d'un plus grand nombre de points du spectre de puissance a été entreprise et devrait être opérationnelle vers le milieu de l'année 1981. Afin de permettre l'interprétation des résultats sur la distorsion du filtre atmosphérique, on a commencé la mise au point d'un modèle de propagation dans un milieu à stratification horizontale d'indice de réfraction.

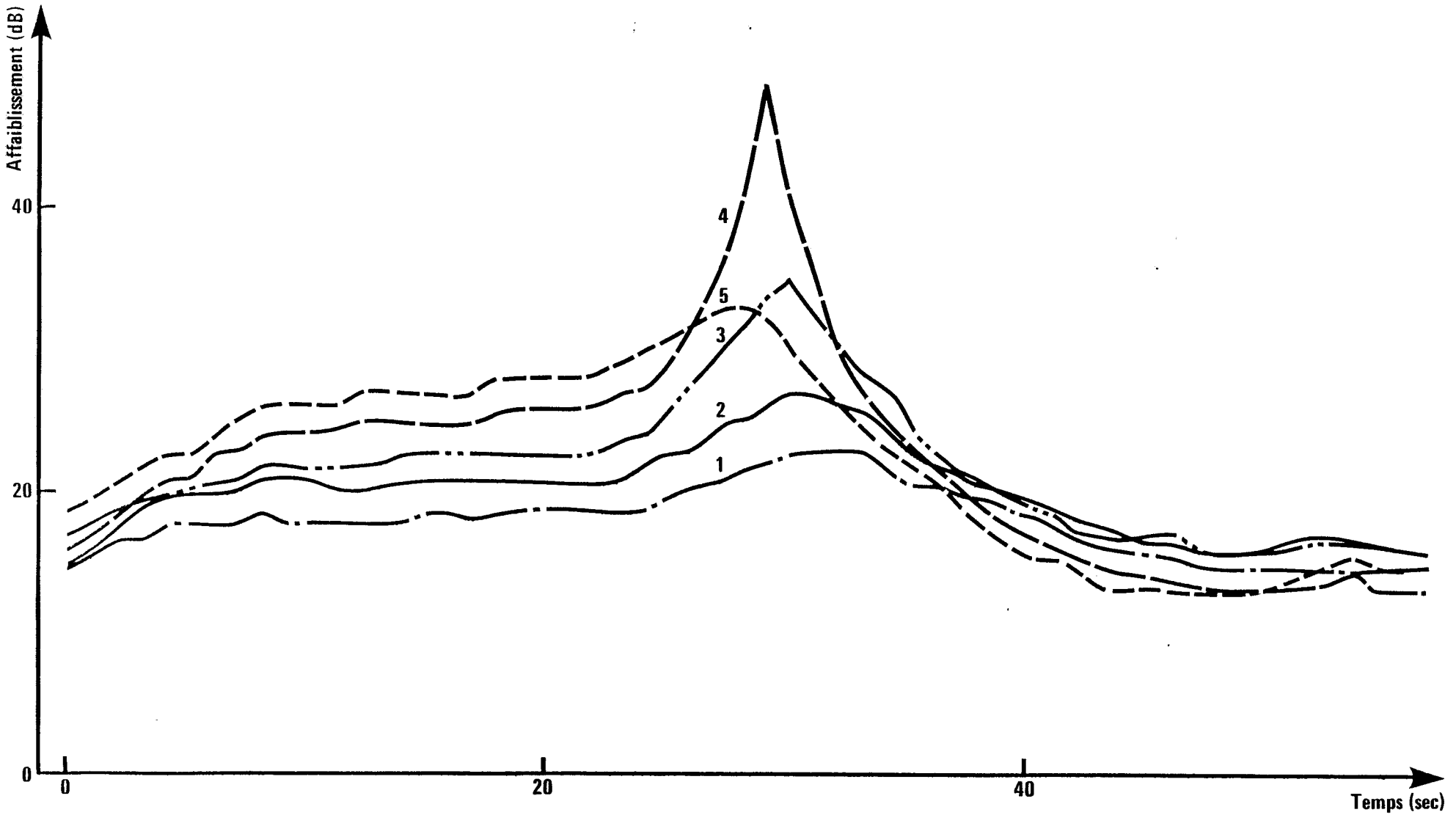
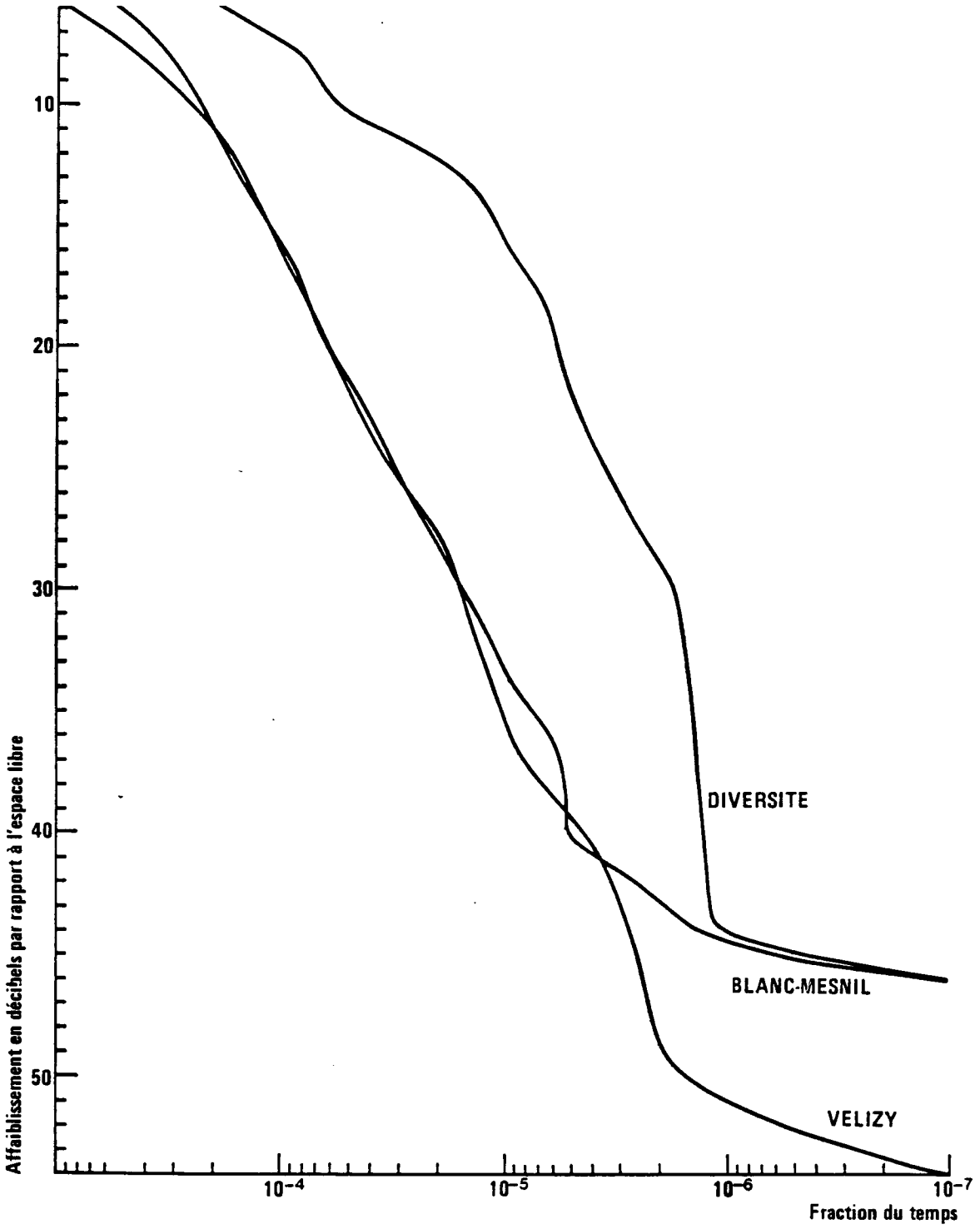


Figure 2 (III) : Exemple d'évanouissement sélectif en fréquences observé à Meudon. On voit l'évolution pendant une minute de cinq fréquences espacées de 30 MHz autour de la fréquence centrale (numérotée 3) à 11, 70 GHz. La fréquence n° 4 (11,73 GHz) est descendue à -48 dB en-dessous de l'espace libre pendant 1 sec., alors que la fréquence n° 1 (11,64 GHz) n'est jamais descendue au-dessous de -23 dB pendant toute la minute.
Un tel événement aurait coupé une liaison numérique à fort débit passant sur le faisceau.
Il arrive que des événements similaires surviennent pendant des nuits entières, surtout l'été.



FRACTION DU TEMPS OU L'AFFAIBLISSEMENT EST SUPERIEUR A L'ORDONNEE

Liaisons à 13 GHz: BLANC-MESNIL - MONTPARNASSE (15,4 km)
VELIZY - MONTPARNASSE (12 km)

DECEMBRE 1979 - OCTOBRE 1980

Figure 3 (III) : On étudie l'effet de la diversité de trajet en effectuant notamment des mesures du niveau reçu sur les liaisons du réseau en exploitation "Pharaon Urbain" dont le point nodal est à Montparnasse. L'enregistrement et le dépouillement des données sont respectivement sous la responsabilité des divisions E.T.R. et R.P.E.. A titre d'exemple on a représenté ci-dessus les distributions des affaiblissements dus à la pluie pour deux liaisons du réseau. L'affaiblissement en diversité est obtenu en prenant à chaque seconde la valeur la plus faible des deux affaiblissements mesurés. On constate que pour la période considérée l'emploi de la diversité aurait divisé par dix environ la fraction du temps où l'affaiblissement était compris entre 15 et 35 dB.

III.1.3 Projet d'étude de l'effet du filtre atmosphérique sur les transmissions numériques

Dans le but d'obtenir une méthode fiable de prévision de la dégradation de la qualité des liaisons numériques due à la réfraction atmosphérique en air clair, le CRPE s'est engagé dans un projet à moyen terme ($\simeq$ 1984) comportant deux actions :

a) modélisation de l'interaction couche limite/onde électromagnétique qui permettra la compréhension de l'influence du climat, du profil et de la longueur de la liaison ;

b) modélisation des fluctuations à petites échelles de temps de la déformation du filtre atmosphérique par des mesures statistiques qui permettra l'étude de la diversité d'espace, de fréquence et de polarisation.

Les premières expériences doivent commencer à la fin de l'année 1981.

III.2 INTERACTION ONDES E.M./HYDROMETEORES

On distinguera ici deux chapitres d'études, dont l'un est routinier (liaisons horizontales), et l'autre est en développement (liaisons obliques).

III.2.1 Liaisons horizontales

Les liaisons expérimentales sont sous la responsabilité du CRPE (Montpellier, Dijon, région parisienne). Les données sont présentées (dans une note technique à paraître) sous la forme de statistiques d'affaiblissement (figure 3).

III.2.2 Liaisons obliques

Les affaiblissements et les découplages de polarisations calculés à partir des méthodes de prévision sur les liaisons obliques ont été comparées aux résultats obtenus à Gometz-la-Ville sur le signal des satellites SIRIO 1 et OTS 2. A partir de ces résultats et de ceux publiés à l'étranger une méthode de calcul de l'affaiblissement dû à un radome mouillé a été mise au point pour des fréquences comprises entre 4 et 100 GHz.

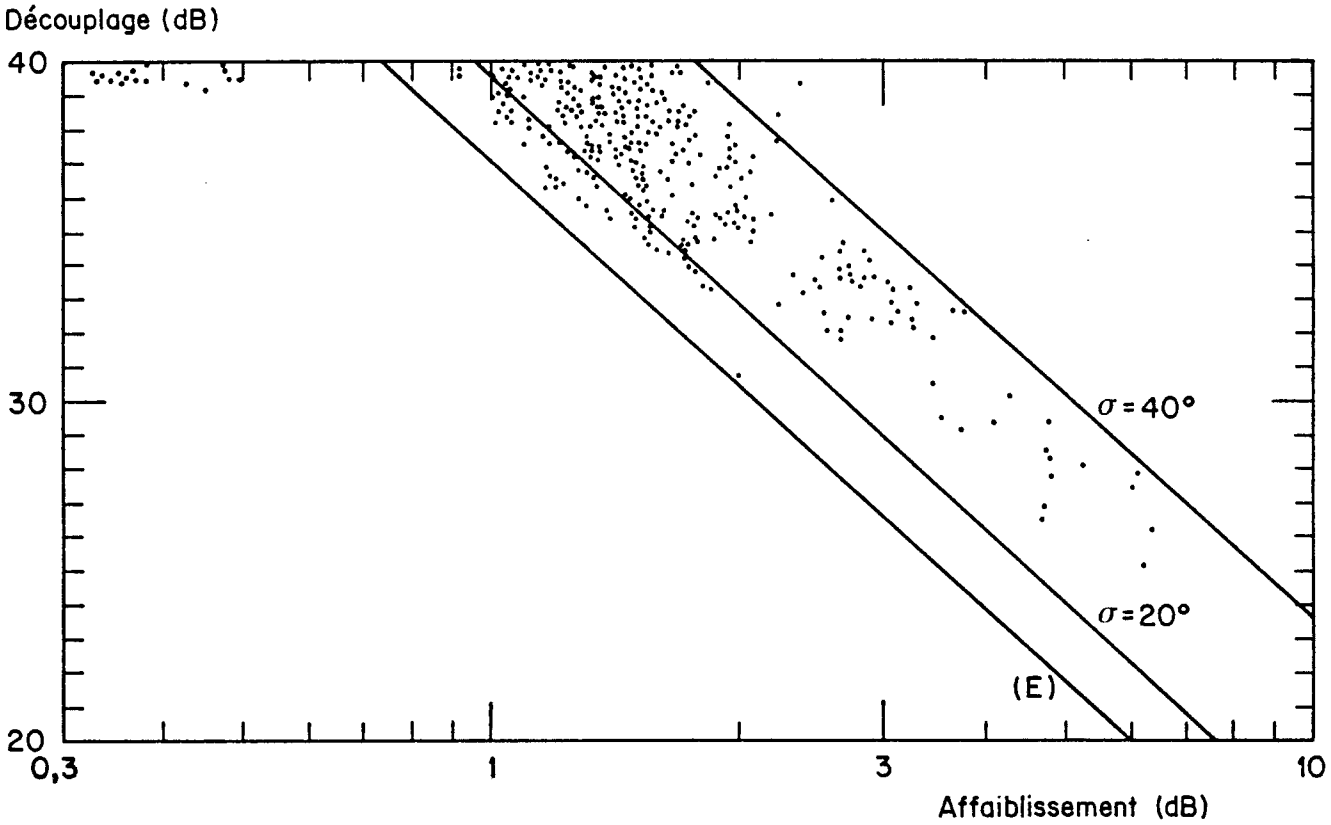


Figure 4 (III) : O.T.S. - Polarisation circulaire - 11,8 GHz
Diagramme découplage - affaiblissement. Evénement du 09/03/1979 (17 h 40 - 18 h 55).
Le signal provenant du satellite O.T.S. est enregistré à la station de Gometz-La-Ville gérée par la division E.T.R.. La division R.P.E. procède à l'analyse des données. On a représenté ci-dessus pour un événement de pluie le découplage de polarisations, qui est le rapport des niveaux des signaux reçus sur les polarisations directe et inverse, en fonction de l'affaiblissement du signal reçu sur la polarisation directe. Les points de mesure sont comparés aux résultats des calculs effectués en utilisant des modèles de gouttes (distribution des tailles de gouttes d'eau de Laws et Parsons, angle d'inclinaison gaussien d'écart type σ. La courbe E représente des gouttes équiorientées.

Une étude sur la relation entre la baisse de découplage de polarisation et les caractéristiques de la pluie a été commencée et se poursuivra au cours de l'année 81. (figure 4). Enfin, une première approche de la qualité des liaisons terre-satellite en réutilisation de fréquence sur deux polarisations orthogonales dans le cas de la transmission numérique a été tentée (125, 235).

L'année 1980 a vu l'achèvement de la thèse de 3ème cycle de P. Golé (513). Les principaux résultats obtenus sont les suivants :

a) mise au point d'un algorithme donnant l'atténuation due à la pluie sur un trajet oblique à partir des données du radar RONSARD (226, 227, 514) ;

b) étude des phénomènes de dépolarisation anormale due aux cristaux de glace :

- statistique sur les données d'ATS 6,
- mise au point d'un modèle de prévision (figure 5),
- étude de la dégradation d'un système de transmission numérique (figure 6).

L'expérience entreprise en 1979 sur l'effet des champs électriques atmosphériques doit reprendre en 1981 à la station de Bercenay en Othe.

III.3 BALISE 20 - 30 - 40 - 90 GHz

Au cours de l'année 80, les chercheurs du CRPE et les équipes de la division ETR concernées ont achevé le travail de préparation du projet de balise 20 - 30 - 40 - 90 GHz (523). La date prévue du lancement est l'année 84. Les objectifs scientifiques sont maintenant bien définis ; l'expérience permettra :

A 20 - 30 GHz : - d'établir des statistiques d'affaiblissement, de découplage de polarisation et de déphasage ;

- d'étudier les corrélations entre affaiblissement, découplage de polarisation et déphasage ;

- d'évaluer le gain en diversité d'emplacement ;

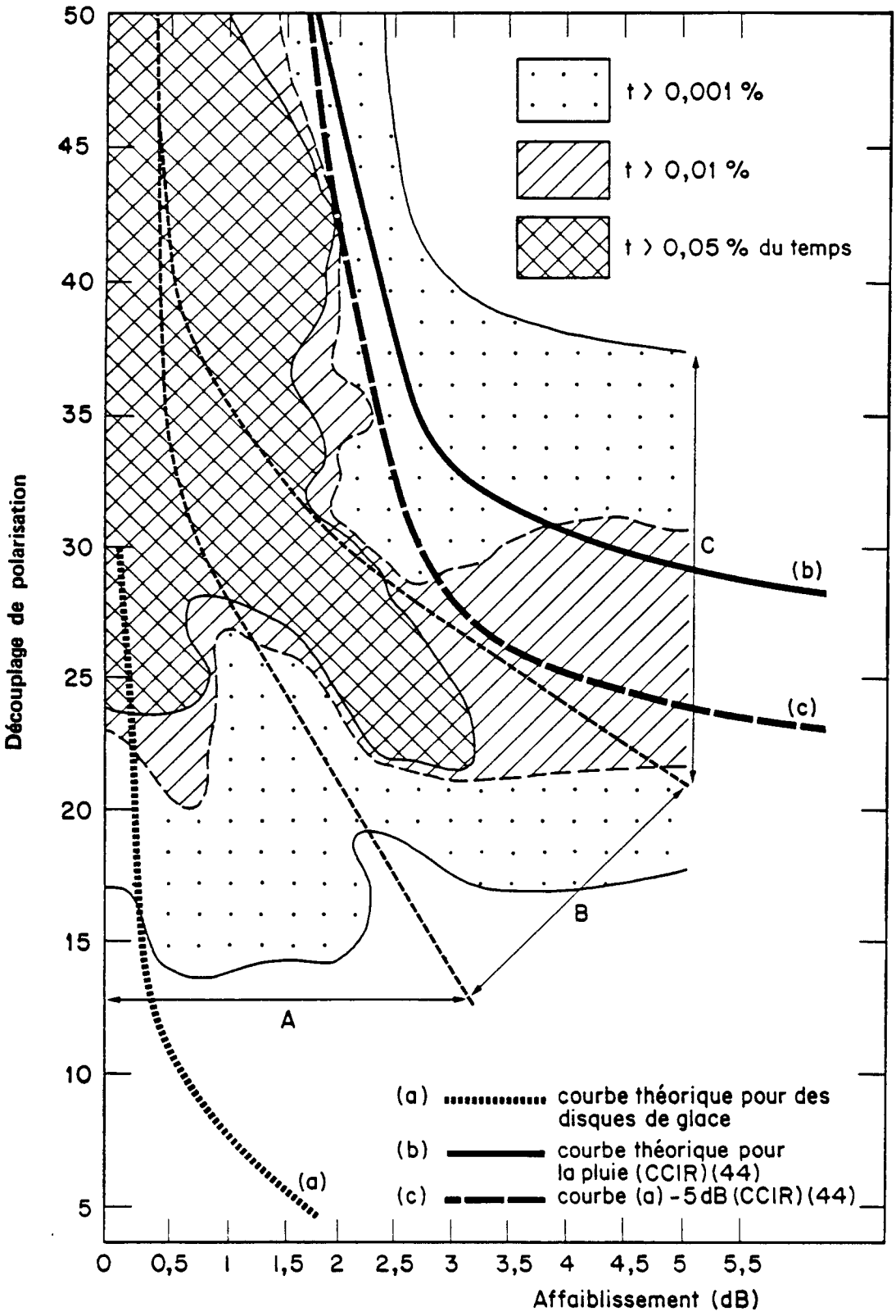


Figure 5 (III) : Ce diagramme fait apparaître schématiquement trois zones A, B, C où, pour des pourcentages de temps supérieurs à 0,001 %, 0,01 % et 0,05 %, l'affaiblissement et le découplage de polarisation prennent chacun une valeur donnée.
Les zones A et B correspondent respectivement à la dépolarisation par la glace et par la pluie, et la zone B est une zone intermédiaire où les deux phénomènes sont combinés. A titre de comparaison on a aussi représenté sur cette figure les courbes théoriques (a), (b) et (c).
La courbe (a) qui se trouve dans le domaine A a été calculée en utilisant le modèle proposé par P. GOLE et en l'appliquant au cas de disques de glace équiorientés, contenus dans le plan horizontal. On constate qu'elle rend bien compte de la dépolarisation par la glace.

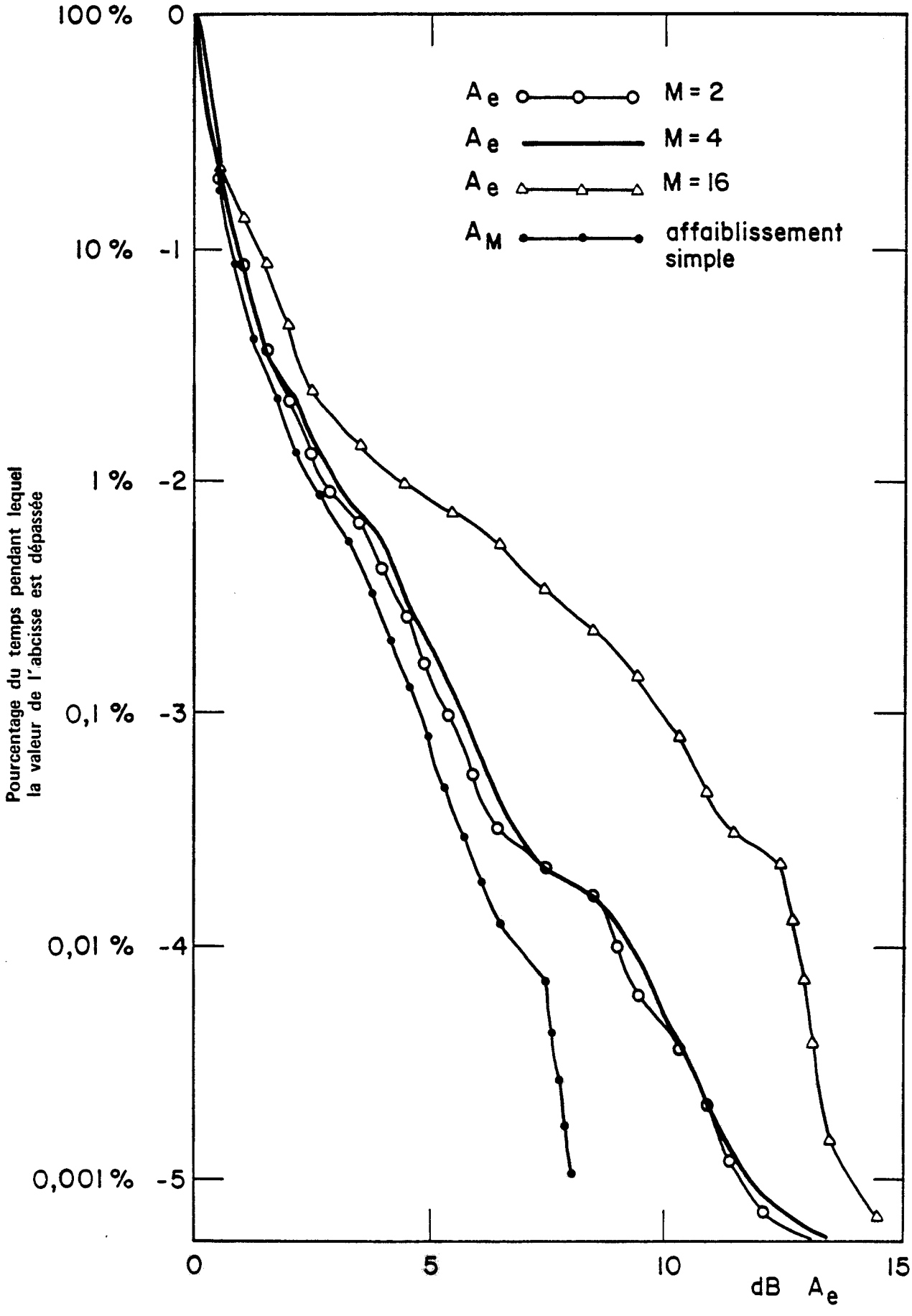


Figure 6 (III) : ATS 6 - 306 heures 20 mn 34 s (1975-1976)

Distribution des affaiblissements équivalents pour des systèmes de modulation à 2, 4 et 16 états de phase.

- d'établir une carte radioclimatique de la France ;

- de mesurer les atténuations différentielles et les déphasages différentiels dans une bande de 1 GHz de largeur ;

- d'étudier les phénomènes de scintillation ;

- d'établir des statistiques de dépolarisation sans atténuation ;

- de déterminer complètement la matrice de transfert de l'atmosphère.

A 40 et 90 GHz : - d'établir des statistiques d'affaiblissement ;

- d'étudier les effets de la diffusion multiple ;

- de vérifier la validité des modèles de prévision existants ou d'en proposer de nouveaux.

Enfin, le fait de disposer d'une balise émettant dans quatre bandes de fréquences distinctes permettra d'étudier les lois de similitude en fréquence pour les divers phénomènes considérés.

IV. ETUDE DE L'ATMOSPHERE MOYENNE : PHYSICO-CHIMIE ET DYNAMIQUE

L'atmosphère moyenne (stratosphère et mésosphère) est sans doute la région de l'atmosphère actuellement la plus mal connue. Déjà trop éloignée du sol pour que les mesures in situ y soient aisées, elle offre par ailleurs moins de prise aux mesures à distance, par moyens optiques et radioélectriques, que la thermosphère et l'ionosphère. La méconnaissance du fonctionnement dynamique et photochimique de l'atmosphère moyenne, et en particulier de son couplage avec la troposphère, rend impossible une évaluation sérieuse de l'impact de l'activité humaine dans cette région. En retour, il est actuellement impossible de comprendre la répercussion de ces modifications anthropogéniques sur l'évolution des climats.

C'est pourquoi un programme international d'étude de l'atmosphère moyenne (MAP) est en cours d'élaboration, programme auquel le CNRS a décidé de participer. L'examen des compétences et des intérêts spécifiques de la communauté française a permis de retenir les thèmes suivants :

a) la modélisation des échanges verticaux d'impulsion et d'énergie dans l'atmosphère moyenne

Il s'agit essentiellement d'étudier la génération des ondes atmosphériques, leur transmission dans le milieu, leur dissipation, sur l'ensemble du spectre (des ondes planétaires à la turbulence) ;

b) l'étude expérimentale et théorique de la variabilité spatiale et temporelle des composants minoritaires de l'atmosphère

Il s'agit, dans le but ultime de modéliser et prévoir l'évolution à long terme de la couche d'ozone, et les effets de l'activité humaine sur cette couche, de mesurer simultanément tous les constituants d'une famille chimiquement liée ;

c) l'étude de la formation des agrégats et de leur rôle dans l'atmosphère moyenne

Il s'agit ici de la photo-chimie des ions et agrégats, essentiellement au niveau de la mésosphère.

Le département HMA du CRPE a déjà depuis de nombreuses années acquis, avec les radars météoriques, une compétence aussi bien théorique qu'expérimentale dans l'étude de la dynamique de la mésosphère. L'année 1980 marque la fin de l'engagement des chercheurs de HMA dans l'acquisition des données de ces radars. Le savoir-faire et les connaissances théoriques acquises vont naturellement trouver leur emploi dans le développement de moyens nouveaux d'investigation : la diffusion incohérente dans la mésosphère (avec EISCAT et Saint-Santin), qui donnera accès à la chimie et à la dynamique de la région 60-80 kilomètres, et l'utilisation de radars cohérents dans la stratosphère, dont le développement fait actuellement l'objet d'une étude de faisabilité.

IV.1 DYNAMIQUE DE LA HAUTE MESOSPHERE : ETUDES PAR RADARS METEORIQUES

L'utilisation du radar météorique à 2 émetteurs s'est poursuivie en 1980 avec 6 campagnes d'enregistrements d'une durée moyenne de 10 jours. Avec cette série d'expériences s'achève définitivement l'exploitation de cet instrument. On dispose maintenant d'un ensemble complet de mesures à toutes les époques de l'année qui vont permettre la description affinée des mouvements de petite échelle (222).

Les expériences ont été coordonnées avec :

- des mesures optiques de l'émission nocturne de l'oxygène atomique à 557.7 nm. (223) réalisées dans la même zone d'observation avec le photomètre installé à Saint-Santin par M. Petitdidier (dans le cadre de la RCP 545) ;

- des mesures de vent en stratosphère et mésosphère effectuées à partir du radar cohérent de SOUSY (RFA) par J. Rottger. L'objectif de ces mesures est de valider les données de vent obtenues par le radar de SOUSY à partir des échos météoriques qu'il reçoit (traités jusqu'ici comme des parasites) ;

- la campagne européenne "Energy Budget" qui a regroupé sous la responsabilité de D. Offerman une somme de moyens au sol ou en vol (ballons, fusées) considérable en novembre 1980.

Dans le même temps, l'exploitation des données du radar météorique du CNET implanté à Porto Rico et qui fonctionne sous la responsabilité du Pr. Roper s'est

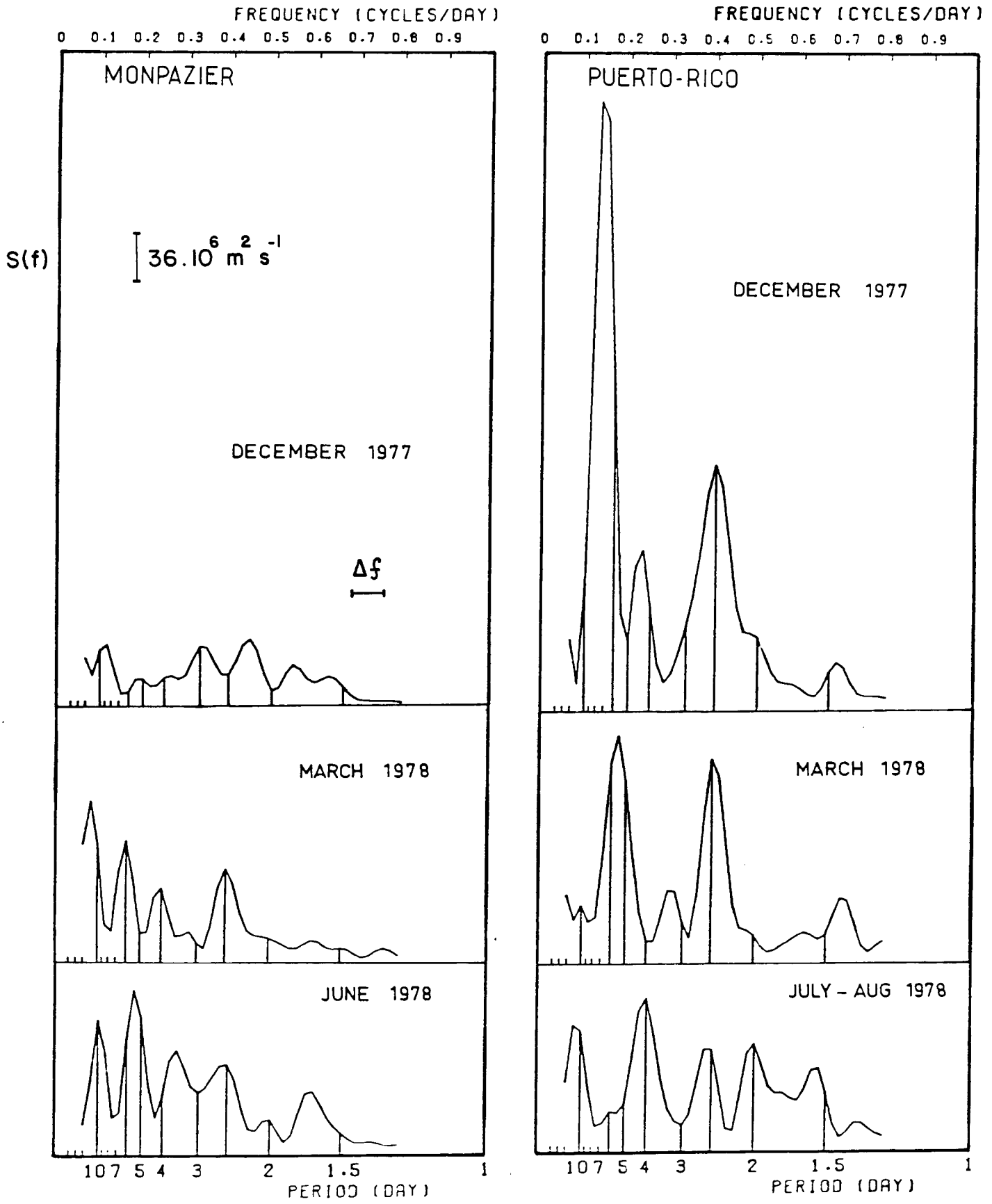


Figure 1 (IV) : Spectres de puissance du vent zonal, moyennés sur toute la zone d'altitudes météoriques, pour trois des campagnes de mesures qui ont eu lieu à Monpazier (44°N) et Porto Rico (18°N) en 1977-1978. S(f) représente la définition spectrale.

poursuivie avec, en particulier, le traitement d'une série de mesures effectuées en août 1980, coordonnées avec une expérience de mesure des vents mésosphériques à partir du sondeur d'Arecibo par une équipe dirigée par le Pr. S. Kato. La station a été visitée en juillet 1980 par J.L. Fellous qui s'est assuré de la maintenance excellente de l'appareillage. Toutes ces expériences coordonnées ont fourni des résultats intéressants et pour chacune d'elles, des publications conjointes sont envisagées.

L'analyse des données acquises simultanément à basses et moyennes latitudes (Monpazier, 45°N ; Porto Rico, 18°N) a permis de mettre en évidence les variations latitudinales des mouvements organisés de différentes échelles : ondes planétaires, marées, ondes de gravité. Les figures 1, 2, 3 présentent quelques-uns des résultats les plus marquants. Des ondes planétaires de périodes 6 jours et 60 heures ont pu être mises en évidence simultanément dans les deux stations en mars 1978 (figure 1) et on a pu apprécier la variation de leur amplitude en fonction de la latitude (247). L'observation des marées (figure 2) a montré une bonne concordance entre les variations latitudinales observées et celles que prédit le modèle théorique de R. Bernard, sauf en ce qui concerne la phase de la marée semi-diurne (205). Enfin, on a pu montrer que le spectre d'énergie des ondes de périodes de deux à huit heures ne varie pas d'une manière significative en fonction de la latitude (225).

IV.2 PHOTOCHIMIE DE LA MESOSPHERE : ETUDES PAR DIFFUSION INCOHERENTE

On sait que la région 60-80 km d'altitude est une zone de transition importante dans l'atmosphère. Au-dessus, la neutralité globale du milieu ionisé est assurée par l'existence des ions positifs et des électrons ; au-dessous, l'électroneutralité de l'atmosphère n'existe que par la présence d'ions négatifs. Ce sont ces derniers qui prennent le relais des électrons pour assurer une continuité électrique du sol à l'ionosphère, continuité dont l'importance (relations Soleil-Terre, variations climatiques) commence seulement à être soupçonnée. Les ions négatifs sont formés à partir de chaînes de réaction photochimiques complexes qui sont étudiées en laboratoire (notamment au CRPE). Cependant un grand nombre d'inconnues demeurent quant au comportement réel de ces variations dans la mésosphère et la stratosphère (conditions de pression, variations en température, rôle de la dynamique, etc.).

L'action de l'équipe "atmosphère moyenne" sur ce thème s'est développée dans deux directions, en collaboration avec le C.E.P.H.A.G. (Grenoble) et l'Institut d'Aéronomie (Bruxelles) :

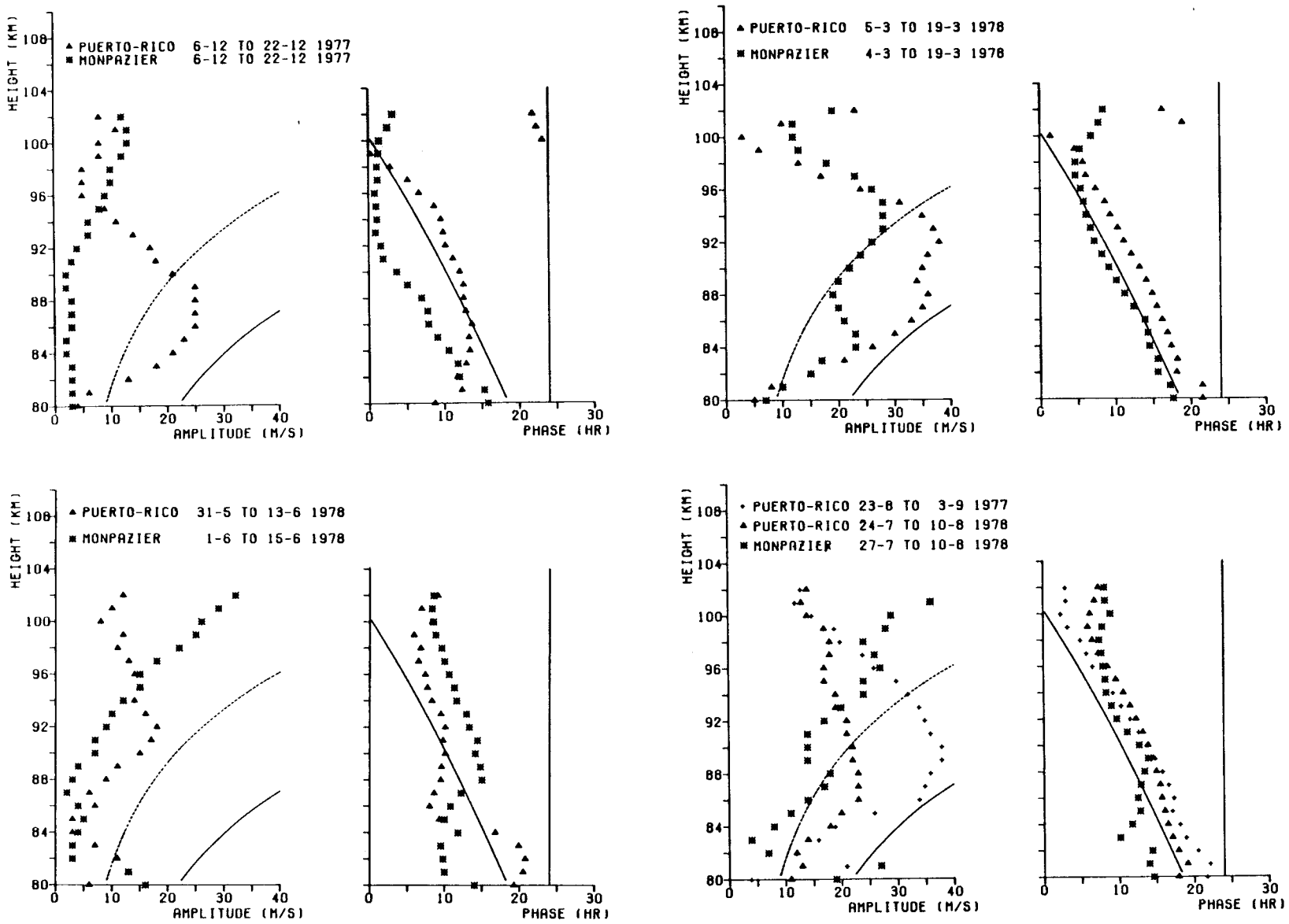


Figure 2 (IV) : Comparaison des paramètres de la marée semi-diurne à Porto Rico (triangles) et Monpazier (étoiles) au cours de 5 campagnes de mesures. L'amplitude et la phase de l'oscillation semi-diurne du vent zonal sont indiquées (la phase représente l'heure locale du maximum de vent vers l'est). Un modèle théorique utilisant les modes S_2^2, S_2^3, S_2^4 et S_2^5 est aussi représenté (trait continu pour 18°N et tireté pour 45°N).

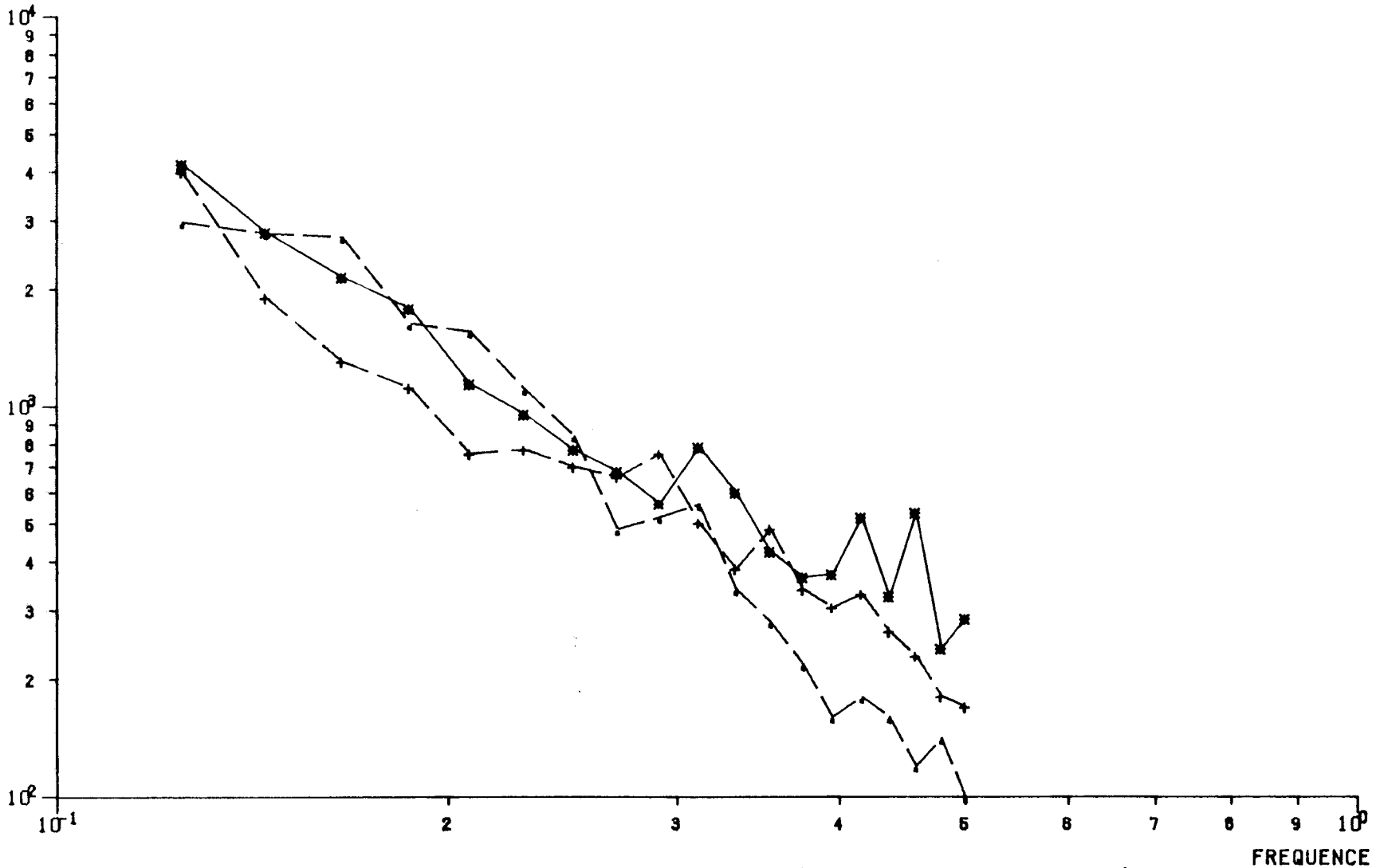


Figure 3 (IV) : Variations moyennes du spectre d'énergie en fonction de la fréquence pour trois campagnes de mesures effectuées en été à Monpazier du 2 au 14/06/1978 ; à Porto Rico du 25/07/1978 au 09/08/1978 ; à Kiruna du 11 au 20/08/1974.

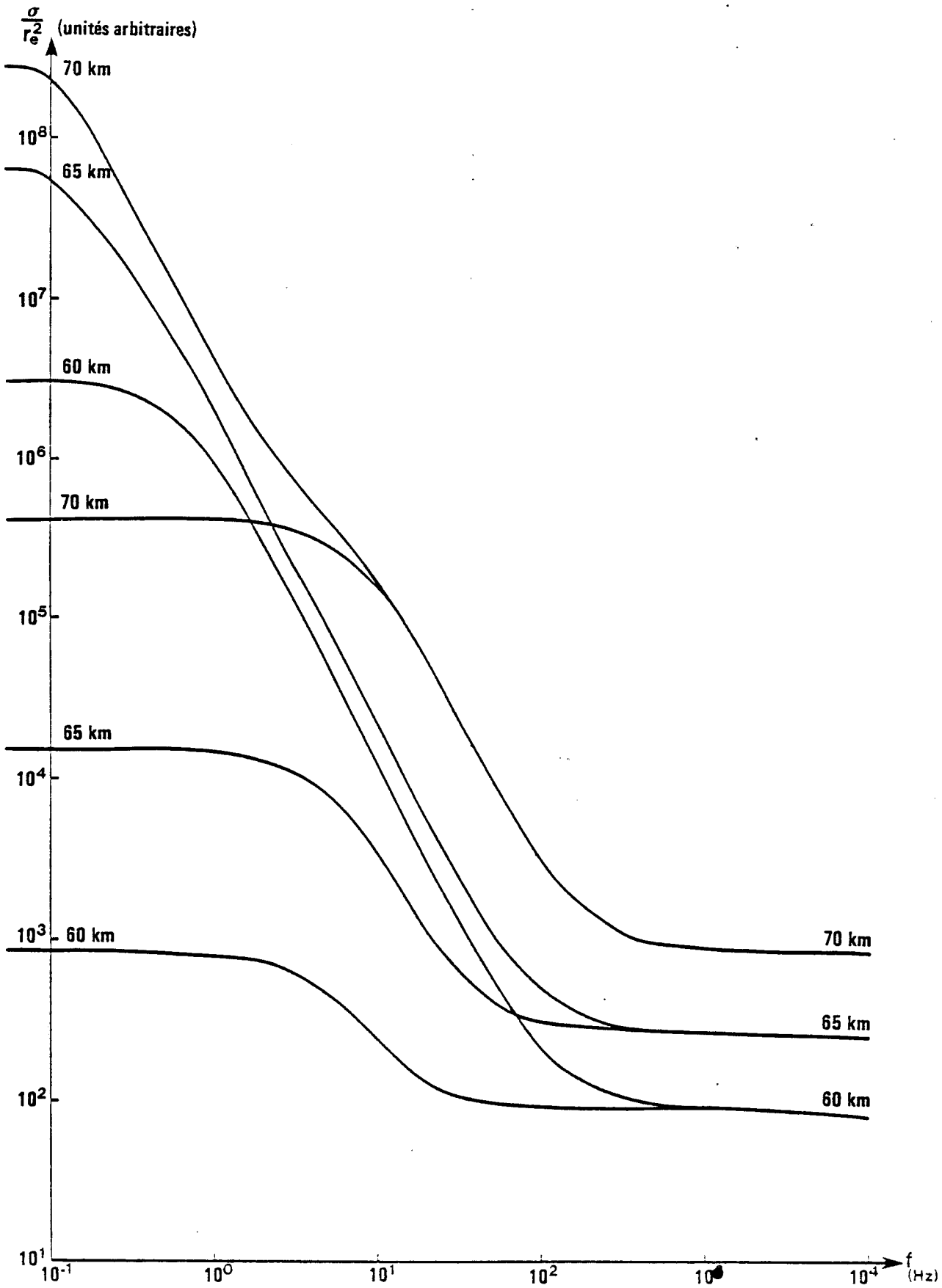


Figure 4 (IV) : Spectres de Diffusion Incohérente aux altitudes : 60, 65, 70 km
a) —·—· selon la théorie classique (Kofman - Fukuyama)
b) ——— avec prise en compte des fluctuations chimiques (Kockarts - Wisemberg - Crémieu).
On constate dans le domaine des basses fréquences une amplification du signal rétrodiffusé.

- étude théorique de la photochimie mésosphérique dans le but de mener à bien une physique de la mesure qui prenne en compte tous les phénomènes gouvernant la diffusion incohérente dans cette région ;

- développement de techniques expérimentales plus sophistiquées pour permettre une détection correcte des spectres de diffusion incohérente dans la mésosphère.

IV.2.1 Etudes théoriques

La prise en compte des ions négatifs dans la théorie de la diffusion incohérente (voir Note Technique CRPE n° 58) par K. Fukuyama a été une étape importante dans la compréhension de la physique de la mesure. Cependant, la puissance des spectres expérimentaux obtenus (avec le sondeur d'Arecibo par exemple) est d'environ deux ordres de grandeur supérieure à celle prévue par cette théorie. A l'évidence celle-ci n'est pas satisfaisante. Une collaboration développée avec M. Kockarts (conseiller scientifique du CNET) et M. Wissenberg (Institut d'Aéronomie de Bruxelles) a pour but d'approfondir la physique de la mesure. Ils ont pu montrer, en faisant une simulation numérique du comportement de la région D de l'ionosphère, que certains types de fluctuations qui n'étaient pas pris en compte dans la théorie classique de diffusion incohérente pouvaient devenir prédominants dans la région où les ions négatifs avaient une concentration importante par rapport à celle des électrons. A partir de cette constatation inédite, une refonte complète de la théorie de la diffusion incohérente dans la basse mésosphère a été faite par G. Kockarts et J. Wissenberg. Les spectres théoriques semblent être cette fois-ci en assez bon accord avec les quelques spectres expérimentaux obtenus.

A. Cremieu a montré qu'il est possible, moyennant quelques hypothèses vérifiables, de définir une formule analytique simple du spectre ionique valable dans la région 60-80 km. Ce résultat est important, car il permet de mesurer la densité électronique et la densité d'ions négatifs dans cette région à partir de la forme et de la puissance du spectre mesuré.

La figure 4 montre l'allure des spectres de diffusion incohérente obtenus dans la région 60-70 kilomètres. La comparaison avec les spectres obtenus à partir de la théorie de Fukuyama et Kofman fait apparaître un accroissement important de la puissance diffusée aux très basses fréquences.

IV.2.2 Techniques expérimentales

L'effort expérimental se développe autour de deux instruments :

- le sondeur à diffusion incohérente du CNET,
- le sondeur auroral EISCAT.

a) Sondeur CNET

Les difficultés à résoudre pour mesurer correctement les spectres mésosphériques ont fait l'objet d'un Document de Travail (CRPE/1038, 1977). Un projet d'étude allant dans ce sens a été déposé en septembre 1979. Il n'a finalement pas été retenu.

Par contre, une demande faite à l'INAG d'achat d'horloges atomiques (matériel de base de la transformation nécessaire du système émission-réception), a été agréée. La transformation du sondeur est réalisée sous la direction de M. F. Baudin.

A titre transitoire, une modification provisoire permettant un fonctionnement en pseudo-impulsions de l'émetteur a été mise en place et testée entre mars et juin 1980. A la suite des résultats positifs des tests, une première expérience a été faite en juillet 1980. Le dépouillement des résultats obtenus pendant cette journée a permis de mettre pour la première fois en évidence l'existence de spectre de diffusion incohérente entre 60 et 64 km d'altitude.

b) Sondeur auroral EISCAT

Le sondeur EISCAT commencera à fonctionner fin 1981. L'équipe "Moyenne Atmosphère" du CRPE prépare activement les expériences de mesure de diffusion incohérente dans la mésosphère aurorale :

- apprentissage détaillé du fonctionnement d'EISCAT ;

- définition précise du schéma d'expérience avec le sondeur EISCAT. Les schémas classiques ne sont pas utilisables, il a fallu en définir d'autres ;

- un accord avec les partenaires Anglais, Suédois et Norvégiens permettant de dégager du temps d'antenne pour tester ce schéma d'expérience a été réalisé en mai 1980 ;

- le logiciel de base (programmation du corrélateur et du radar contrôleur) a été écrit et testé sur place à Tromsö par W. Kofman.

IV.3 DYNAMIQUE DE LA STRATOSPHERE : ETUDES PAR RADAR COHERENT

Un avant-projet d'étude de radar cohérent a été soumis à l'INAG en septembre 1980. L'étude de faisabilité s'appuiera sur :

- des résultats d'analyse in situ de la turbulence stratosphérique par ballon, dans le cadre de la RCP 545, qui doivent permettre d'estimer théoriquement la puissance de l'écho en fonction de la fréquence du radar ;

- des comparaisons de mesures in situ en ballon avec celles de radars cohérents déjà existants. Cette action nécessite l'organisation de campagnes de mesures à Arecibo (Porto-Rico) et à Lindau (R.F.A.) dans le cadre de la RCP 545.

V. CHIMIE ATMOSPHERIQUE ET ASTROCHIMIE

Un premier thème concerne la cinétique des réactions entre ions et molécules intervenant dans la partie supérieure ($\geqslant$ 50 km) de la moyenne atmosphère (10 - 100 km). Au-dessus de la mésopause (85 km) les ions observés sont NO^+ et O_2^+, au-dessous de cette altitude NO^+ et O_2^+ se transforment en ions agrégats $H^+(H_2O)_n$. La transformation est liée à la basse température de la mésopause (120 - 200 K), mais elle n'est pas comprise quantitativement. Le laboratoire étudie les réactions en question en écoulement supersonique, qui constitue notre réacteur à basse température.

En 1979 nous avions obtenu des résultats cinétiques pour les réactions :

$$H^+(H_2O)_5 + H_2O + M \longrightarrow H^+(H_2O)_6 + M$$

M étant N_2 ou O_2. D'habitude, ce type de réaction (réaction d'agrégation) est cinétiquement de troisième ou de deuxième ordre, c'est-à-dire, proportionnel à P^1 ou à P^0 (P = pression). Curieusement, nous avions trouvé qu'entre 120 et 180 K, la cinétique est proportionnelle à $P^{-1,7}$! Ces résultats indiquaient que la croissance des ions $H^+(H_2O)_n$ est beaucoup plus complexe qu'on ne l'avait soupçonné, ou bien que la dynamique de l'écoulement supersonique n'était toujours pas comprise.

En 1980, nous avons étudié l'agrégation de NO^+ avec N_2, O_2 et NO (210, 211, 406). Maintenant nous sommes sûrs que nos résultats inattendus sont dus aux conditions de basse température et non pas à l'incompréhension de la dynamique de l'écoulement. La cinétique des quatre réactions :

$$NO^+ + N_2 + N_2 \longrightarrow NO^+(N_2) + N_2$$
$$NO^+ + O_2 + O_2 \longrightarrow NO^+(O_2) + O_2$$
$$NO^+ + NO + N_2 \longrightarrow NO^+(NO) + N_2$$
$$NO^+ + NO + O_2 \longrightarrow NO^+(NO) + O2$$

est effectivement de troisième ordre. Seulement, d'habitude une réaction d'agrégation accélère sensiblement quand on diminue la température (T) : sa constante cinétique est proportionnelle à T^{-s} (pour la formation d'agrégats à quatre atomes, s est de l'ordre de 5). Or, ce comportement est observé pour les deux dernières réactions (formation de

$NO^+(NO)$), mais les réactions de formation de $NO^+(N_2)$ et de $NO^+(O_2)$ sont indépendantes de la température entre 120 et 180 K. Il devient clair que les modèles pour la cinétique d'agrégation, établis à partir de données obtenues à haute température (surtout vers 300 K), ne sont pas valables à basse température.

Un deuxième thème concerne la cinétique des réactions entre ions et molécules ayant un intérêt astrochimique. L'ion NH_2^+ joue un rôle important dans la chimie des molécules interstellaires, et en 1980 la réaction de NH_2^+ avec CH_3OH a été étudiée dans un tube à dérive à introduction sélective, dans un domaine d'énergie des ions compris entre 0,04 et 0,7 eV (264, 535).

L'étude de la réaction $NH_2^+ + CH_3OH$ a permis de proposer un mécanisme réactionnel complet. La cinétique des différentes réactions primaires produit simultanément les ions NH_3^+ par transfert d'un atome d'hydrogène, $CH_3OH_2^+$ par transfert de proton, et, d'une façon inattendue, NH_4^+ par transfert d'une molécule d'hydrogène dans une réaction du troisième ordre. La cinétique des réactions secondaires met en jeu les ions produits dans la première étape et l'excès de CH_3OH dans le milieu. D'une part, on forme les agrégats $H^+(CH_3OH)_n$, et d'autre part on forme l'éther méthylique protoné $(CH_3)_2OH^+$ et solvaté par le méthanol $H^+((CH_3)_2O)(CH_3OH)_n$.

Le troisième thème concerne la composition de l'atmosphère de Vénus. Les résultats obtenus en décembre 1978 par les sondes Pionnier Vénus et Venera 11 et 12 continuent d'être étudiés. Les implications de la présence des agrégats $CO_2(H_2O)$ et $(CO_2)_2$ sont évaluées. La proposition d'analyser la phase condensée de l'atmosphère de Vénus par un spectromètre de masse embarqué sur une sonde d'entrée constitue une nouvelle étude pour le laboratoire.

VI. ELECTRODYNAMIQUE DE L'ATMOSPHERE IONISEE

Des études partielles sur les phénomènes de transport des différentes classes de plasmas qui peuplent la cavité magnétosphérique, un langage unitaire tend progressivement à émerger : celui de l'électrodynamique. L'environnement ionisé peut être en effet décrit globalement comme un seul circuit électrique dans lequel tous les générateurs et éléments conducteurs sont interconnectés (106). Les éléments conducteurs sont essentiellement les lignes de force magnétiques et la couche E ionosphérique. Les générateurs peuvent être séparés en deux classes :

1) la dynamo vent solaire/magnétosphère, qui par l'effet du mouvement relatif des deux plasmas magnétisés que sont le vent solaire et le plasma magnétosphérique, produit une force électromotrice d'une centaine de kilovolts à travers la cavité magnétosphérique. Ses fluctuations temporelles commandent en grande partie l'histoire de l'activité magnétique dans la cavité.

2) la dynamo ionosphérique, qui engendre en tout point de l'ionosphère des champs et courants électriques induits par les mouvements de l'air neutre à travers les lignes de force géomagnétiques. Son fonctionnement sous l'effet des marées atmosphériques est responsable des variations régulières du mouvement du plasma ionosphérique.

Les expériences mises en oeuvre par le CRPE permettent d'étudier le fonctionnement de ces deux dynamos. Elles visent à échantillonner toutes les régions-clés du circuit magnétosphérique :

- le vent solaire, avec ISEE-3,

- la magnétopause et les régions frontières de la magnétosphère, avec ISEE-1 et 2.

- l'ionosphère aurorale, avec le sondeur à diffusion auroral EISCAT (103) et le satellite polaire ARCAD-3,

- la magnétosphère externe dans ses régions dipolaires, avec le satellite géostationnaire GEOS-2,

- enfin l'ionosphère de moyennes latitudes, avec le sondeur à diffusion de Saint-Santin de Maurs.

Alors que les efforts en électrodynamique au CRPE s'étaient, dans les dernières années, centrés sur l'ionosphère des moyennes latitudes et sur la dynamo ionosphérique, ils se portent maintenant progressivement sur l'étude des processus de couplage ionosphère-magnétosphère que met en jeu le fonctionnement de la dynamo vent solaire/magnétosphère, et dont l'ionosphère aurorale et la magnétosphère externe sont les théâtres privilégiés.

VI.1 LA DYNAMO IONOSPHERIQUE : VARIATIONS REGULIERES EN BASSES ET MOYENNES LATITUDES

Les variations régulières de chaque paramètre électrodynamique de l'ionosphère (vents neutres, champs, courants et conductivités électriques) ont été étudiées au moyen du sondeur à diffusion de Saint-Santin. La démarche suivie vise à modéliser localement d'abord, puis à l'échelle planétaire, chacun de ces paramètres, pour construire par étapes un modèle expérimental global de l'électrodynamique de l'ionosphère calme. Le problème de la modélisation de la composition neutre, et de ses variations avec les saisons et l'activité magnétique, a fait l'objet d'un travail de synthèse (203). Ce modèle devra être physique, c'est-à-dire vérifier les lois de la circulation des courants dans le milieu.

A l'occasion de ce travail, un programme numérique d'interprétation de données de diffusion incohérente en termes de paramètres électrodynamiques a été constitué. Il est maintenant implanté dans la chaîne d'analyse des données du sondeur auroral EISCAT (301).

VI.1.1 Champ électrique en région F

Un modèle global, saisonnier du potentiel électrostatique ionosphérique à basses et moyennes latitudes, fondé sur l'ensemble des données des sondeurs à diffusion, a été élaboré et publié (144). Ce modèle donnant un niveau de référence pour le champ électrique par temps calme permettra d'étudier les perturbations de façon systématique. Il va également être utilisé dans le programme de résolution des équations de transport tridimensionnelles du plasma ionosphérique en cours de développement.

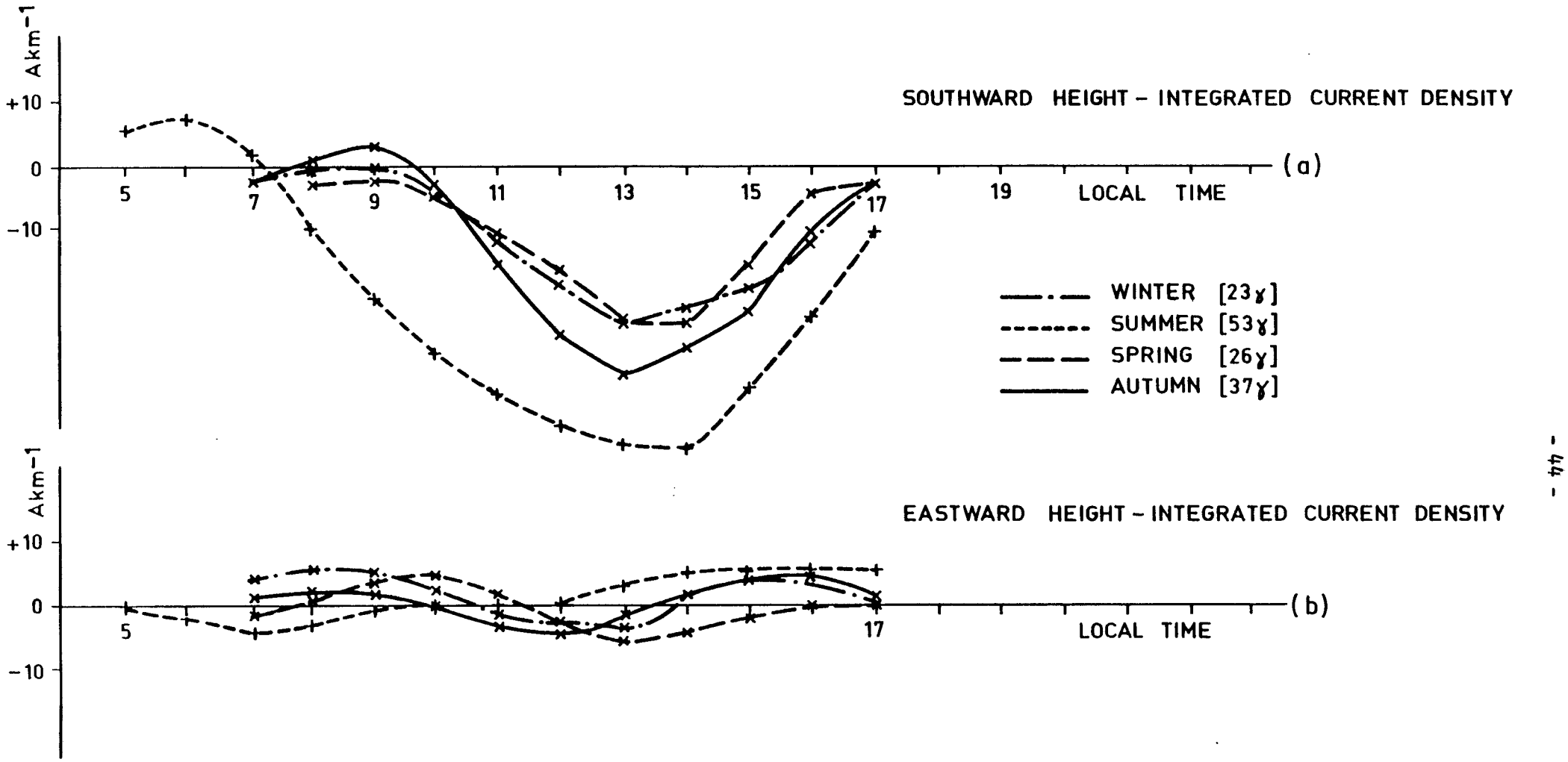


Figure 1 (VI) : Variations diurnes des composantes sud et est du courant ionosphérique (intégré en altitude) circulant au-dessus de Saint-Santin pendant les périodes de calme magnétique, et pour les quatre saisons. Ce modèle moyen a été déduit des modèles empiriques locaux de champs et conductivités électriques et des vents neutres par application de la loi d'Ohm ionosphérique. On constate que le courant est pratiquement toujours dirigé vers le nord.

La modélisation du champ calme est un des aspects du travail rapporté dans la Thèse d'Etat de M. Blanc (403).

VI.1.2 Champ électrique et fréquences de collision en région E

Les mesures de vitesses de dérive tridimensionnelles des ions de la région E ont été utilisées pour calculer directement, par résolution de l'équation de mouvement des ions, le champ électrique nord-sud et la fréquence de collision ions-neutres à chaque altitude de mesure. On a montré expérimentalement que le champ électrique est constant en fonction de l'altitude dans l'ionosphère des latitudes moyennes et par conséquent que les lignes de force sont équipotentielles. Cette confirmation expérimentale d'une assertion théorique qui date d'une dizaine d'années environ est importante pour toutes les études du courant électrique et de la conductivité basées sur les données du sondeur à diffusion de Saint-Santin. A partir des mêmes équations de l'électrodynamique dans la région dynamo on a déduit des ordres de grandeur de la fréquence de collision ions-neutres par transfert du moment en accord avec celles déduites à partir d'un modèle d'atmosphère neutre et des sections efficaces de collision de Stubb. Ce travail a été présenté au colloque de l'European Geophysical Society à Budapest en Août 1980 (263) et un article a été soumis au J.G.R. (531).

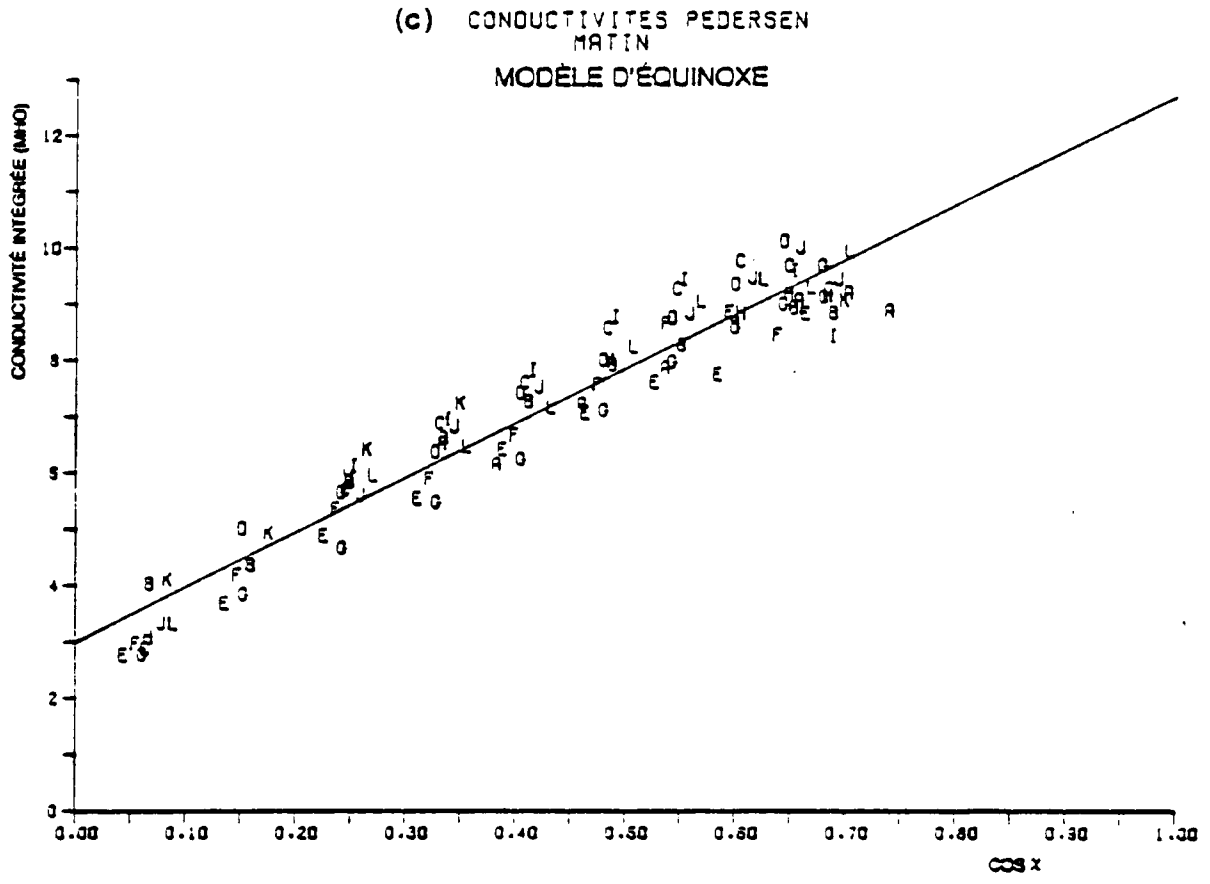
VI.1.3 Courants électriques en région E

L'étude des courants électriques de moyennes latitudes a été abordée de deux manières :

a) Par une modélisation empirique de leur variation régulière

En utilisant les modèles expérimentaux de champs électriques, vents neutres, et conductivités, précédemment élaborés à partir des mesures à Saint-Santin, on peut calculer pour chaque saison et chaque heure locale la densité de courant par simple application de la loi d'Ohm ionosphérique.

Cette démarche permet d'accéder indépendamment aux différentes composantes du courant (composantes Hall et Pedersen, composantes engendrées par les vents neutres et par le champ électrique) et ainsi de mieux comprendre la circulation régulière du courant total. Elle a abouti à un modèle saisonnier du courant électrique des jours calmes (figure 1). La composante est-ouest de ce courant est faible à toutes les heures du jour, comme on s'y attend au voisinage de la latitude du foyer du vortex



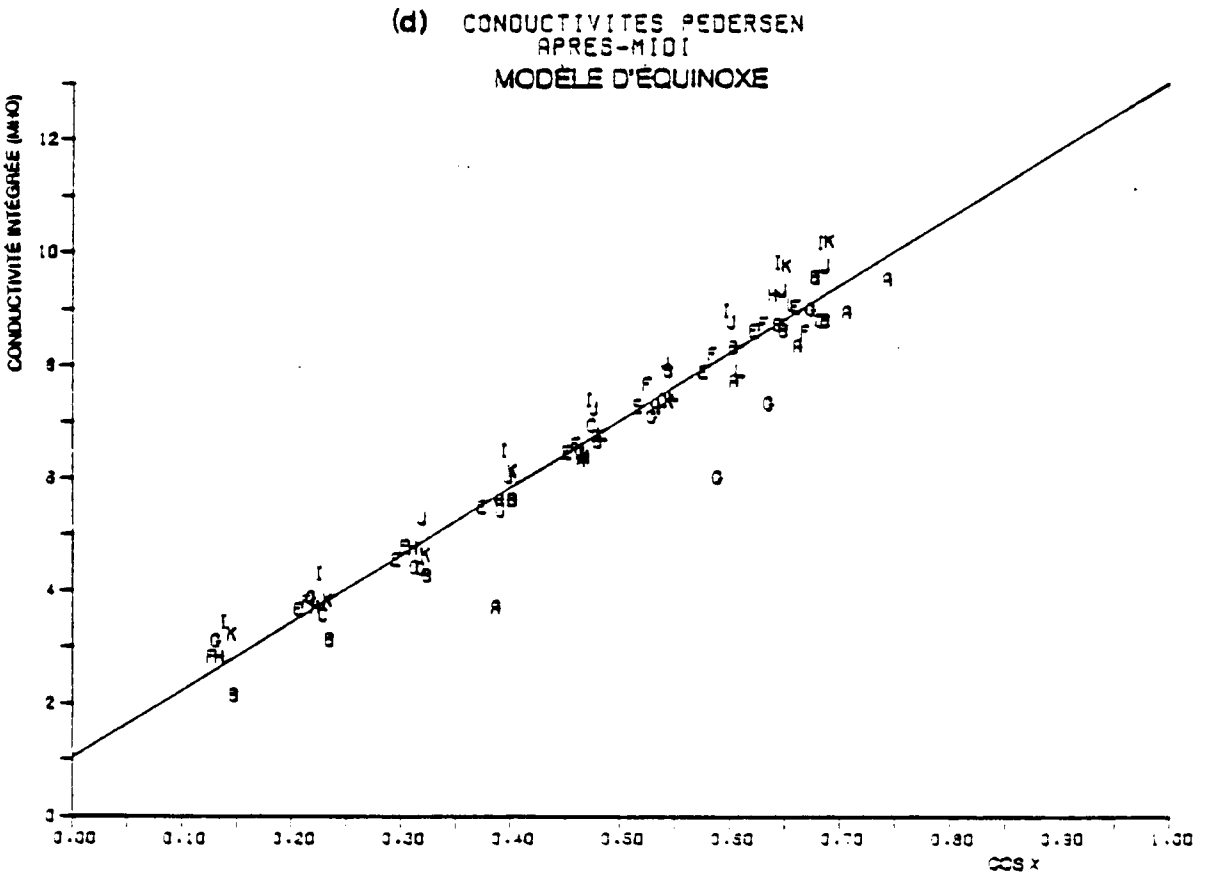


Figure 2 (VI) : Le tracé superposé des différentes mesures de la conductivité de Pedersen à Saint-Santin en fonction du cosinus de l'angle zénithal solaire fait apparaître une dépendance linéaire par rapport à ce paramètre. On voit également que les conductivités sont, pour un même angle, plus fortes le matin que l'après-midi. Ce phénomène est interprété comme un effet de la variation diurne de la concentration

de courants Sq. En revanche le courant nord-sud semble dirigé vers le nord en toutes saisons à presque tous les temps locaux de jour. Ce résultat (204, 248) remet en cause, au moins pour le secteur de longitude de Saint-Santin, l'image usuelle simple d'un vortex de courants se refermant sur chaque hémisphère, qui impliquerait des courants orientés vers le sud le matin et vers le nord l'après-midi. L'interprétation de ce phénomène, qui fait appel nécessairement à des courants circulant le long des lignes de force magnétiques entre les deux hémisphères, fait l'objet d'un nouvel effort de modélisation physique de la dynamo ionosphérique, centré sur la reproduction de son asymétrie interhémisphérique.

b) Par un calcul direct des courants jour à jour

A partir des profils de vitesse ionique produits chaque demi-heure par le sondeur de Saint-Santin, on peut calculer directement le courant circulant à chaque altitude. La comparaison des résultats avec le modèle qu'on vient de décrire montre que ce dernier représente bien l'observation. Ceci a permis de qualifier le modèle en tant que "référence calme" pour l'étude des effets de l'activité magnétique.

VI.1.4 Conductivités ionosphériques

Les conductivités ionosphériques sont contrôlées par les deux sources d'ionisation de la thermosphère : le rayonnement solaire, et les précipitations particulaires aurorales et polaires.

En moyennes latitudes, à Saint-Santin, où seule la source solaire existe, les conductivités sont fonctions essentiellement de l'angle zénithal solaire. Une analyse statistique des mesures de conductivités intégrées en altitude faites à Saint-Santin (figure 2) a permis de montrer que ces conductivités sont une fonction linéaire du cosinus de l'angle zénithal solaire. De plus une dissymétrie matin-soir dans cette dépendance a été mise en évidence, et interprétée comme un effet de la variation diurne de l'oxyde d'azote (414).

VI.1.5 Dynamique de l'ionosphère équatoriale

L'étude des ionogrammes de nuit de Sahr (Tchad) a permis d'identifier les irrégularités d'ionisation produites aux échelles hectométriques dans la couche F équatoriale ("F diffus"), et de suivre leur évolution en altitude en fonction de l'heure locale.

En milieu de nuit les périodes d'apparition discontinue du F diffus sont anticorrélées avec celles des couches E sporadiques : ceci a été interprété comme un effet du court-circuit électrique produit aux pieds des lignes de forces équatoriales sur lesquelles le F diffus tend à se développer, par la présence d'une couche E sporadique. Un tel court-circuit permettrait de décharger les polarisations électriques par le biais desquelles opère l'instabilité de Rayleigh-Taylor responsable de la montée de bulles de plasma sous-dense au sein de la couche F (221).

VI.2 LA DYNAMO VENT SOLAIRE/MAGNETOSPHERE

Les effets de l'interaction du vent solaire avec la magnétosphère sont pratiquement permanents à l'extérieur de la plasmapause, dans les régions externes de la magnétosphère et en zone aurorale. Ils sont également ressentis à l'intérieur de la plasmapause (en moyennes et basses latitudes ionosphériques) par le biais d'une large gamme de mécanismes de transferts d'énergie des hautes vers les basses latitudes (207). L'étude expérimentale de la dynamo vent solaire/magnétosphère est organisée le long de ce "chemin" de l'énergie, par l'étude de trois régions :

- l'ionosphère aurorale et la magnétosphère externe,
- les environs de la plasmapause,
- l'ionosphère des moyennes latitudes.

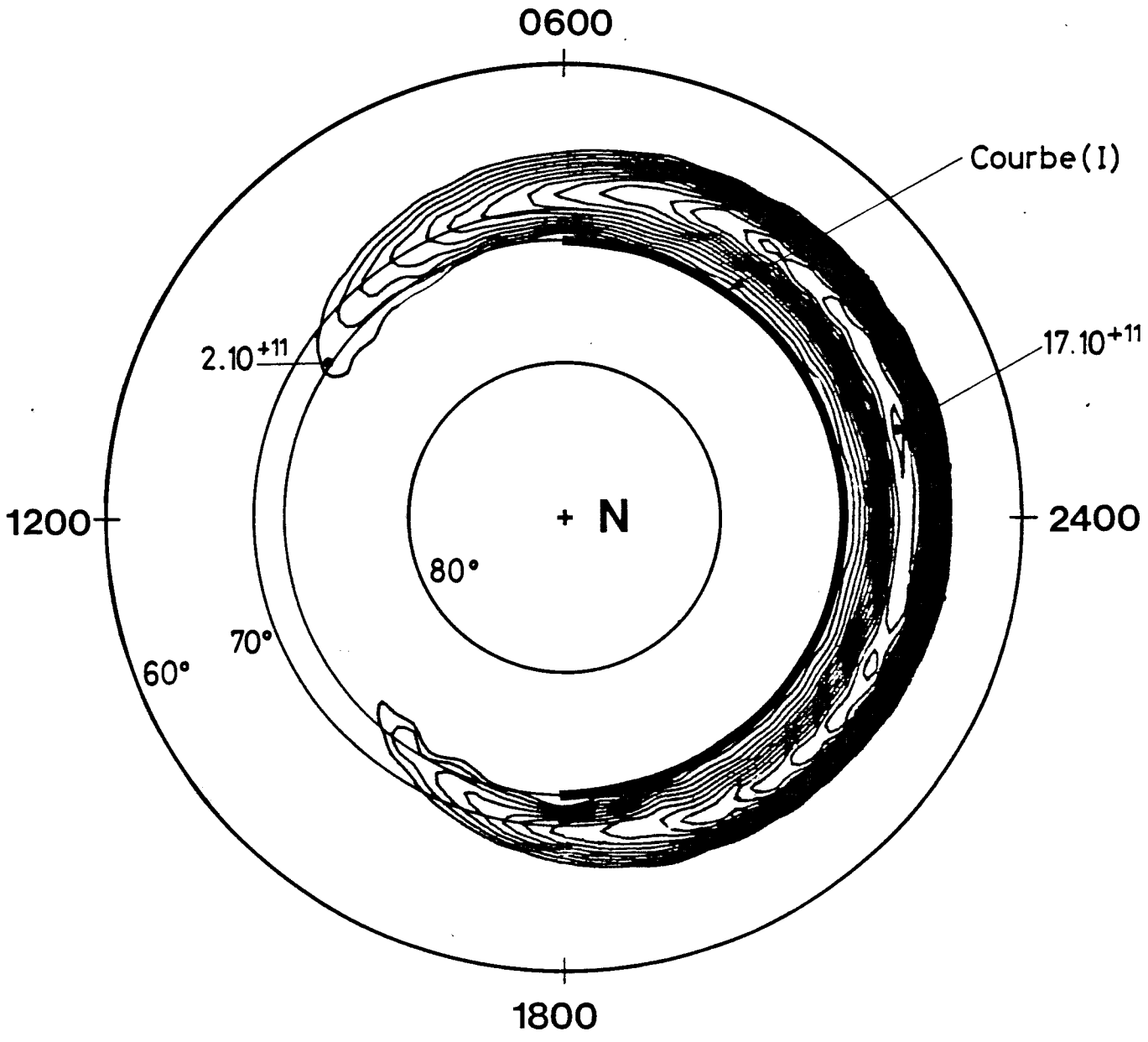
La richesse des données acquises a continué à nourrir une activité théorique sur la convection magnétosphérique qui a pour but de leur offrir un cadre d'interprétation physique cohérent et unitaire.

VI.2.1 Etudes théoriques sur la convection magnétosphérique

Elles ont pour but la compréhension des interactions entre plasmas magnétosphériques et ionosphériques, et de leurs effets sur la distribution du potentiel électrostatique de convection dans les régions dipolaires de la magnétosphère. L'accent a été mis sur le problème le plus mal décrit actuellement par les modèles théoriques qui est l'effet des précipitations électroniques aurorales sur la convection. Il a été abordé sous deux aspects :

1) Une étude de l'effet des conductivités ionosphériques sur la convection et ses constantes de temps.

POTENTIEL A TRAVERS LA CALOTTE POLAIRE : 75 kv
POSITION DE LA SOURCE L = 10
TEMPERATURE DE LA SOURCE : 1 kev



UNITE DE FLUX : $s^{-1}\omega b^{-1}$
INTERVALLE ENTRE DEUX COURBES : 1.10^{+11}
VALEUR MAXIMALE : 17.10^{+11}
VALEUR MINIMALE : 2.10^{+11}

Figure 3 (VI) : En utilisant des équations fluides simplifiées pour décrire le transport et la précipitations des électrons du feuillet de plasma, on a pu obtenir des cartes des flux de précipitations en fonction de la latitude et du temps local qui représentent assez bien la géométrie de la zone aurorale diffuse. Les précipitations sont maximales un peu après minuit, et s'atténuent en allant vers le jour.

Reprenant le calcul analytique de Vasyliunas, on a modélisé l'interaction électrodynamique du courant annulaire magnétosphérique avec l'ionosphère pour y inclure :

- le renforcement des conductivités aurorales par les précipitations, qui crée un gradient latitudinal de conductivité,

- la dissymétrie jour-nuit des conductivités, liée à la photoionisation solaire qui crée des gradients longitudinaux.

On a pu montrer comment les constantes de temps de la convection, et la distribution du champ électrique en région sub-aurorale et en moyenne latitude, dépendent de ces gradients. On a en particulier montré comment le décalage des frontières internes des populations ioniques et électroniques de la magnétosphère peut créer une intensification spectaculaire du champ électrique sub-auroral.

Ce travail, associé avec la modélisation des conductivités ionosphériques, a fait l'objet d'une thèse de 3ème cycle (414).

2) Une étude du transport et de la précipitation des électrons chauds de la queue magnétique vers les régions dipolaires de la magnétosphère, et de leurs effets sur l'ionosphère, en vue d'une modélisation de la zone aurorale diffuse (224).

On a repris l'idée simple de Kennel sur l'interaction précipitation-convection d'électrons magnétosphériques et leurs relations à la géométrie de la zone aurorale diffuse, en y incluant les variations en longitude. On a ainsi défini des équations "fluide" pour le transport des électrons du feuillet de plasma, et calculé théoriquement la distribution des flux et des températures de précipitation du niveau ionosphérique (figure 3). Ce travail sera concrétisé par la soutenance d'une thèse de 3ème cycle au printemps de 1981.

Au delà de cette étape, un modèle numérique plus complexe de la convection est en cours de développement, en collaboration avec le département de mathématique du CNET et l'INRIA, et une étude théorique de l'électrodynamique des arcs auroraux, qui met en jeu des échelles spatiales beaucoup plus petites, a débuté.

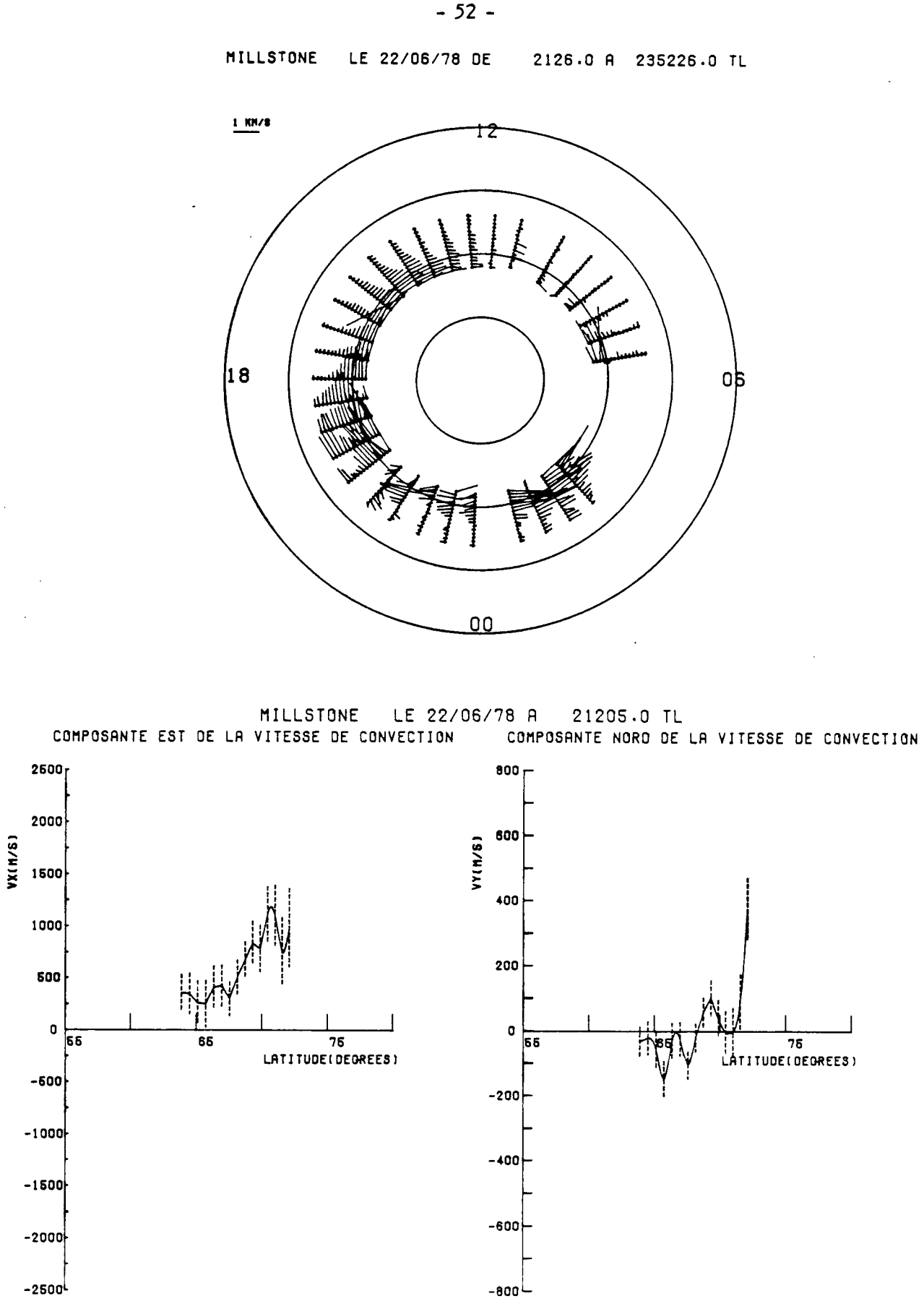


Figure 4 (VI) : Mesures de la vitesse de convection du plasma de la région F en zone aurorale obtenues avec le radar incohérent de Millstone Hill. Le diagramme du haut présente une carte polaire des vitesses de convection mesurées en fonction du temps local et de la latitude invariante. En se plaçant à une heure donnée on peut (diagrammes inférieurs) étudier le profil en latitude du champ électrique de convection, et le comparer à la théorie. Ici on voit bien la forte atténuation du champ avec les latitudes décroissantes.

VI.2.2 Etude expérimentale de la convection en zone aurorale

Une étude expérimentale de la distribution en latitude (60 à 75 degrés) du champ électrique de convection mesuré par les radars à diffusion incohérente de Chatanika (Alaska) et Millstone Hill (Massachussetts) a été entreprise dans le cadre d'une thèse de 3ème cycle. Elle a pour but de tester les différents modèles de champ de convection actuellement disponibles, et d'élaborer un modèle physique plus conforme à l'observation directe de la variation en latitude et un temps local du champ électrique.

La figure 4 montre un exemple de carte des vitesses de convection du plasma de la région F aurorale obtenue à partir du radar de Millstone Hill (diagramme supérieur). On peut également tracer à une heure donnée le profil en latitude des deux composantes de la vitesse de convection (diagrammes inférieurs) pour étudier la forme de l'atténuation des hautes vers les basses latitudes de la convection.

Sur cette base, une analyse critique du modèle de convection de Stern-Volland a été entreprise.

L'interaction des phénomènes de précipitation et de convection en zone aurorale avec l'atmosphère neutre a été étudiée à l'aide de données du radar de Chatanika acquises dans le cadre de coopérations avec le SRII et Utah State University (USA). Un programme décrivant l'interaction entre un spectre d'électrons auroraux précipités et l'atmosphère, et calculant le profil de concentration électronique résultant, a permis par inversion du profil de recalculer des spectres énergétiques d'électrons auroraux à partir du profil observé de N_e (502). Il constitue un outil important d'interprétation des données EISCAT. De même, le programme de calcul du dépôt d'énergie par effet Joule et par les électrons précipitants dans la thermosphère aurorale, développé à l'occasion de l'étude de l'orage magnétique d'avril 1978, a été achevé. En utilisant les résultats obtenus pendant cet orage par la technique des impulsions multiples qui permet de réaliser une bonne résolution en altitude des profils verticaux des vitesses ioniques, on a montré dans quelles conditions ces mesures permettent de calculer le vent neutre. Cette bonne résolution a permis de montrer que le profil du chauffage Joule se sépare de celui des conductivités en cas de forte activité magnétique (254).

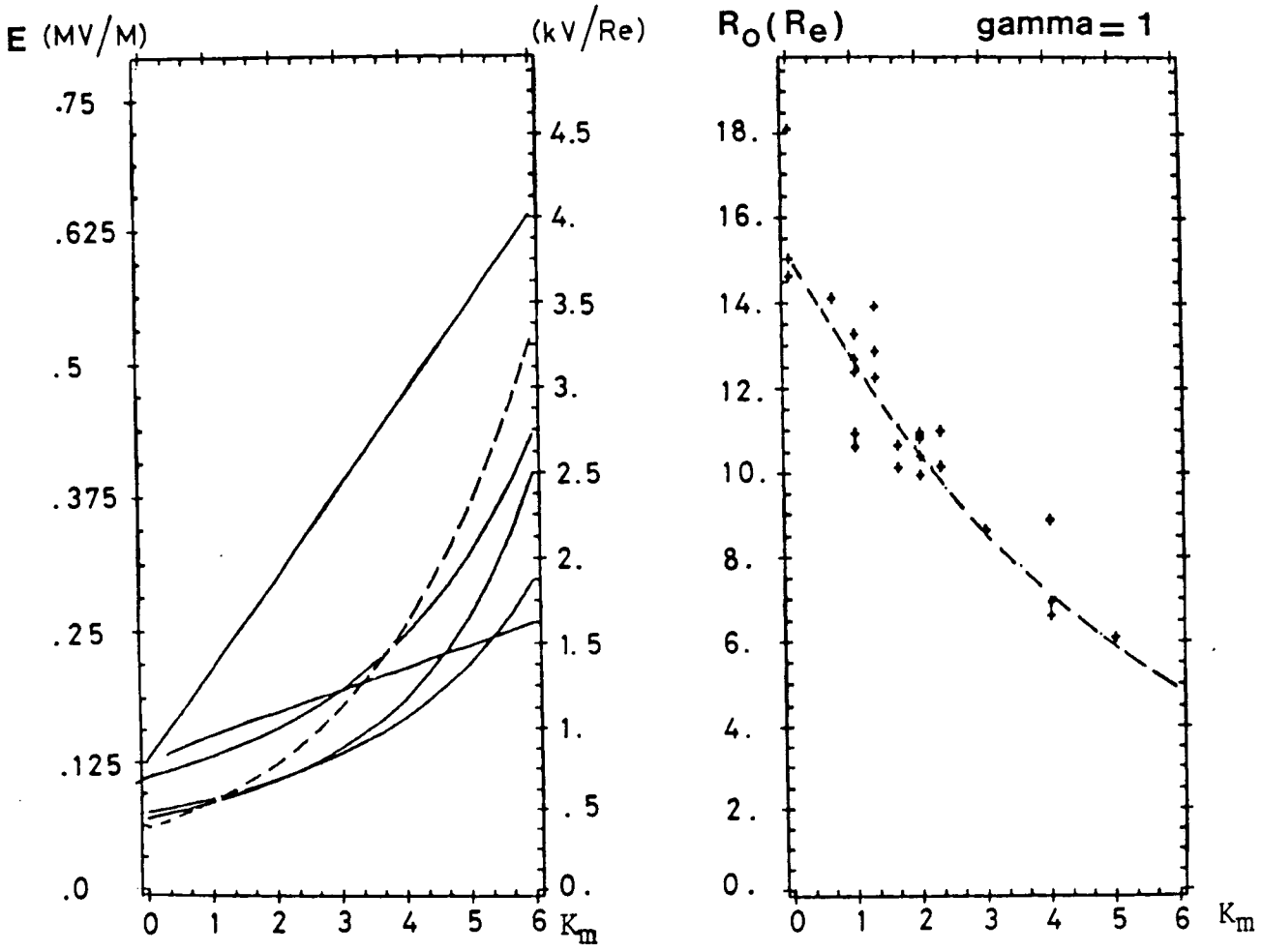


Figure 5 (VI) : Comparaison entre la position de la plasmapause mesurée par le sondeur à relaxation d'ISEE A et celle déduite d'un modèle de champ électrique de convection uniforme.

Dans l'hypothèse d'un champ électrique de convection uniforme, pour chaque mesure, la distance du point de stagnation a été déterminée et, par conséquent, le champ de convection nécessaire pour interpréter la mesure. Sur la partie droite de la figure, les croix représentent la distance du point de stagnation ainsi déduite en fonction de l'indice d'activité magnétique. La courbe pointillée est celle qui passe au mieux entre les points de mesure. Seules les données correspondant à des périodes d'activité magnétique stationnaire ont été utilisées. La faible dispersion des mesures est frappante. Sur la partie gauche de la figure est représenté le champ électrique correspondant, toujours en fonction de l'activité magnétique. La loi que nous avons obtenue est tracée en pointillé tandis que les résultats d'autres auteurs sont indiqués en traits pleins pour comparaison. Nous trouvons une variation plus grande car nous avons appliqué des critères de stationnarité sévères aux données. De plus, nous détectons des champs électriques très faibles car le sondeur permet des mesures de densité électronique très sûres, même à grande distance de la terre où la densité est faible.

VI.2.3 La convection au voisinage de la plasmapause

Alliés aux autres expériences disponibles à bord, les sondeurs à relaxation embarqués sur les satellites GEOS et ISEE permettent d'étudier la convection du plasma froid dans le plan équatorial de la magnétosphère par l'intermédiaire de la distribution de la concentration du plasma.

Les mesures de densité de ISEE ont été utilisées pour tester divers modèles de la distribution à grande échelle du champ de convection. Les résultats obtenus (217) ont fait l'objet d'une thèse de 3ème cycle (401). Ils montrent que la concentration électronique varie en L^{-4}, à l'intérieur comme à l'extérieur de la plasmapause. Ceci peut être dû à l'instabilité d'échange qui brasse les tubes de force, mais l'application de la théorie cinétique à l'échappement des gaz légers de l'ionosphère donne le même résultat. Ils montrent également que la position de la plasmapause ne peut pas être utilisée pour discriminer entre plusieurs types de modèles de champ électrique (uniforme ou non) car les sources d'erreur sont trop importantes. Par contre, à condition de sélectionner des périodes où l'activité magnétosphérique est stationnaire, c'est un très bon outil d'étude de l'intensité du champ électrique de convection à grande échelle. Les mesures, remarquablement peu dispersées, sont bien représentées par une loi de variation exponentielle du champ électrique avec l'activité magnétosphérique (figure 5). Ce champ est de l'ordre d'une fraction de millivolt par mètre et peut même s'annuler par temps très calme : il arrive que, dans la région du minuit local, on n'observe pas de plasmapause (216).

Avec GEOS-2, la distribution des plasmas et des champs peut être étudiée à tous les temps locaux le long de l'orbite géostationnaire. Ceci a permis de réaliser une étude statistique de la concentration de plasma froid le long de cette orbite (figure 6), ainsi que de la position en temps local de l'excroissance plasmasphérique (le "bulge") produite dans le secteur après-midi par l'action combinée des champs électriques de convection et de corotation. La dynamique de cette région, traversée chaque jour par GEOS-2, permet de relier la direction et l'intensité du champ de convection avec l'intensité des paramètres contrôlant la dynamo vent solaire/magnétosphère. L'analyse fine de la structure des données au cours de certaines traversées de plasmapause a permis de plus, en s'aidant de l'ensemble des expériences de GEOS, de mieux comprendre comment cette frontière de la distribution du plasma froid se situe par rapport aux frontières de distribution des particules chaudes (ions et électrons), et de mettre en évidence les effets diamagnétiques produits à l'extérieur de la plasmasphère par cette population chaude (figure 7).

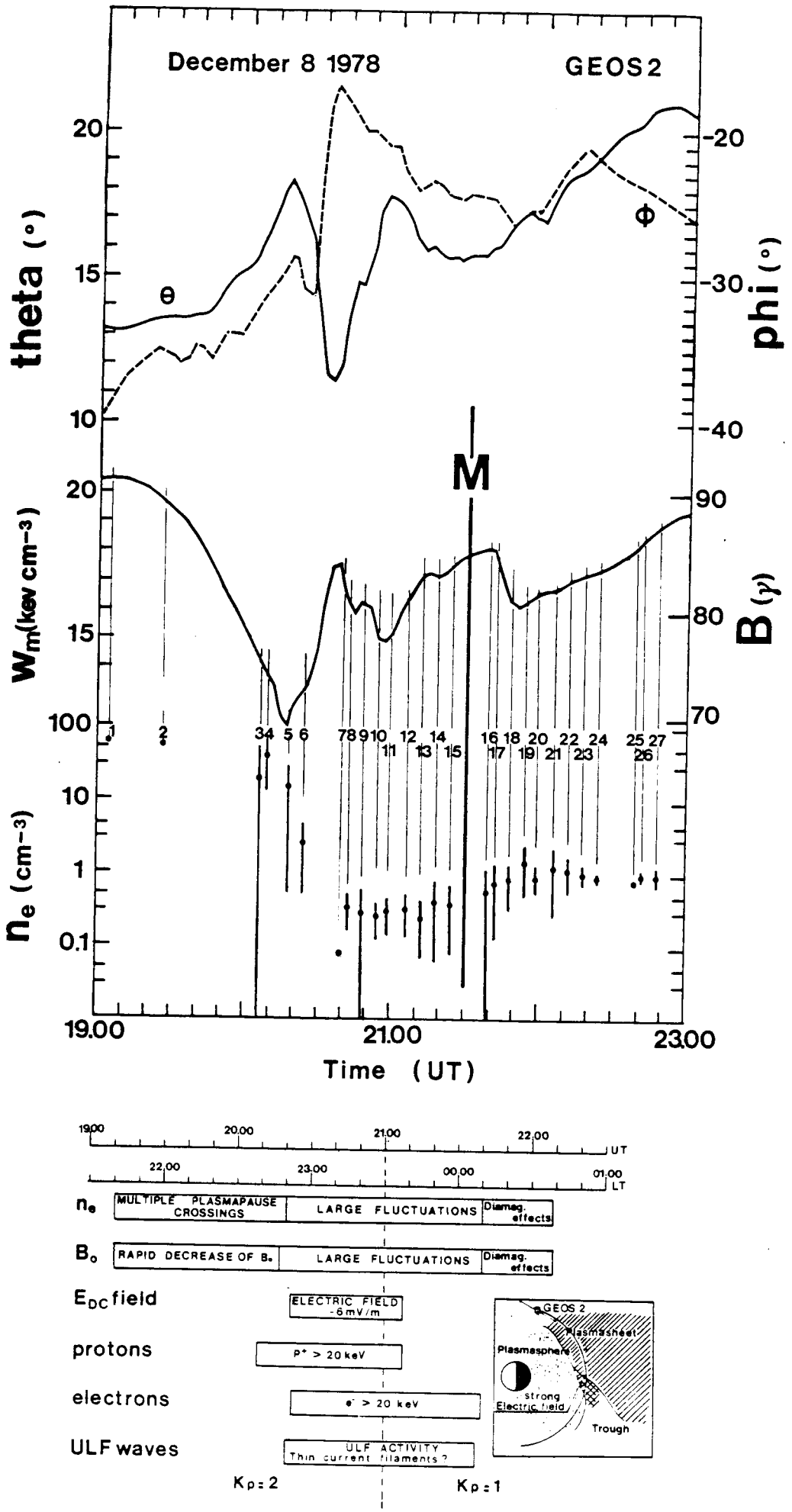

December 8 1978
GEOS 2
theta (°)
phi (°)
θ
Φ
M
W_m(kev cm^{-3})
B (γ)
n_e (cm^{-3})
Time (UT)
19.00
21.00
23.00
UT
LT
MULTIPLE PLASMAPAUSE CROSSINGS
LARGE FLUCTUATIONS
Diamag. effects
RAPID DECREASE OF B.
E_{DC} field
ELECTRIC FIELD -6 mV/m
protons
P+ > 20 keV
electrons
e- > 20 keV
ULF waves
ULF ACTIVITY Thin current filaments ?
Kp = 2
Kp = 1
GEOS 2
Plasmasheet
Plasmasphere
strong Electric field
Trough

Figure 6 (VI)

Figure 6 (VI) : Evolutions du champ géomagnétique $\vec{B}_o$ et de la densité électronique du plasma magnétosphérique vues par le satellite GEOS 2 le 8 décembre 1978. De bas en haut les courbes représentent successivement les évolutions de Thêta (angle que fait $\vec{B}_o$ avec l'axe de spin du satellite, perpendiculaire au plan de son orbite), Phi (angle de la projection de $\vec{B}_o$ dans le plan de l'orbite de GEOS et de la ligne terre-satellite), W_m, densité d'énergie du champ géomagnétique, exprimée en Kev/cm^3 (la valeur correspondante de l'induction géomagnétique est indiquée sur l'échelle de droite). Les valeurs moyennes de la densité électronique mesurées par le sondeur à relaxation de GEOS 2 (avec leurs barres de dispersion, effets des fluctuations de la densité pendant la période d'intégration de six minutes utilisée ici). La lettre M indique la position du minuit local. La plasmapause est traversée entre 19 h 10 et 20 h 20 (T.U.). La grande barre de fluctuations sur la valeur de la densité (point n° 2) témoigne de multiples traversées de la plasmapause : valeurs de densité électronique oscillant de valeurs plasmasphériques à des valeurs magnétosphériques. Simultanément une ample décroissance du champ géomagnétique se produit, analogue à celles qui précédent habituellement les sous-orages magnétosphériques. Juste après le minuit local, le satellite rencontre la couche de plasma ; le comportement du plasma devient stationnaire et on voit apparaître des effets diamagnétiques clairs : anticorrélation entre l'évolution de la densité électronique du plasma et la densité d'énergie magnétique. Cette anticorrélation correspond à une énergie moyenne de 1.8 keV des particules contribuant au diamagnétisme, ce qui est typique du bord interne de la couche de plasma.

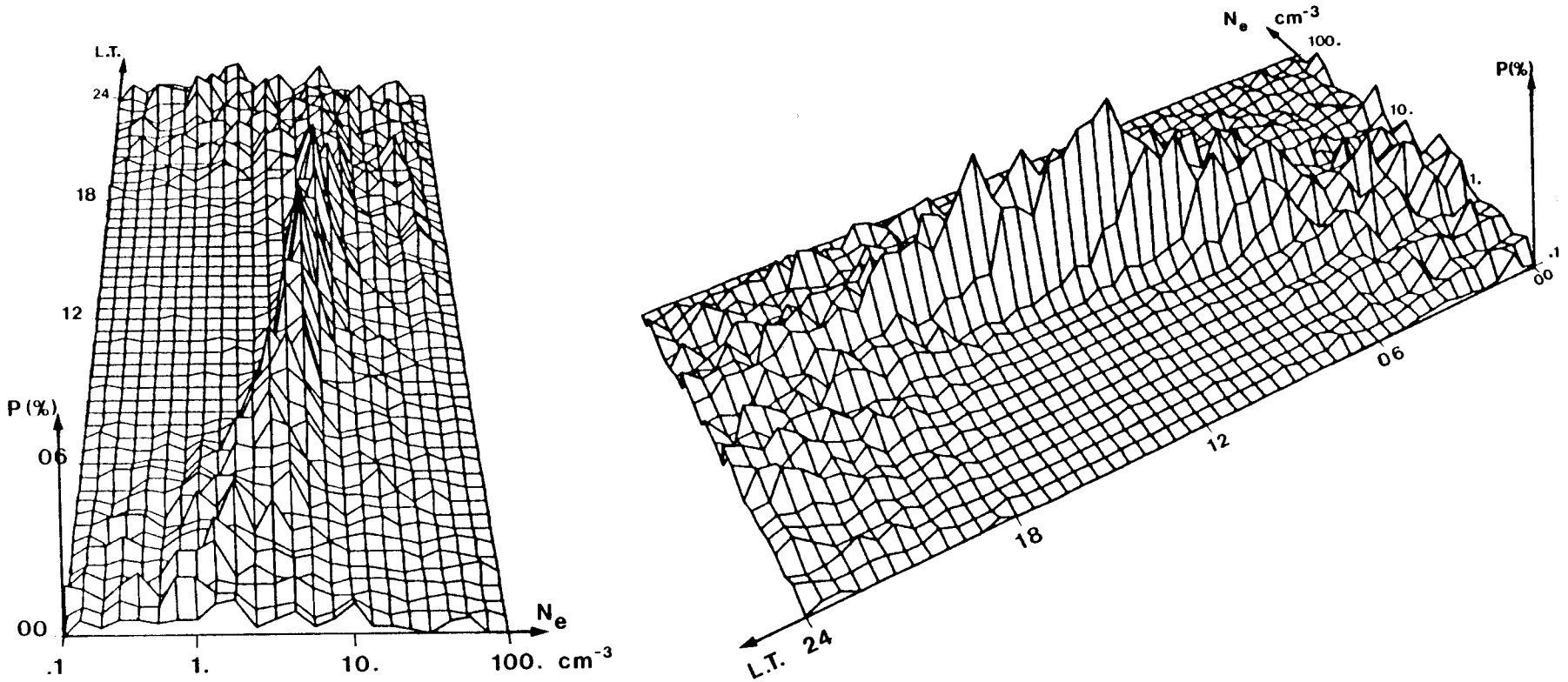


Figure 7 (VI) : Représentation tridimensionnelle de la statistique des valeurs de la densité électronique à l'orbite géostationnaire en fonction du temps local.

130 jours (20 nov. 1978 - 28 mars 1979) de mesures de la densité électronique réalisées par l'expérience de sondage à relaxation (S 301) embarquée sur le satellite GEOS 2 ont été traités de façon statistique pour faire apparaître en fonction de l'heure locale (premier axe horizontal) la probabilité (axe vertical) d'observer une valeur données de la densité dans la gamme 0.1 - 100 cm^{-3} (second axe horizontal, échelle logarithmique). La perspective est représentée sous deux points de vue différents : ils mettent en évidence le resserrement de la distribution des valeurs de la densité observées du côté jour entre 8 et 15 heures locales autour de 7 à 8 particules par cm^{-3}, par opposition à la dispersion observée pendant les heures de nuit. La partie du spectre de la distribution correspondant aux valeurs élevées (> 10 cm^{-3}) de la densité observées entre 12 et 24 heures locales est due au passage de l'orbite géostationnaire à l'intérieur de l'excroissance plasmasphérique ("bulge") bordée par les forts gradients de la plasmapause : dans cette zone de fortes densités, l'accumulation de plasma résulte de l'action combinée du champ électrique magnétosphérique de convection et du champ plasmasphérique de corotation. La dynamique de cette région observée au jour le jour par GEOS 2 permet justement de relier les propriétés du champ de convection avec l'intensité des phénomènes d'interaction vent solaire-magnétosphère, dont les différents indices d'activité géomagnétique fournissent une estimation quantitative.

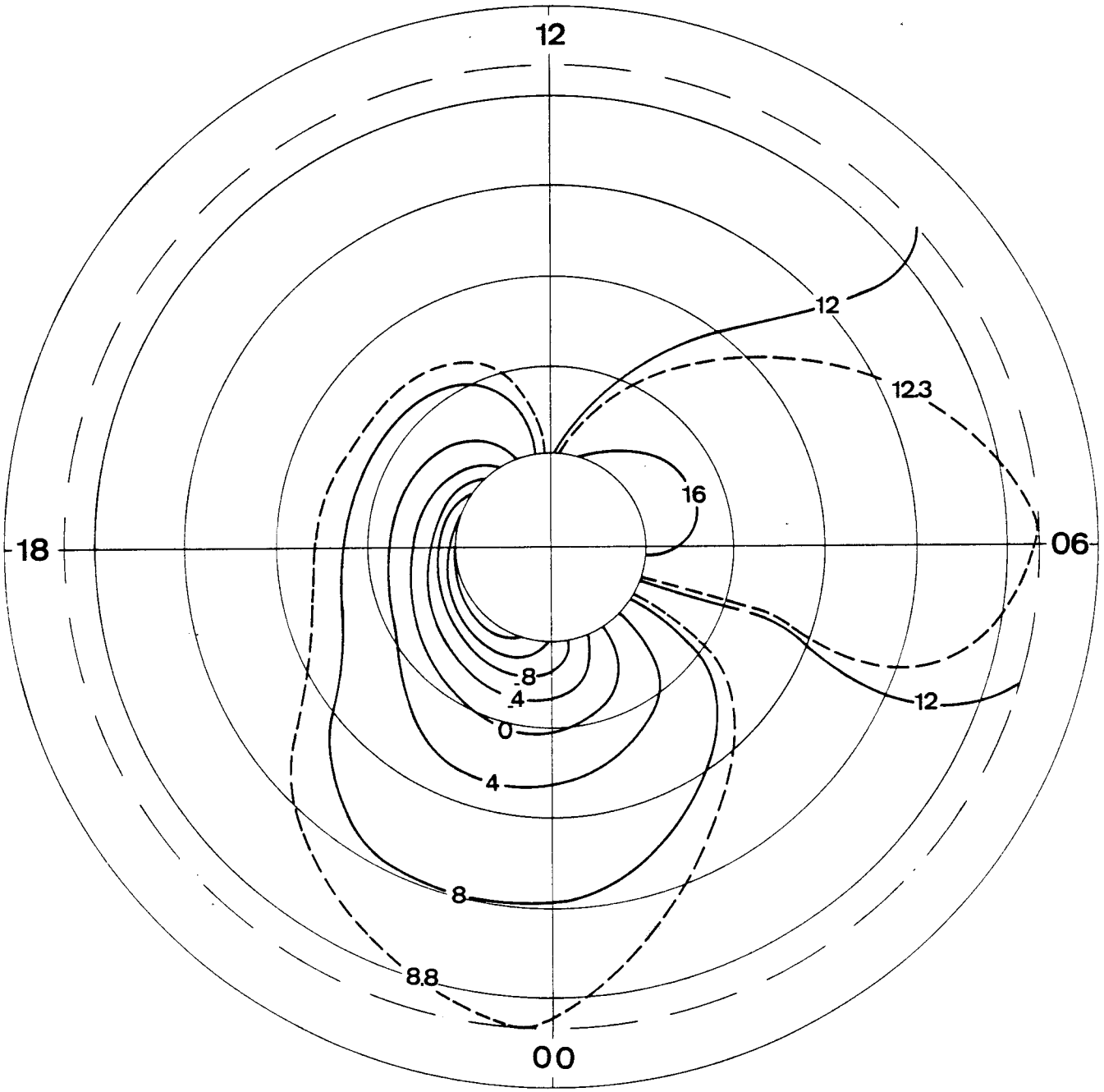


Figure 8 (VI) : Carte ionosphérique de la distribution du potentiel de convection magnétosphérique à moyennes et basses latitudes déduite d'un modèle dynamo théorique et des observations de champ électrique perturbé de Saint-Santin (les valeurs des équipotentielles sont en kilovolts). Cette distribution est celle produite par un champ électrique uniforme dirigé de 8 h vers 20 h sur la calotte polaire.

VI.2.4 La convection et ses effets aux moyennes latitudes

Les résultats obtenus au cours des années précédentes sur l'étude des différents mécanismes de perturbation du champ électrique de moyenne latitude par l'activité magnétique ont été rassemblés de façon synthétique dans une Thèse d'Etat (403). A partir de l'analyse statistique des données de Saint-Santin, et d'une étude théorique des deux mécanismes possibles de perturbation :

- la pénétration directe du champ électrique en moyennes latitudes (108, 208, 249),
- la génération de champs électriques par l'effet dynamo des vents produits par le chauffage auroral (107),

on a pu reproduire la variation en temps local des perturbations de champ observé. On en a déduit (grâce au caractère global de la modélisation théorique mise en oeuvre) la distribution planétaire du champ de convection de moyenne latitude. La carte de potentiel résultante est présentée sur la figure 8. Elle fait apparaître la forte dissymétrie matin-soir et jour-nuit du champ de convection de moyenne latitude. Cette cartographie des perturbations est en bon accord avec les observations faites en moyennes latitudes, et permet d'expliquer certains traits à priori surprenants des perturbations observées à l'équateur magnétique.

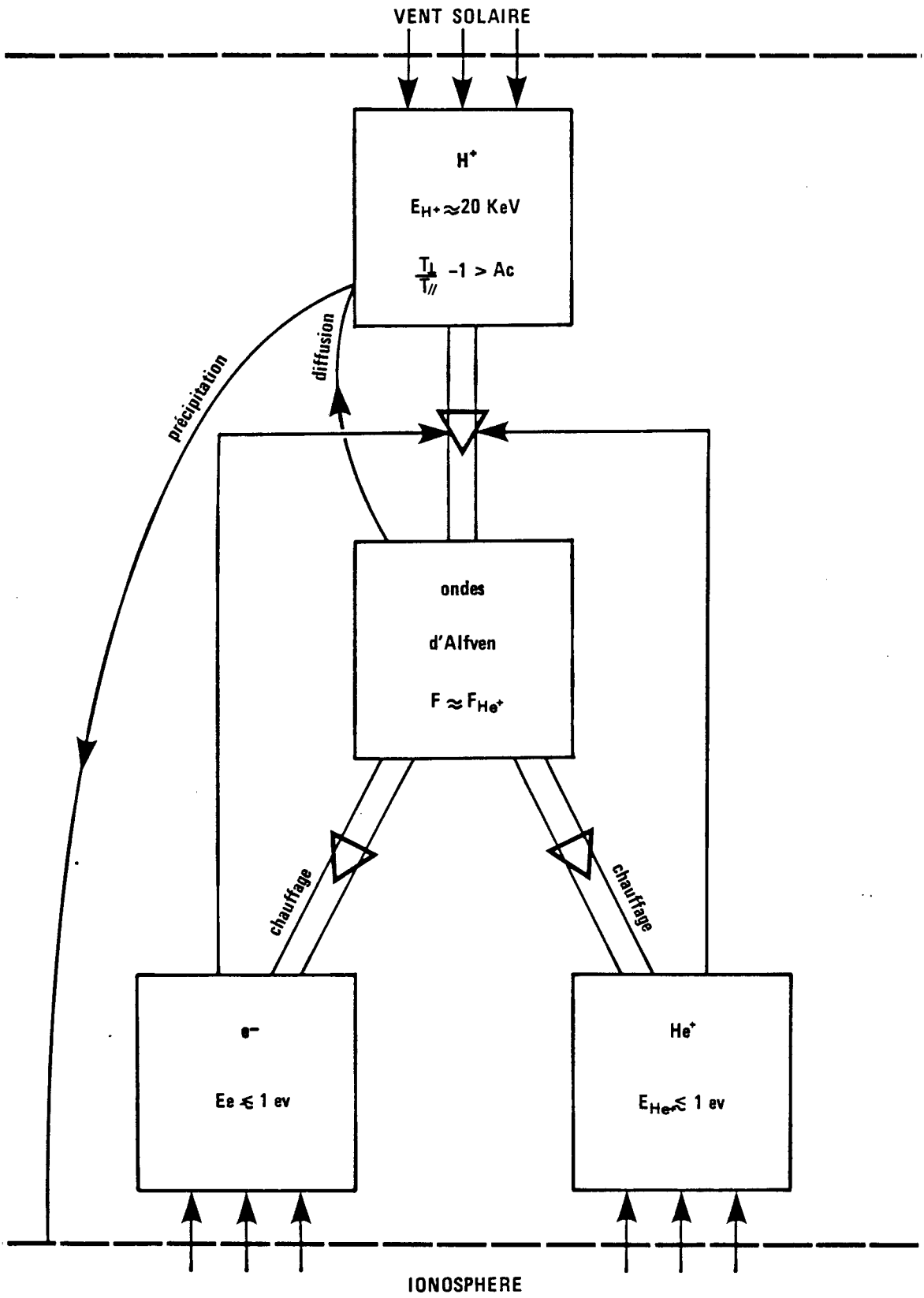


Figure 1 (VII) : Rôle des ondes d'Alfven dans la dynamique des électrons et des ions magnétosphériques.

L'anisotropie de température des protons énergétiques est le réservoir d'énergie. Les ondes d'Alfven ou cyclotroniques ioniques sont destabilisées pourvu que la densité électronique soit suffisante et surtout que la densité relative d'ions He^+ soit suffisante (cf. le texte). Les ondes permettent d'accélérer les électrons thermiques le long du champ magnétique et les ions He^+ surtout dans la direction perpendiculaire. La diffusion par les ondes d'Alfven contrôle également la précipitation des protons énergétiques.

VII. RAYONNEMENT ELECTROMAGNETIQUE TERRESTRE ET PLANETAIRE

Deux sources très différentes permettent le peuplement de la cavité magnétosphérique. En premier lieu, le vent solaire est constitué en majeure partie de protons et d'électrons avec une composante d'ions Hélium He^{++}. Ce plasma est thermalisé lors de la traversée de l'onde de choc, les ions ont alors une température de l'ordre de 1 keV. Un des objectifs du CRPE est d'étudier le chauffage et la création d'énergie libre (sous forme d'anisotropie de température) qui sont associés à la convection de ce plasma. La diffusion du plasma à partir de l'ionosphère constitue la seconde source ; il s'agit alors d'un plasma de température inférieure à 1 eV, les ions étant essentiellement des protons, de l'oxygène 0^{+} et de l'Hélium He^{+}. Le libre parcours moyen dans la magnétosphère terrestre étant très grand, les processus classiques de thermalisation entre ces divers composants sont en général inopérants. Les observations effectuées grâce aux expériences particules de basse énergie (Mullard, G.B.) et aux spectromètres de masse (Université de Berne) ont pourtant indiqué qu'il existait des processus de thermalisation très efficaces. Nous avons consacré une part importante de notre activité, tant sur le plan expérimental que théorique à l'étude de processus "anormaux" de thermalisation, c'est-à-dire de processus pour lesquels les ondes permettent un transfert d'énergie entre les populations décrites plus haut (figure 1).

Les ondes électromagnétiques engendrées par les plasmas naturels permettent, lorsqu'elles sont intenses, de diffuser en angle d'attaque et donc de précipiter les particules dans le cône de perte atmosphérique. Cet effet est mieux connu que le précédent mais il existait peu de confirmation expérimentale convaincante. Les mesures effectuées à bord de GEOS ont permis de combler cette lacune (figure 2). Dans un domaine parallèle : la diffusion des électrons de la couche de plasma par des ondes électrostatiques, un effort intéressant a été fait pour modéliser les conséquences de ce processus microscopique au niveau global.

On savait que la Terre et Jupiter étaient des sources intenses de rayonnement dans le domaine des ondes radio ; grâce à Voyager 1 on sait maintenant que Saturne doit être ajoutée à la liste des radio-sources planétaires. L'étude des mécanismes d'émission de ce rayonnement électromagnétique est un thème important d'activité ; on explicitera ici les résultats nouveaux obtenus sur le plan théorique et sur

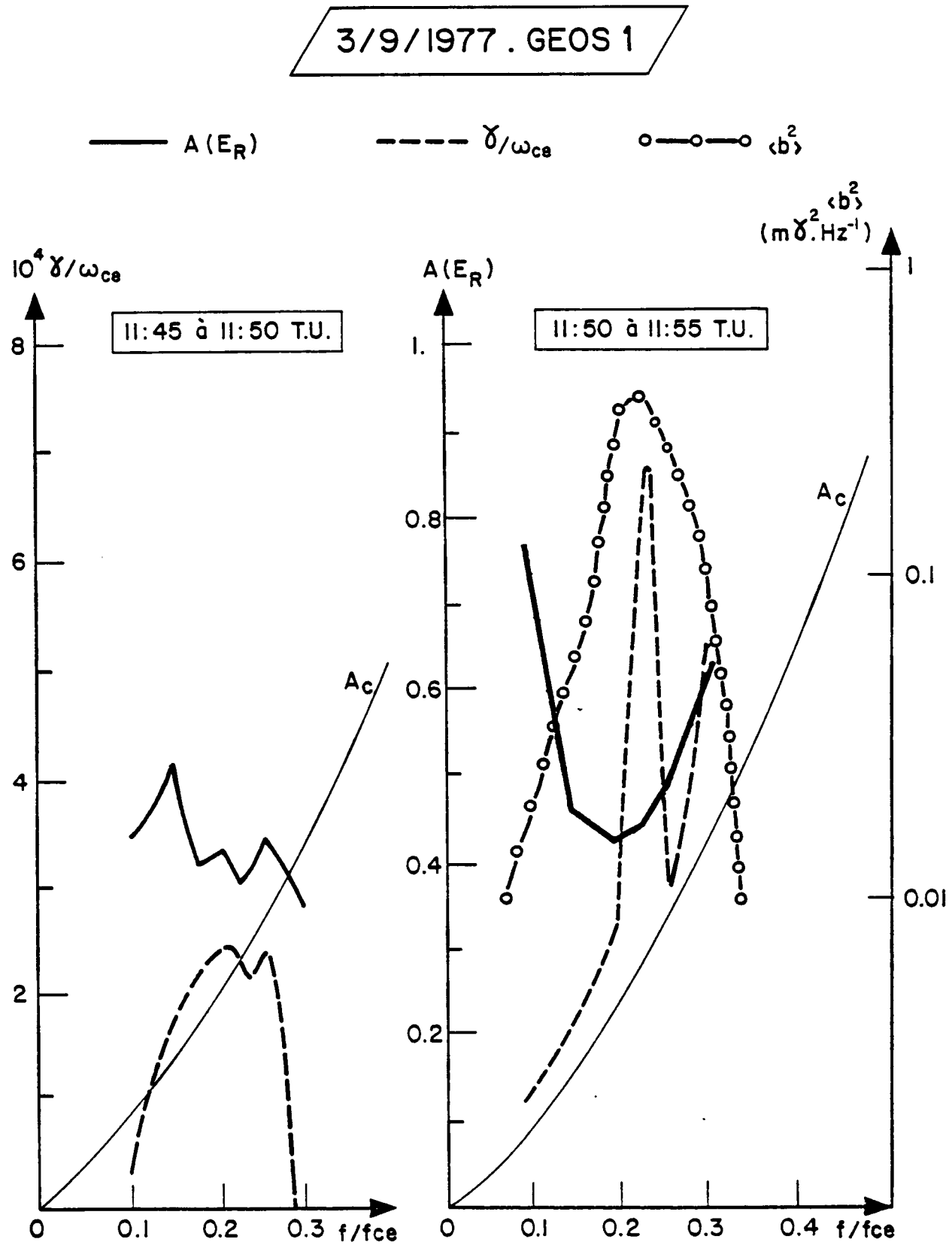


Figure 2 (VII) : Exemple d'étude d'interaction ondes-particules faite à partir des données de GEOS.

Une condition nécessaire pour l'émission des ondes E.B.F. : F ~ 700 Hz est que l'anisotropie de température des électrons énergétiques (A) excède l'anisotropie critique (A_c). En outre le taux de croissance est proportionnel au nombre de particules résonnantes. Sur cette figure sont représentées A, A_c, et le taux de croissance γ. Dans la partie gauche $A > A_c$ mais γ est faible, on n'observe pas d'ondes E.B.F.. A droite est fort, et le spectre correspondant $< b^2 >$ est dessiné.

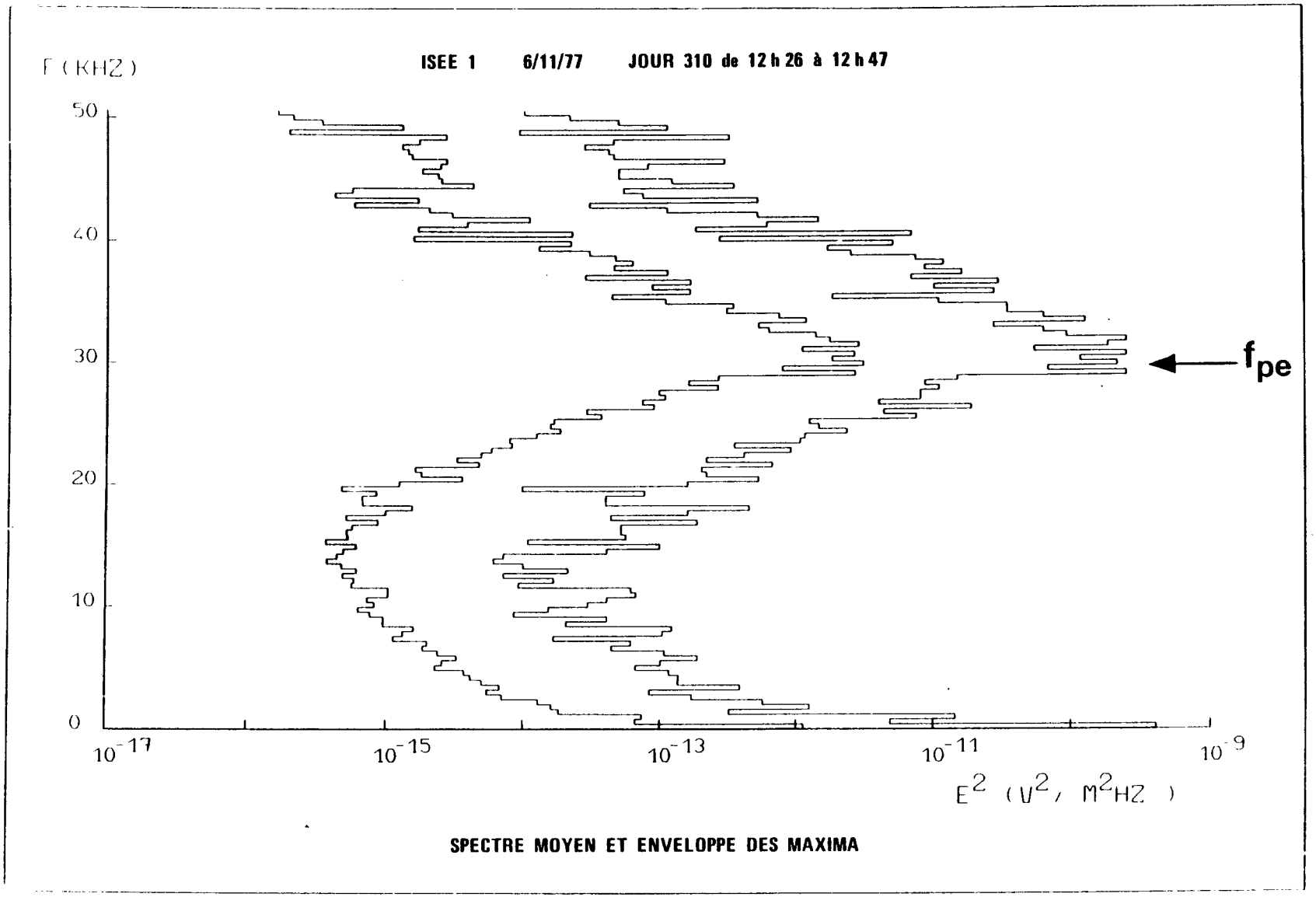


Figure 3 (VII) : Spectre du bruit observé en amont du choc de la terre.

Ce bruit est observé essentiellement au-dessus de la fréquence de plasma f_{pe}, qui est ici de 30 kHz. La grande longueur du spectre ($Df/f \sim 25\%$ à 6 dB) est étonnante car les calculs montrent que l'absorption landau devrait être prohibitine pour des fréquences supérieures à quelques pour cent de la fréquence de plasma. Ceci montre qu'il s'agit d'une génération locale des ondes, probablement par un mécanisme incohérent.

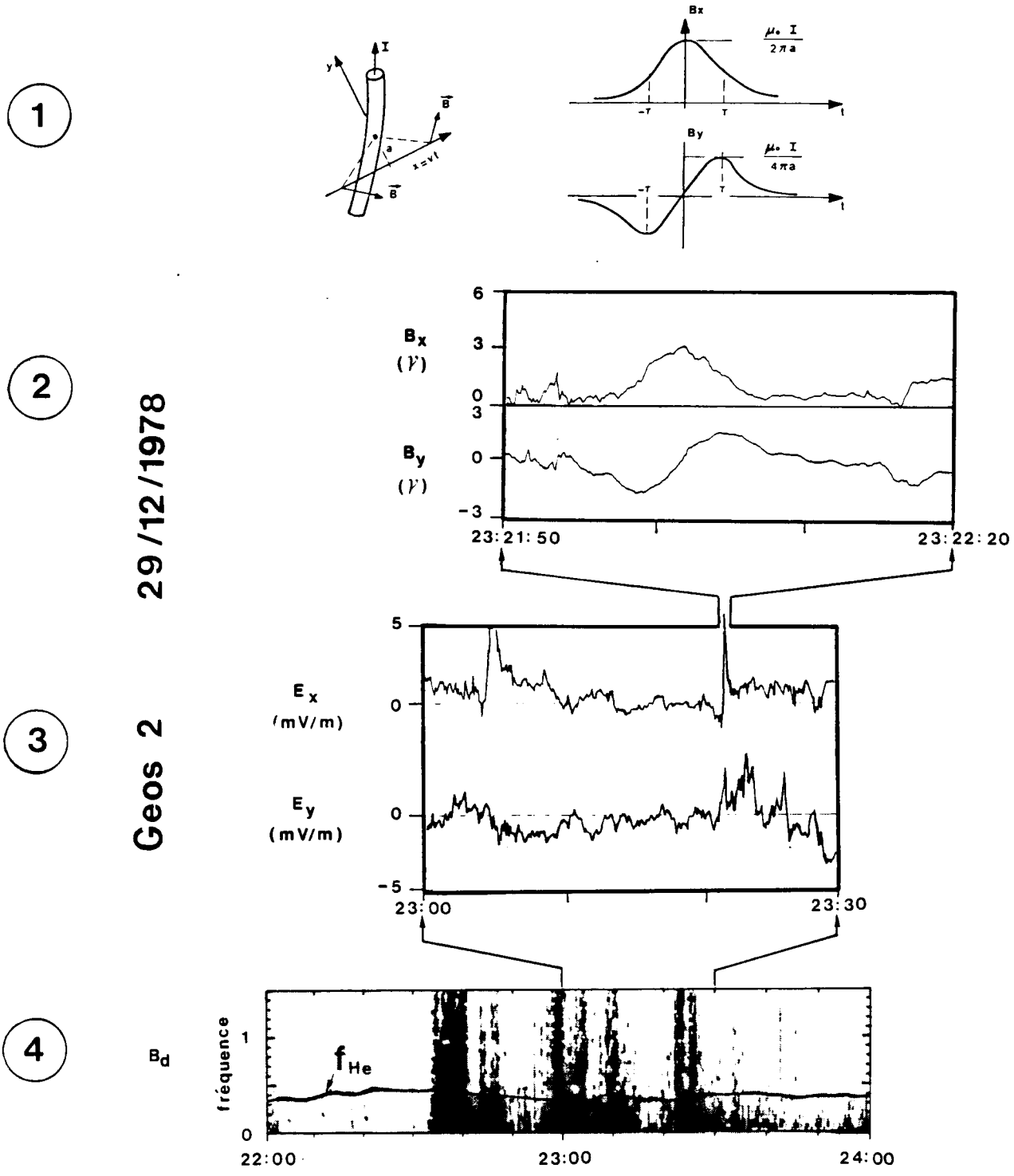


Figure 4 (VII) : L'expérience UBF embarquée à bord des satellites GEOS permet, outre la mesure des ondes, de détecter des tubes de courants localisés en déplacement rapide par rapport au satellite.
Selon un modèle simple (1) le déplacement relatif de ces tubes induit sur 2 antennes magnétiques d'orientation bien définie des signaux caractéristiques dont l'étude permet de déterminer la direction du courant et celle de la vitesse relative.
Un traitement élaboré des données de l'expérience UBF a permis de mettre en évidence de telles variations (2). Par ailleurs, la donnée du champ électrique quasi-continu (3) permet d'évaluer la vitesse relative, et par la suite, de déterminer l'intensité et le sens du courant, ainsi que la distance minimum d'approche.
Un diagramme fréquence-temps à grande échelle du signal UBF est également représenté (4).
Cette méthode, très performante, devrait permettre de mieux comprendre la dynamique des phénomènes d'injection impulsive de particules (sous orage magnétosphérique).

le plan expérimental. Dans le même chapitre on discutera les observations récentes, faites à bord d'ISEE, d'ondes électrostatiques en amont du choc de la terre et les interprétations proposées (figure 3).

Nous avons engagé un programme d'étude à long terme sur la dynamique des processus explosifs qui, lors des sous-orages magnétosphériques permettent la dissipation de l'énergie emmagasinée dans la couche de plasma. On montrera, en particulier, comment l'expérience "ondes d'Ultra Basses Fréquences" embarquée à bord des satellites GEOS 1 et 2 permet d'obtenir, de manière quelque peu inattendue, une mesure précise des courants alignés (figure 4).

Aux quatre thèmes d'études précédents qui sont axés sur les conséquences au niveau macroscopique des processus microscopiques il faut ajouter des études sophistiquées de la polarisation de la direction des normales d'ondes. De telles études permettent, en particulier, de tester les mécanismes de génération d'onde proposés ; c'est ce que l'on discutera dans le dernier paragraphe.

Cette longue introduction est destinée à préciser les thèmes que nous avons retenus en ce qui concerne "les mécanismes d'émission de rayonnement". L'apport du CRPE à l'évolution de ces thèmes va maintenant être explicité.

VII.1 ROLE DES ONDES D'ALFVEN DANS LA DYNAMIQUE DES COMPOSANTES DU PLASMA MAGNETOSPHERIQUE

La conjonction à bord des satellites GEOS 1 et 2 de mesures originales telles que celles de la turbulence Ultra Basse Fréquence (autour des gyrofréquences ioniques), de la densité du plasma (par sondage actif) et des populations électroniques et ioniques (avec la composition ionique du plasma) a permis d'obtenir des résultats entièrement nouveaux concernant le rôle des ondes d'Alfven. Le rapport précédent souligne le rôle de catalyseur joué par les ions Hélium He^+ thermiques, diffusés à partir de l'ionosphère, vis-à-vis de la génération des ondes cyclotroniques ioniques. Il est clair que l'énergie libre, mise en jeu dans l'instabilité cyclotronique, est celle des protons énergétiques issus du vent solaire. Comment expliquer alors le rôle déstabilisant des ions He^+ ? Les spectres et les polarisations observées à bord des satellites GEOS 1 et GEOS 2 sont en moyenne différents ; cette différence traduit un effet de propagation le long des lignes de force entre l'apogée de GEOS 2 (dans le plan équatorial) et celle de GEOS 1 (à des latitudes magnétiques de l'ordre de 10 à 20°).

Motivés par ces observations nous avons entrepris un tracé de rayon pour étudier la propagation des ondes cyclotroniques ioniques dans un plasma riche en Hélium (527). Le résultat le plus frappant est le suivant : les ondes instables dans la région équatoriale se propagent le long des lignes de force jusqu'à un point de réflexion, à une latitude $\Lambda \sim 10 - 20°$; la présence d'ions He^+, même minoritaires, implique des réflexions multiples qui confinent le rayon dans la zone instable. Lors de ces réflexions multiples le rayon acquiert un grand nombre d'onde perpendiculaire ; l'onde devient quasi électrostatique et approche le cône de résonance. Son champ électrique acquiert alors une petite composante parallèle au champ magnétique statique. Cette composante quasi continue à l'échelle de la dynamique des électrons thermiques leur communique une accélération importante. Une fois accélérés, les électrons rayonnent à plus haute fréquence. Cette interprétation est en accord avec les observations d'ondes électrostatiques d'Extrêmement Basse Fréquence modulées à la fréquence des U.B.F. (228, 405, 508) et avec l'accélération parallèle des électrons mise en évidence par nos collègues du Mullard (G.B.). Par ailleurs, avant d'atteindre le cône de résonance les ondes cyclotroniques ioniques permettent d'accélérer les ions Hélium d'origine ionosphérique et favorisent leur confinement dans la magnétosphère (121, 122). Ces effets sont confirmés par les mesures effectuées avec des spectromètres de masse par nos collègues de l'Université de Berne (536). Des observations au sol ont complété l'ensemble de ces mesures in situ. Elles ont été effectuées à l'aide de la station mobile de l'INAG installée en Norvège au voisinage du pied de la ligne de force sur laquelle est situé GEOS-2.

Au chapitre de l'instabilité des ondes cyclotroniques ioniques, il faut mentionner également l'aboutissement de travaux intéressants sur le processus d'échange de charge sur les neutres (411, 528). Ce processus dont le temps caractéristique est assez long favorise néanmoins la création d'ondes cyclotroniques ioniques dans la mesure où il provoque une augmentation de l'anisotropie de température des protons énergétiques. Il est donc couplé avec le processus de relaxation de cette anisotropie : la diffusion angulaire (par émission d'onde) des protons.

VII.2 DIFFUSION ET PRECIPITATION DES ELECTRONS ENERGETIQUES

La précipitation dans le cône de perte des électrons peut être due à la diffusion par des ondes électrostatiques de fréquences $f > f_{ce}$, la gyrofréquence des électrons ou, au contraire, à la diffusion par des ondes électromagnétiques qui se propagent dans le mode Whistler ($f < f_{ce}$). Ces deux aspects ont été étudiés.

La comparaison entre les anisotropies et les taux de croissance déduits directement des flux d'électrons mesurés (par nos collègues du MPIAE, Lindau RFA) avec le spectre des ondes observées simultanément (cf. fig. 2) a permis d'étayer les études théoriques effectuées en particulier au CRPE.

Le couplage convection - précipitation d'électrons d'énergie moyenne ($E_e \approx 1$ keV) a été étudié en détail. Les résultats très probants (511) permettent d'interpréter les observations d'aurores diffuses par la précipitation des électrons de la couche de plasma.

VII.3 RAYONNEMENT RADIO PLANETAIRE

Le rayonnement kilométrique auroral met en jeu des puissances de l'ordre de 10^9 W, ce qui n'est pas négligeable dans le bilan énergétique de la région aurorale. L'étude des processus d'émission de ce rayonnement a été poursuivie en mettant l'accent sur la découverte récente de l'association entre ce rayonnement et les zones fortement déficientes en plasma froid au-dessus de l'ionosphère aurorale. Moins intense et beaucoup moins sporadique, le rayonnement continu (continuum non thermique) pose tout de même un problème : quelle est son origine ? Une étude poursuivie en collaboration avec l'Université de Sussex tente de répondre à cette question.

En mesurant la direction d'arrivée de ce bruit simultanément à bord des satellites GEOS et ISEE, nous avons pu localiser par triangulation la région source. On observe deux types de sources : sur la plasmapause côté matin, et sur la magnétopause. Les deux types de source peuvent être observés simultanément à des fréquences différentes. Nous avons également pu montrer dans un cas particulier observé par ISEE que, dans une région proche de la source, le continuum se propage dans le mode extraordinaire. Ceci permet d'éliminer la théorie d'émission de ce type d'ondes par conversion linéaire d'énergie émise sur un autre mode. L'estimation de l'efficacité des autres mécanismes d'émission est en cours. Un article sur les résultats est en cours de rédaction.

VII.4 ONDES NATURELLES EN AMONT DU CHOC DE LA TERRE

Nous avons poursuivi l'étude des ondes observées près de la fréquence de plasma en amont de l'onde de choc de la Terre. Une étude très soigneuse a montré que le spectre des ondes observées sur la ligne de force tangente au choc est très monochromatique à la fréquence de plasma et s'élargit lorsque la connection est plus oblique (voir figure 3). Nous avons pu montrer que, sauf tout près de la fréquence de plasma, ce sont des ondes électrostatiques à courte longueur d'onde (se propageant donc dans le "mode plasma") qui se propagent, dans tous les cas, parallèlement au champ magnétique. Cette directivité ne pouvant être due aux caractéristiques de propagation des ondes, provient certainement du mécanisme d'émission. S'il est hors de doute que l'émission de ce bruit est liée aux électrons réfléchis et accélérés par le choc, il apparaît maintenant douteux qu'il s'agisse d'une instabilité stabilisée par des effets non linéaires. Il s'agirait plutôt d'une stabilisation par l'écoulement du vent solaire et d'une émission incohérente des particules.

VII.5 ROLE DES COURANTS ALIGNES DANS LA DYNAMIQUE DES SOUS-ORAGES

Les satellites GEOS 1 et 2 sont bien adaptés à l'étude de la dynamique des sous-orages, une étude coopérative importante a déjà été publiée (145). Par ailleurs les effets diamagnétiques lors des phénomènes d'injection ont été étudiés en détail (120), et nous avons développé une méthode originale qui permet des mesures précises des courants alignés.

Courants alignés

Le mouvement de tubes ou de nappes de courants par rapport au satellite induit, au niveau des antennes magnétiques, des signaux dont la détection permet une caractérisation précise de ces courants (voir figure 4). Cette étude est très délicate ; il a fallu mettre en oeuvre des techniques de dépouillement très sophistiquées. L'enjeu est intéressant ; nous avons ainsi pu mettre en évidence les effets de disruption du courant contenu dans la couche de plasma. Cette disruption se traduit par des courants alignés qui connectent la couche de plasma à la région aurorale (257). Ce travail est étroitement lié à l'étude numérique faite par G. Chanteur sur l'accélération des électrons le long du champ magnétique terrestre, (travail qui est décrit dans le chapitre IX).

VII.6 STABILITE DE LA COUCHE NEUTRE DE LA QUEUE DE LA MAGNETOSPHERE

La stabilité d'une couche quasi neutre de dimension finie a été examinée. Le modèle, à deux dimensions, tient compte d'une petite composante verticale du champ magnétique. Un bilan d'énergie détaillé montre que l'instabilité linéaire du mode de déchirement (tearing mode) calculée à partir des ions est en fait stabilisée par les électrons dont le mouvement reste adiabatique (521).

VII.7 ETUDE DES CHAMPS D'ONDES ELECTROMAGNETIQUES NATURELS

Les analyses de données ISEE ont confirmé l'observation faite à partir de données GEOS, que l'énergie des émissions TBF du type souffle est souvent portée par deux paquets d'ondes dont les vecteurs d'ondes moyens, ayant même orientation par rapport à la direction du champ magnétique terrestre, ont des angles azimutaux opposés (c.a.d. différents de Π) par rapport au méridien géomagnétique local.

Des tracés de rayon inverse, effectués à partir de ces paquets d'ondes, ont permis, et ce pour la première fois : d'une part, de localiser avec quelque objectivité des sources d'émissions naturelles, et d'autre part, d'estimer les directions des normales d'ondes au sein même de ces sources.

Pour éviter toute confusion avec les bruits parasites générés sur le satellite, on a mis au point une technique permettant d'identifier de façon presque certaine les harmoniques du 50 ou du 60 Hz émis par les réseaux de transport d'électricité. L'application de cette technique est en cours.

Les chaînes d'analyse de champ d'ondes électromagnétiques aléatoires ont été mises à la disposition de laboratoires de l'Université de Stanford et de l'Université de Cornell.

CONCLUSION

Tout en poursuivant des études de propagation d'ondes ou d'instabilité linéaire, nous avons fait un effort important pour dégager les conséquences au niveau macroscopique de la turbulence des plasmas naturels. Cet effort s'est matérialisé autour de trois thèmes :

a) l'étude du transfert d'énergie, via la turbulence des ondes d'Alfven, entre les divers composants : énergétiques et thermiques du plasma magnétosphérique ;

b) l'étude de la dynamique des sous-orages en insistant sur l'aspect "courants alignés" ;

c) l'étude du rayonnement radio planétaire.

Ces travaux s'inscrivent dans la ligne des expériences de géophysique dans lesquelles le CRPE est d'ores et déjà impliqué : d'abord EISCAT puis VIKING et ARCAD (qui complèteront par des mesures in situ les mesures d'EISCAT). A plus long terme les expériences JOCONDE (Galiléo) et ELSY (ISPM) seront consacrées à l'étude de la magnétosphère Jovienne et du vent solaire hors de l'écliptique.

VIII. RESONANCE DES PLASMAS

L'observation des ondes de plasma permet d'accéder à la connaissance de paramètres macroscopiques qui sont des données indispensables pour la compréhension de l'électrodynamique de l'environnement ionisé circumterrestre (chapitre VI). En particulier, on peut ainsi accéder à la densité du plasma froid, qui est un excellent traceur du champ électrique. D'autre part, l'observation de ces ondes, qu'elles soient excitées naturellement ou artificiellement, peut fournir d'intéressants renseignements sur les fonctions de distributions des particules chargées. Cet aspect microscopique est particulièrement important, car les processus mis en jeu dans les échanges d'énergie ondes-particules réagissent sur les caractéristiques à grande échelle de la convection. Nous nous bornons ici à décrire les propriétés des champs d'ondes électrostatiques, qui sont intimement liés aux paramètres locaux de plasma. Le rayonnement électromagnétique se trouve exposé au chapitre VII.

L'observation des ondes se fait, soit par la mesure de leur spectre au moyen d'une antenne dipôle, soit -de façon plus sophistiquée- à l'aide de la mesure du spectre croisé des signaux recueillis sur deux antennes.

Les méthodes d'excitation artificielle du plasma développées au CRPE sont principalement basées sur le sondage à relaxation, et sur le sondage à impédance mutuelle. La première méthode fournit un spectre de raies, qui détermine les fréquences correspondant aux modes de vitesse de groupe nulle, d'où on peut déduire directement les valeurs de la densité électronique ou du champ magnétique statique. La seconde méthode fournit un spectre continu, d'où on sait extraire, par comparaison avec les spectres théoriques, d'autres paramètres, tels que la température électronique.

En ce qui concerne la magnétosphère, l'analyse des données provenant des expériences embarquées sur les satellites GEOS et ISEE a été poursuivie. Les traversées des zones de transition que constituent la plasmapause, la magnétopause et l'onde de choc ont été tout spécialement étudiées (218). Les processus physiques liés au couplage ionosphère-magnétosphère ont également été étudiés par le biais de la participation du CRPE aux programmes de fusées sondes en zone aurorale "PORCUPINE" et "SUBSTORM-GEOS". Soulignons qu'avec le lancement imminent d'ARCAD 3, satellite polaire à orbite basse (500 - 2 000 km), le CRPE possède en ce domaine un ambitieux programme scientifique.

Dans de nombreuses données expérimentales issues de ces diverses expériences, il est apparu que l'interprétation ne pouvait être effectuée dans le cadre d'une théorie se restreignant à considérer le plasma comme Maxwellien. En conséquence, l'accent théorique a été tout particulièrement mis sur des études prenant en compte soit l'influence d'une population suprathermique, soit l'influence d'une vitesse de dérive ou d'une anisotropie de température. De plus, des travaux ont été entrepris dans le cadre de l'interprétation et de l'identification des résonances.

Enfin, il est clair que l'électrodynamique des régions aurorales est aujourd'hui un des problèmes clefs de la physique magnétosphérique. L'échelle des phénomènes met en jeu des couplages à la fois avec la haute atmosphère et avec les régions lointaines de la queue de la magnétosphère, ce qui rend l'observation ponctuelle isolée insuffisante dans nombre de cas. Le grand sondeur auroral EISCAT permettra prochainement de mesurer à partir du sol, les paramètres ionosphériques jusqu'à une altitude de l'ordre de mille kilomètres. Cependant les régions aurorales de plus haute altitude sont encore très peu connues, bien qu'elles semblent jouer un rôle fondamental dans le processus d'accélération des particules et dans la génération du rayonnement kilométrique terrestre. C'est pour cette raison que le CRPE a été amené à définir sa participation au projet suédois VIKING. Ce satellite prévu pour l'exploration des régions de latitudes invariantes $60° < \Lambda < 80°$, avec un apogée de 15 000 km, constituera un observatoire privilégié devant fonctionner en conjonction avec EISCAT.

VIII.1 MAGNETOSPHERE

Les méthodes actives de diagnostic du plasma froid magnétosphérique par les ondes suscitent un grand intérêt à travers le monde où nous sommes les seuls à les employer, à part une expérience japonaise récente. Elles sont maintenant considérées comme les meilleures méthodes de mesure de la densité du plasma froid.

VIII.1.1 Expérience "impédance mutuelle" sur GEOS 1-2

L'étude statistique des valeurs de densité et température sur GEOS 1 a permis une étude morphologique du plasma thermique au voisinage de la plasmapause équatoriale. Les variations globales de la densité mesurée en fonction du temps magnétique local, du paramètre de Mac Ilwain L, de l'indice d'activité a_m, peuvent être interprétées d'après les modèles adoptés actuellement pour la formation et la dynamique de la plasmapause, ainsi que pour le remplissage du côté jour de la

magnétosphère équatoriale par la source ionosphérique. Les données en température permettent de mieux caractériser l'origine du plasma. C'est ainsi, par exemple, que les observations d'une population relativement dense ($Ne \sim 10\ cm^{-3}$) et chaude ($Te \sim 10^5°K$) du côté nuit ou matin, pendant le développement d'un sous-orage, sont vraisemblablement liées à la pénétration de la couche de plasma jusqu'à l'orbite du satellite. De même, l'étude dynamique des corrélations entre la température et l'activité magnétique (figure 1) permet de valider le modèle de Lemaire sur la formation de la plasmapause (érosion côté nuit par la limite de Roche) préférentiellement aux schémas qui considèrent des lignes de convection ouvertes vers l'avant de la magnétopause (modèles de Kavanagh ou Grebowsky, par exemple). Dans la zone de remplissage diurne, la forte dispersion des températures observées et leur manque de lien clair avec la densité, restent à expliquer dans un modèle global qui tiendrait compte des différentes sources de plasma présentes (ionosphère, couche de plasma nocturne, plasma résiduel convecté) et de leurs interactions.

D'autre part, les données de GEOS 2 ont été dépouillées pour la période allant de août 78 à juin 79, et étudiées pour certains événements.

Enfin, le problème de l'interprétation des résultats dans les cas difficiles (présence de deux maxwelliennes, présence de champ magnétique) a été abordé.

VIII.1.2 Expérience "sondage à relaxation" (S301) sur GEOS 1-2

L'utilisation des mesures de densité électronique N_e obtenues sur GEOS-2 à l'orbite géostationnaire a été organisée pour satisfaire trois objectifs principaux. Premièrement on a procédé à une étude statistique de la distribution des valeurs de la densité N_e en fonction de l'heure locale : les résultats fournis par 130 jours consécutifs mettent en évidence des propriétés caractéristiques que les expériences antérieures menées dans la magnétosphère avec des instruments de type différent n'avaient pas permis d'appréhender. Cela tient beaucoup à la fiabilité et à la précision dont fait preuve la technique du sondage à relaxation, en particulier pour la mesure des plasmas peu denses ($N_e < 1\ cm^{-3}$) rencontrés souvent du côté nuit de la magnétosphère. L'interprétation des résultats relève de l'étude électrodynamique de l'environnement ionisé (phénomènes de convection magnétosphérique). On se reportera au chapitre du présent rapport qui lui est consacré pour trouver illustrations et commentaires. Deux communications (234, 266) et un article (517) sont relatifs à ces résultats.

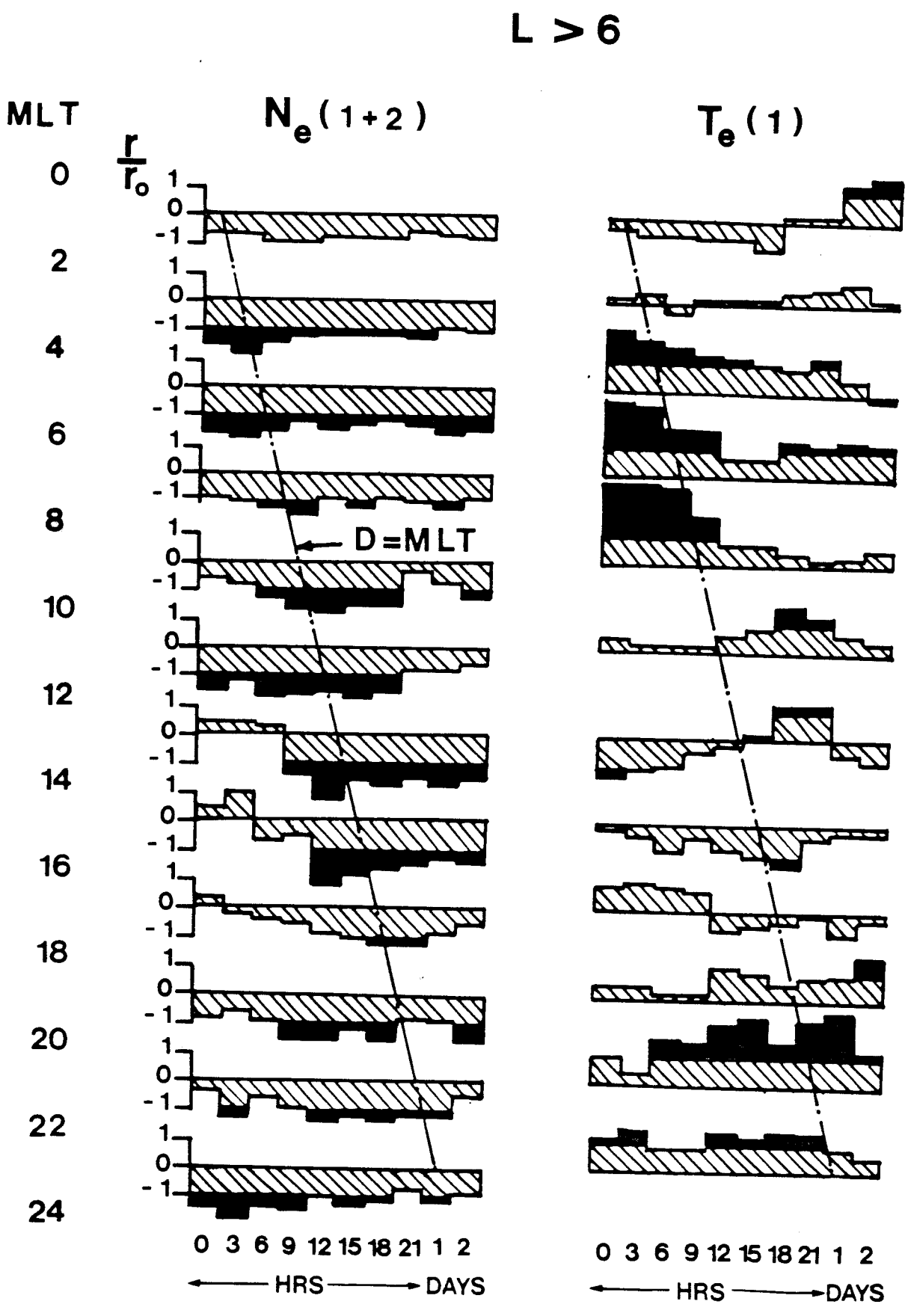


Figure 1 (VIII)

Figure 1 (VIII) : Ayant calculé le facteur de corrélation linéaire croisé normalisé, Γ/Γ_o, entre la densité (Ne) ou la température (Te) et les différents indices a_m observés sur une période de trois jours précèdent l'instant de mesure, nous avons porté les valeurs de Γ/Γ_o à L > 6 et pour différents secteurs horaires en temps magnétique local (MLT), en fonction du délai D entre la mesure et l'observation du a_m. La normalisation est faite de telle sorte qu'une valeur Γ/Γ_o supérieure à 1 signifie que la probabilité que les valeurs Ne(ou Te) ne soient pas complètement indépendantes des a_m est supérieur à 99 %. Les valeurs Γ/Γ_o presque toujours négatives pour Ne et le plus souvent positives pour Te indiquent que le plasma est de manière générale plus dense et plus chaud pendant les périodes actives.
Sur le panneau de gauche, on voit que le maximum de corrélation entre Ne et a_m dépend du délai D, suivant approximativement la loi D = MLT, en accord avec les idées courantes sur la dynamique de la plasmapause, qui placent l'action de l'activité magnétique sur le plasma vers minuit, son effet n'étant observé du côté jour qu'après que le plasma ait été convecté. Sur le panneau de droite, la présence d'une corrélation retardée dans le secteur 20-22 heures permet de pencher en faveur du schéma de Lemaire, qui admet une convection du plasma extérieur à la plasmapause depuis le secteur du matin jusque dans le secteur de nuit, où la limite de Roche crée la plasmapause par érosion. Le manque de corrélation Te - a_m observable dans le secteur de jour est vraisemblablement dû à la présence de plasma ionosphérique "frais".

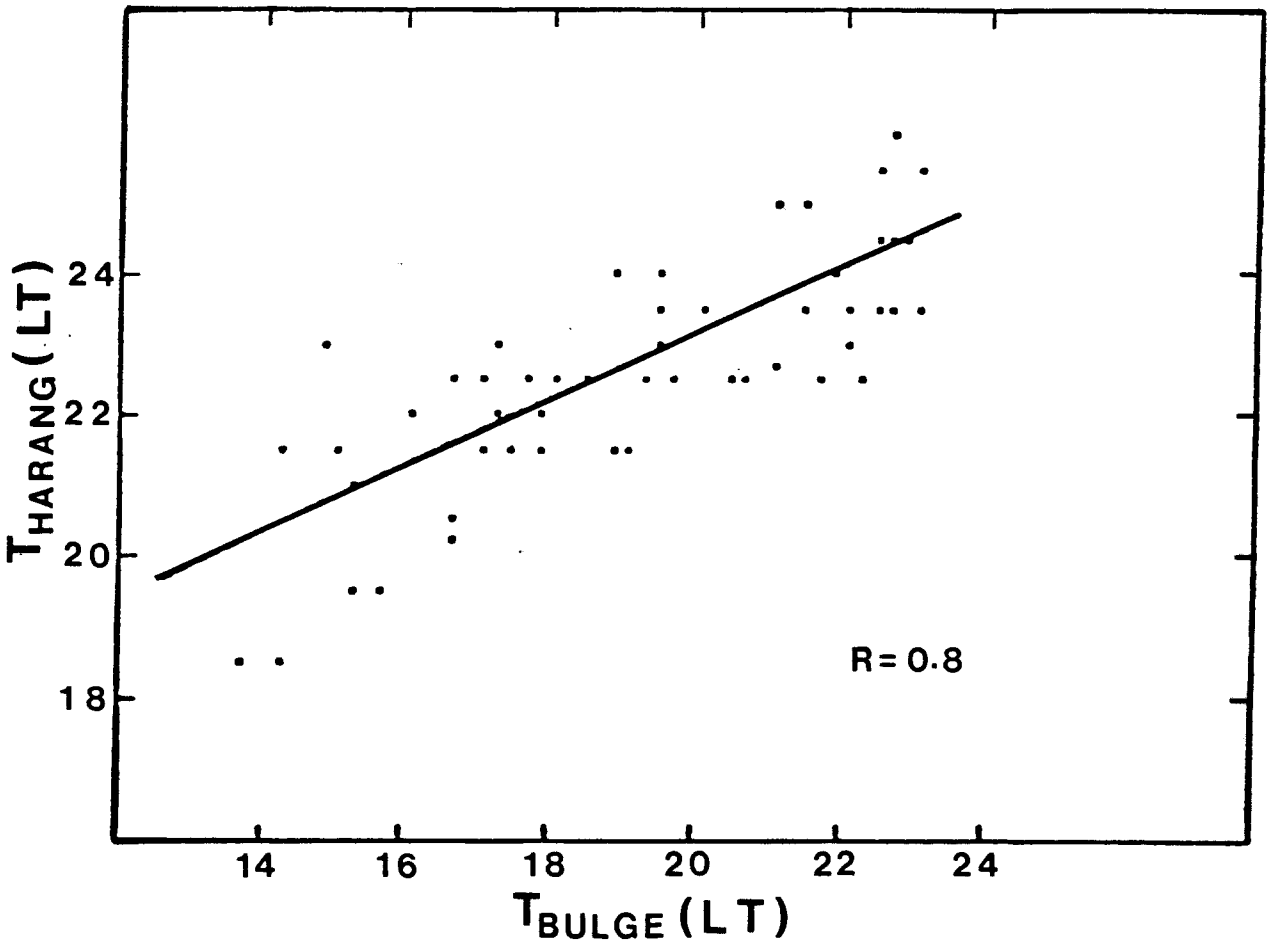


Figure 2 (VIII) : Corrélation entre les observations de la position en temps local de la frontière Est de l'excroissance plasmasphérique à 6.6 rayons terrestres (T_{Bulge}) et celles de la position de la discontinuité de Harang existant en zone aurorale (T_{Harang}). Les valeurs de T_{Bulge} sont déduites des mesures de la densité électronique N_e fournies par le Sondeur à Relaxation embarqué sur GEOS2. Elles correspondent à l'heure locale (LT) à laquelle la densité décroit brutalement (plasmapause) lorsque l'orbite géostationnaire du satellite sort par sa frontière "nocturne" (bord Est) de l'excroissance plasmasphérique (bulge) existant du côté soir. Les valeurs de T_{Harang} sont issues des mesures de dérive électronique réalisées dans la couche E ionosphérique en zone aurorale par le radar STARE (Scandinavian Twin Auroral Radar Experiment). Elles correspondent à l'heure locale pour laquelle est observé un renversement dans la convection aurorale (discontinuité de Harang). La zone visée par STARE contient la région de l'ionosphère aurorale magnétiquement conjuguée avec GEOS 2. L'interprétation de la corrélation significative (R = 0.8) entre les valeurs de T_{Harang} et de T_{Bulge} illustrée ici fait intervenir les liens respectifs des deux frontières concernées avec la frontière d'injection des particules, dite frontière de Mc Ilwain.

Le second objectif a été consacré à l'étude de situations individualisées caractéristiques observées dans la magnétosphère. D'une part, on a contribué à la préparation d'une nouvelle série d'Ateliers Coordonnés d'Analyses de Données ("CDAW") organisée par la NASA en participant à la sélection des jours-événements et en fournissant les profils journaliers correspondants de densité électronique et de champ magnétique. D'autre part on a développé, sur un cas typique d'apparition de gradient de densité très important en sortie de la plasmasphère, l'étude des effets diamagnétiques susceptibles de contribuer à l'interprétation de phénomènes semblables souvent observés dans les données GEOS 2. Le chapitre Electrodynamique de l'Environnement Ionisé montre les résultats correspondants et les replace dans le contexte adéquat. Au stade préliminaire de leur étude, ils ont fait l'objet d'une communication (234) dont les développements sont donnés dans un article (510).

Le troisième volet de l'aspect proprement géophysique des mesures du sondeur à relaxation de GEOS est constitué par la participation, en coopération principalement bilatérale, à des études focalisées sur des points particuliers de la physique magnétosphérique pour lesquels les mesures de la densité électronique et/ou l'identification de la région concernée de la magnétosphère qu'elles permettent de réaliser sont indispensables. La détermination in situ de la position de la plasmapause sont par exemple demandées par des équipes extérieures disposant d'autres mesures sur GEOS, pour contribuer aux études suivantes : apparition de distributions électroniques anormalement chaudes au bord interne de la plasmasphère en période de recouvrement de sous-orages (coopération avec le CESR, Toulouse), observations de ELF Hiss ou d'aurores pulsantes (coopération avec Sheffield University), observations de micropulsations de type Pc 5 dans le secteur 06 - 18 LT accompagnées de variations périodiques simultanées des flux d'électrons énergétiques (coopération avec Max Planck Institut, Lindau, RFA) et du champ électrique continu (coopération avec Max Planck Institut, Garching, RFA). Les variations de position en temps local de la discontinuité de Harang mesurées par le système radar STARE (Max Planck Institut, Lindau, RFA) opérant en zone aurorale ont été comparées avec celles de la position du bord Est de l'excroissance plasmasphérique ("bulge") mesurées par GEOS 2 : la corrélation positive obtenue (figure 2) fait l'objet d'une communication (537). Ces résultats mettent en évidence l'intérêt des études couplées magnétosphère-ionosphère aurorale, qui prendront leur plein essor avec les campagnes conjuguées GEOS 2 - EISCAT prévues en 1981. C'est vers le même objectif qu'est orientée la participation au programme suédois de satellite magnétosphérique polaire VIKING (1984), qui comportera une expérience de sondage à relaxation réalisée en coopération avec le Danish Space Research Institute de Copenhague (Danemark).

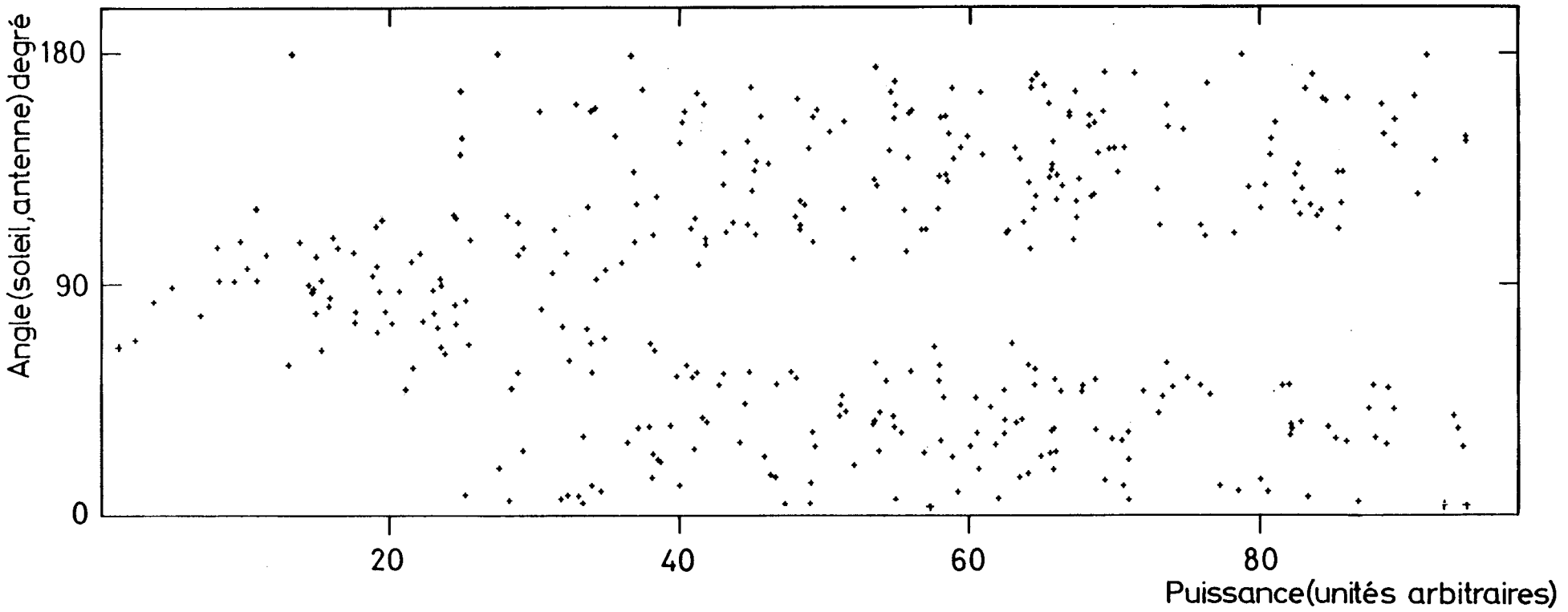


Figure 3 (VIII) : Etude de la directivité des résonances observées dans le vent solaire grâce à la sonde à relaxation du satellite ISEE A.
Le niveau du signal de résonance, détecté, sur une période de deux jours, dans le vent solaire, a été porté en fonction de l'angle entre l'antenne et la direction du soleil.
Le champ électrique de l'onde est essentiellement parallèle à la direction d'écoulement du vent solaire confirmant le fait que pour les fréquences considérées la propagation des ondes est isotrope et que leur vitesse de groupe est opposée à la vitesse d'écoulement.

Il convient enfin de rappeler que, à la suite de la défaillance du magnétomètre de GEOS 2 depuis mars 1979, la restitution de l'attitude du satellite par rapport au champ magnétique dépend des mesures de l'intensité de ce champ déduites des observations réalisées par le sondeur à relaxation S 301 : les opérations d'interprétation automatique en temps réel pratiquées sur les données par l'ordinateur HP 2100 installé à l'ESOC à Darmstadt (R.F.A.) et exploité sous la responsabilité du CRPE tiennent par conséquent un rôle prioritaire dans le dépouillement de toutes les mesures faites à bord du satellite.

VIII.1.3 Expérience sondage à relaxation sur ISEE

Un sondeur à relaxation, développé par le CRPE, a été embarqué à bord du satellite américain ISEE pour réaliser une étude expérimentale des résonances à grande distance de la Terre : vent solaire, magnétogaine, queue magnétosphérique. C'est la première fois qu'une telle étude, bien que préliminaire, est entreprise, et elle a suscité beaucoup d'intérêt. Nous avons pu montrer que, dans le vent solaire, la "résonance plasma" se produit au-dessus de la fréquence hybride haute et que, dans ces conditions, la propagation dans le repère lié au plasma est isotrope. La vitesse de groupe et le champ électrique de l'onde sont alors dirigés dans la direction d'écoulement du vent solaire. Nous avons pu le vérifier expérimentalement par une étude de la directivité de ces résonances (figure 3). La situation est la même dans la magnétogaine.

VIII.2 COUPLAGE IONOSPHERE-MAGNETOSPHERE

VIII.2.1 Expérience "PORCUPINE"

Ce programme ouest-allemand était consacré à l'étude des processus d'accélération des particules en zone aurorale, et s'est concrétisé par le lancement réussi de trois fusées sondes ARIES depuis la base de l'ESRANGE (Kiruna, Suède) : F2 en mars 1977, F3 et F4 en mars 1979.

Les données des expériences M.F. destinées à mesurer le courant d'électrons thermiques le long du champ magnétique ont été complètement traitées. Pour le tir F2 cette expérience a mal fonctionné et les causes de cet échec ont été soigneusement étudiées (529). Par contre pour F3 et F4, où le fonctionnement était nominal, les données ont été perturbées par un phénomène encore inexpliqué qui introduit une forte non-réciprocité et masque l'éventuelle présence des courants alignés.

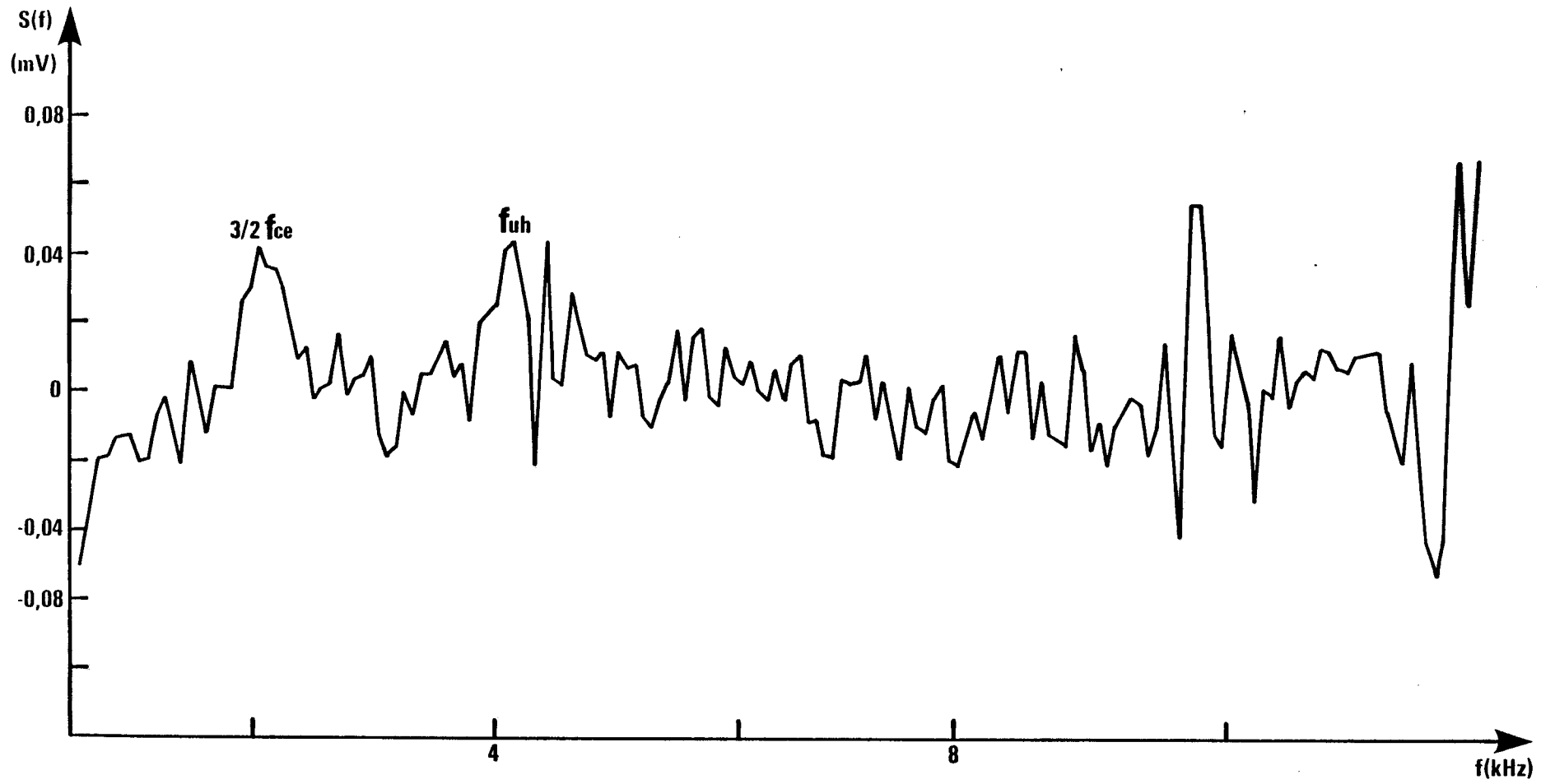


Figure 4 (VIII) : Résultat de la mesure du spectre croisé des signaux aléatoires reçus sur deux antennes dipôles durant l'expérience PORCUPINE (F3). Les principales émissions naturelles détectées sont obtenues à 3/2 f_b et à f_{uh}. Pour expliquer le niveau de ces émissions il faut prendre en compte non seulement la présence d'une population électronique suprathermique possédant une énergie de l'ordre de 40 % de celle portée par le plasma froid, mais également la présence d'une anisotropie en température ($T_\perp/T_{//} \simeq 2.$) pour les électrons suprathermiques précipitants.

L'excitation active des résonances H.F. du plasma, au moyen d'une sonde quadripolaire, a permis d'établir des profils de densité et de température électroniques. De plus pour F3 et F4, où la sonde était perpendiculaire aux lignes de force du champ magnétique, il s'est avéré que les ondes cyclotroniques électroniques pouvaient être excitées linéairement aux alentours des $(n + \frac{1}{2})f_{ce}$*. Le fait le plus surprenant est que pour des plasmas de faible densité ($f_{uh}/f_{ce} \leqslant 2$). Les amplitudes des ondes excitées aux alentours de 3/2 f_{ce} peuvent être plus grandes que celles observées aux fréquences caractéristiques du plasma (525).

En mode passif (figure 4), l'analyse du spectre croisé des signaux recueillis sur les deux antennes révèle la présence d'émissions naturelles aux alentours de 3/2 f_{ce} et de f_{uh}. Les niveaux d'amplitudes de ces émissions sont déterminés par l'interaction des ondes électrostatiques avec la population suprathermique du plasma auroral. Pour F3, l'énergie de ces suprathermiques représente 40 % de l'énergie du plasma froid, et ces électrons possèdent une anisotropie de température telle que $T_\perp / T_{//} \simeq 2$. D'autre part, on observe également des instabilités d'ondes engendrées par la création d'un plasma artificiel émis par une source de Xénon préalablement éjectée du corps principal de la fusée. Ces instabilités se produisent aux alentours de la fréquence oblique basse, de $(n + \frac{1}{2})f_{ce}$ et de f_{uh}.

L'ensemble de ces résultats a fait l'objet de deux articles (142, 526) et de deux communications (255, 256).

VIII.2.2 Caractérisation du plasma ionosphérique et des champs électrostatiques à bord du satellite ARCAD 3

Le satellite franco-soviétique ARCAD 3 sera lancé en 1981, avec à son bord plusieurs expériences françaises dont deux sous responsabilité CRPE : l'expérience ISOPROBE pour l'étude du plasma thermique (techniques des sondes à impédances et auto-oscillantes) et l'expérience TBF pour l'étude des champs d'ondes électriques et magnétiques de 0 à 16 KHz (responsabilité partagée avec le LGE-France et l'IZMIRAN-URSS).

L'analyse combinée des différentes expériences doit permettre d'étudier les instabilités de plasma (fluctuations de densité et de champ électrostatique) et le réseau de courants alignés (déplacement d'électrons thermiques et supra-thermiques, champ magnétique associé à ces nappes de courants).

*Dans ce chapitre f_{ce}, f_{pe} et f_{uh} désignent respectivement la gyrofréquence électronique, la fréquence plasma, et la fréquence hybride haute.

VIII.2.3 Expérience "SUBSTORM GEOS"

L'objectif scientifique de cette expérience était de déceler dans l'ionosphère aurorale une éventuelle résistivité anormale due à une turbulence du plasma, et ainsi de confirmer la validité des mesures simultanées de champs électriques parallèles au champ magnétique terrestre. L'instrument de mesure était une sonde à impédance mutuelle, fonctionnant à une fréquence fixe de l'ordre de 300 Hz. Le programme a comporté le lancement de trois fusées Black Brant à partir de la base de l'ESRANGE, le maître d'oeuvre étant le Suedish Space Corporation. Toutes trois ont été lancées le soir du 27 janvier 1979, pendant différentes phases de deux sous-orages successifs. L'instrument du C.R.P.E. a fonctionné correctement lors du premier et du troisième vol.

Les impédances de transfert du premier vol ainsi que la plupart de celles du troisième sont similaires à celles prévues pour un plasma stable. Ceci est en accord avec les mesures de champs électriques effectuées par les chercheurs de l'Institut Royal de Technologie à Stockholm, qui n'ont pas décelé la présence de champs parallèles. Toutefois, certaines observations du troisième vol indiquent des valeurs d'impédance beaucoup plus élevées. Ce résultat inattendu est vraisemblablement dû aux ondes ioniques acoustiques rayonnées par les électrodes émettrices de la sonde. Des travaux théoriques, appuyés par des expériences en plasma de laboratoire, ont démontré que le niveau des signaux induits par ces ondes sur les électrodes réceptrices dépend de l'état de polarisation de ces dernières. L'absence, lors du troisième vol, de tout courant de polarisation, circonstance connue par ailleurs, avait ainsi conduit au résultat constaté. A l'avenir, ceci pourrait être évité en appliquant aux électrodes des courants de polarisation adéquats. Ces travaux ont fait l'objet d'une communication (262).

VIII.3 METROLOGIE DES PLASMAS SPATIAUX

En ce qui concerne les "résonances" des sondeurs à relaxation, on sait qu'elles caractérisent les fréquences correspondant à des vitesses de groupe nulles (ou très faibles). Parmi elles, en dehors des gyroharmoniques (nf_{ce}) dont la fréquence ne dépend pas de la distribution des particules du milieu, nous avons montré que les fréquences plasma (f_{pe}) et hybride haute (f_{uh}) ne dépendent que de la densité totale des particules. Ceci justifie à posteriori l'utilisation de l'approximation hydrodynamique pour les calculs de propagation au voisinage de ces fréquences. Une

justification expérimentale, par ailleurs, peut également en être trouvée pour des plasmas dont l'énergie moyenne est de quelques keV (bord interne de la plasma sheet (510) (voir aussi au chapitre Electrodynamique du milieu ionisé). En revanche, en propagation perpendiculaire, la fréquence des maxima des courbes de dispersion (f_{qn}) dépendent de façon plus complexe de la forme de la fonction de distribution. Cette dépendance a été étudiée de façon théorique, et une méthode expérimentale a été développée, qui permet d'obtenir un diagnostic plus complet du plasma, isolant une population "froide" (quelques eV), maxwellienne ou non, et une queue d'électrons énergétiques (504). Outre les facilités qu'on peut espérer en tirer pour la calibration des diverses mesures de particules effectuées en satellite, cette méthode doit permettre de situer très précisément, par rapport aux fréquences caractéristiques du plasma, la fréquence de certaines émissions naturelles intenses qui sont observées dans la magnétosphère externe, aux environs de la fréquence plasma électronique. Nous pensons que cette localisation précise sera un élément expérimental essentiel pour la compréhension des phénomènes de génération de ces ondes.

C'est également dans le cadre de la métrologie des plasmas spatiaux qu'on a procédé à l'évaluation d'une méthode de mesure directe de la longueur d'onde grâce aux effets de directivité d'antenne observés sur les résonances reçues par sondage à relaxation. Cette étude a été le sujet d'une thèse de 3ème cycle (407). Les mesures obtenues permettent dans le cas des résonances à f_{qn} de déduire une estimation de la température électronique, du moins lorsque la séquence de mesure n'est pas perturbée par l'apparition de variations des conditions de propagation, par exemple par suite de variations de la densité électronique. Pour l'acquisition des données adéquates, une procédure opérationnelle du sondeur à relaxation a été développée et exploitée en routine en mettant à profit les capacités du système de poursuite automatique pilotée par calculateur implanté à l'ESOC à Darmstadt (RFA) (figure 5). En coordination avec cet aspect de la métrologie des plasmas spatiaux par sondage à relaxation et avec les études sur la physique des résonances (cf. paragraphe VIII.5), on a poursuivi le développement des méthodes d'analyse des caractéristiques spectrales des signaux de résonance. Les premiers résultats confirment l'existence quasi systématique dans le cas des résonances à f_{qn} d'une structure fine dont l'interprétation devrait contribuer à l'identification de la part prise par les différents mécanismes de résonance possibles (figure 6).

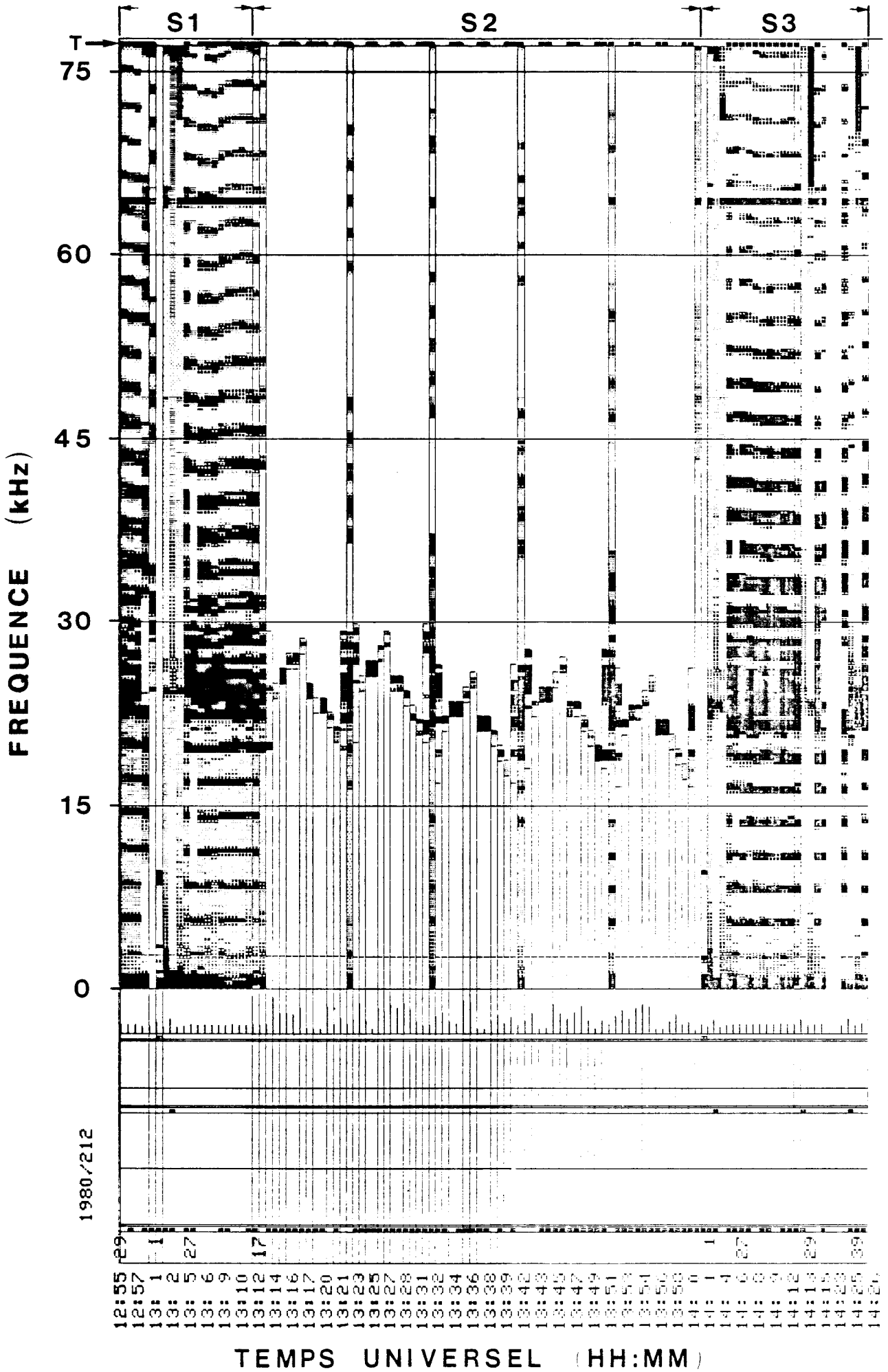


Figure 5 (VIII)

Figure 5 (VIII) : Spectrogramme des résonances de plasma observées par l'expérience de sondage à relaxation S 301 du satellite GEOS 2, avec exécution de plusieurs séquences successives de poursuite automatique pilotée en temps réel par calculateur au sol.
Pour chacun des balayages en fréquence (axe vertical) réalisés au cours de cette séquence générale de fonctionnement (le temps universel sur l'axe horizontal), on a représenté par un code de grisés la puissance spectrale des signaux de résonance observés. Les lignes de rappel verticales indiquent les changements de configuration dans le balayage en fréquence. Cet exemple se décompose en 3 séquences principales, repérées par S_1, S_2, S_3 et datées respectivement 12.55 - 13.12, 13.12 - 14.00, 14.00 - 14.25 en heures minutes TU.
Pendant la première et la troisième séquences S_1 et S_3, lorsque le sondeur est en mode actif (marque noire, ligne T, au bord supérieur du spectrogramme) avec balayage complet (77 à 0.3 kHz), on reconnaît les différentes résonances de plasma : en partant des fréquences basses, on observe d'abord la série des nf_{ce} (harmoniques de la gyro-fréquence électronique, n = 1, 2, 3,...) puis, au-dessus de la fréquence de plasma f_{pe} (première résonance non harmonique), la série des f_{qn} (maximas des modes de Bernstein) qui viennent s'intercaler dans la continuation de la série des nf_{ce}. Pour les ordres n de rang élevé (hautes fréquences) les nf_{ce} et les f_{qn} sont si proches que la résolution en fréquence de ce type de tracé ne permet plus de les distinguer.
La seconde séquence S_2 (13.12 - 14.00) est formée de 5 sous-séquences successives de poursuite automatique, dite "tracking". A cause de l'intérêt majeur présenté par les différentes résonances autour de la fréquence de plasma, à la fois pour l'étude de la propagation des ondes électrostatiques artificielles ou naturelles à vecteur d'onde perpendiculaire au champ magnétique terrestre, et pour l'étude des fluctuations spatio-temporelles des paramètres du plasma, on restreint le balayage en fréquence à une gamme très étroite (1.2 kHz) placée successivement autour de chacune des résonances observées dans la zone des fréquences concernées. La cadence d'échantillonnage ainsi obtenue pour leur observation est de 1 mesure toutes les 344 millisecondes, c'est-à-dire, en termes d'orientation de l'antenne dans le plan perpendiculaire au champ magnétique, de 1 point tous les 20 degrés, ou encore, en termes de fluctuations temporelles (respectivement spatiales) des paramètres du milieu, d'une fréquence de Nyquist voisine de 1.5 Hz (respectivement longueur de Nyquist voisine de 2 km). En comparaison, les performances obtenues en gardant le fonctionnement avec balayages complets répétés de toute la gamme de fréquences (cf. S_1 et S_3) sont les suivantes : d'une part un peu plus de 6 minutes (au lieu de 6 secondes ici) sont nécessaires pour obtenir la même couverture angulaire en orientation de l'antenne pour réaliser les études de directivité des ondes électrostatiques par rapport au champ magnétique. Or en 6 minutes, le risque est grand de voir se produire des variations dans les caractéristiques de milieu suffisamment significatives pour compromettre les qualités d'homogénéité nécessaires à ce type d'étude (cf. les variations observées pendant la première séquence S_1). D'autre part, l'étude du spectre des fluctuations temporelles (spatiales) des paramètres descriptifs du milieu (densité, champ magnétique, vitesse de dérive) est alors limitée à 0.023 Hz (respectivement 130 km) au lieu de 1.5 Hz (respectivement 2 km), soit un gain de presque deux ordres de grandeur.
Ce sont 5 sous-séquences successives de ce type, d'environ 8 minutes de durée chacune, qui constituent la séquence principale S_2 (13.12 - 14.00) du spectrogramme représenté ici. Elles sont déclenchées et pilotées de façon entièrement automatique par un mini ordinateur qui, sous la responsabilité de l'expérimentateur, traite en temps réel les données reçues à la station GEOS mise en oeuvre par l'ESA/ESOC à Darmstadt (RFA). Ce traitement consiste à appliquer un processus de reconnaissance de formes qui identifie les différentes résonances observées, puis à envoyer à destination du satellite les télécommandes adéquates à leur poursuite automatique selon des configurations expérimentales variées, et enfin à replacer l'expérience dans son état initial lorsque la sous-séquence est terminée pour pouvoir en déclencher une autre. Pendant chaque sous-séquence de ce type (8 minutes), environ 50 Megabits de données brutes sont comprimés et traités en temps réel, et 152 télécommandes gérées et émises par le programme traitement, soit une moyenne de 1 télécommande toutes les 3 secondes.
L'exemple présenté ici illustre les capacités opérationnelles dont a été doté le système constitué par le satellite GEOS et la station de réception et traitement des données.

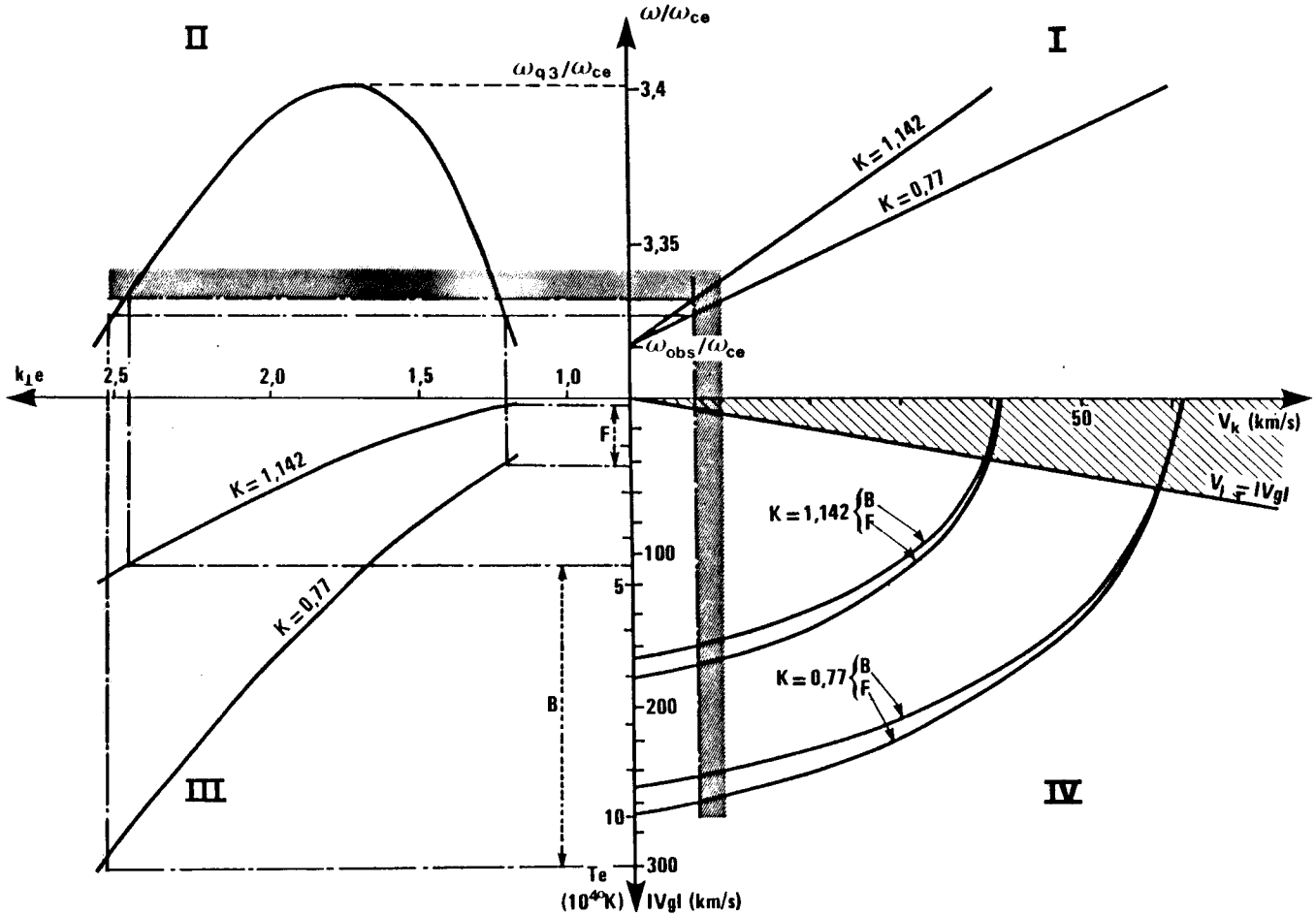


Figure 6 (VIII) : L'observation par le sondeur à relaxation de GEOS en mode actif de réponses résonnantes remarquablement bien structurées au voisinage des fréquences f_{qn} (cf. I-3.1) a permis d'étudier les caractéristiques du champ d'ondes électrostatiques reçues (Alain Frécaut, Thèse de 3ème cycle, (9)). La figure 6 montre l'exploitation qui peut être faite de cette analyse pour guider les études théoriques sur la propagation des ondes électrostatiques au voisinage de ces résonances.
La figure est décomposée en 4 quadrants (I, II, III, IV). Le quadrant I traduit simplement le fait que la fréquence reçue est décalée par effet Doppler du fait du mouvement du satellite : il y a donc une relation linéaire entre la fréquence (ordonnées) et la vitesse du satellite (projetée sur le vecteur d'onde des ondes reçues) (abscisses).
L'étude des propriétés de directivité du champ électrostatique reçu permet une estimation du nombre d'onde k compris entre deux valeurs extrêmes ici 0.77 et 1.142. A une vitesse du satellite correspond donc un domaine de fréquences émises. Ces valeurs reportées dans l'équation de dispersion (quadrant II) donnent deux domaines de valeurs admissibles pour le paramètre $k\rho$ où ρ est le rayon moyen de giration des électrons dans le champ magnétique ambiant. Deux domaines de température T_e peuvent rendre compte de ces deux possibilités puisque ρ est une fonction simple de T_e (quadrant III). On peut enfin déduire deux domaines pour la vitesse de groupe des ondes reçues (quadrant IV). Dans le cas présent ces vitesses sont de l'ordre de quelques centaines de km/s ce qui tend à confirmer un mécanisme de propagation de type "écho oblique", par opposition à un mécanisme de type "onde accompagnant le satellite".

VIII.4 TRAITEMENT DU SIGNAL

Précision de la mesure des paramètres d'un plasma

La technique de diagnostic des plasmas utilisée est fondée sur la mesure directe, au moyen d'antennes dipôles, des micro-champs électriques liés aux mouvements thermiques des particules chargées. Le problème que l'on s'est posé est relatif au temps nécessaire pour mesurer le spectre fréquentiel de ces micro-champs avec une précision adéquate, temps qui doit être minimal surtout lorsque l'application de cette technique a lieu dans l'espace. Dans ce but, nous avons développé une méthode statistique permettant de chiffrer les limites fondamentales de ce temps de mesures, limites dues au caractère stochastique des signaux reçus sur les antennes. Elle montre que celles-ci sont au moins cent fois inférieures au temps précédemment admis, qui était de l'ordre de quelques secondes. On en déduit qu'en améliorant les techniques d'analyse de signaux, on pourrait se rapprocher de ces temps limites, et ainsi mieux s'adapter aux expériences spatiales. Ces études ont fait l'objet d'une thèse de 3ème cycle (503).

VIII.5 PHYSIQUE DES RESONANCES

La compréhension des phénomènes physiques magnétosphériques et leur modélisation nécessitent des données expérimentales précises et détaillées. Les méthodes de diagnostic que nous avons développées ces dernières années se sont révélées efficaces pour obtenir des mesures précises de la densité et de la température des électrons dans des régions où leur fonction de distribution peut être considérée comme maxwellienne. Cela a été le cas dans l'ionosphère équatoriale (expérience en fusée CISASPE - KOUROU) et dans de grandes portions d'orbite du satellite magnétosphérique GEOS.

Toutefois, des difficultés sont apparues dans le cas de plasmas peu denses où le champ magnétique terrestre a une influence prépondérante et dans le cas où les électrons ont une fonction de distribution fortement anisotrope ou bien maxwellienne décalée. Ces difficultés nous ont conduit à développer notre recherche dans ce domaine, en particulier par une étude plus fine des ondes cyclotroniques et de leur contribution aux résonances observées expérimentalement ainsi qu'aux effets de dérive.

Les études théoriques et expérimentales entreprises antérieurement sur les propriétés de dispersion et de rayonnement des ondes cyclotroniques ont abouti à plusieurs publications (129, 130) et communications (229, 242, 243). Le principal aspect des résultats est le bon accord entre théorie et expérience en ce qui concerne les propriétés dispersives de ces modes et leur rayonnement quasi parallèle, oblique ou perpendiculaire au champ magnétostatique. La connaissance des relations de dispersion, relativement aisée au regard du calcul des réponses de sondes en régime forcé est suffisante pour certains diagnostics de plasma comme ceux effectués à l'aide d'un sondeur à relaxation (donnant la densité électronique n_e) ou comme ceux effectués à l'aide d'une sonde dipolaire. Ce dernier cas a fait l'objet d'une expérience dans le caisson à plasma du CRPE visant à définir un instrument dont les mesures sont simples à interpréter et permettant d'accéder à n_e et à la température électronique T_e. Les études sont également indispensables pour la compréhension de phénomènes géophysiques naturels tels que les émissions ayant lieu entre harmoniques de la gyrofréquence électronique $\left[(n + \frac{1}{2})f_{ce}\right]$.

Les calculs numériques du potentiel électrostatique émis par une source pulsante ponctuelle au voisinage de la résonance oblique basse ont été étendus en utilisant l'approximation des pôles dominants au cas d'un plasma stationnaire peu dense (152) ainsi qu'en présence de forts courants alignés (505). Le programme de calcul relatif à cette résonance dans un plasma stationnaire sera publié dans une revue spécialisée (533). Les conditions d'excitation des résonances plasma et hybride haute par un dipôle élémentaire, en fonction de son orientation et des caractéristiques du plasma, ont été étudiées (532). Ces calculs numériques rendent bien compte des caractéristiques de rayonnement du mode cyclotronique électronique, en particulier des structures de courbes équipotentielles et de courbes de phase constante déterminées expérimentalement. Une approche analytique a également été réalisée (534). Ils rendent également compte des courbes expérimentales de l'expérience IPOCAMP1 et de la dépendance théorique des extrèma de ces courbes en fonction de la température (509). Par ailleurs, on a calculé l'impédance de transfert entre deux dipôles, numériquement et sans faire l'approximation des pôles dominants ; le résultat, appliqué aux données de l'expérience PORCUPINE a montré que suivant les caractéristiques du plasma, le maximum de l'impédance peut avoir lieu aux fréquences f_{cyl}, f_{uh} ou f_q (respectivement fréquence pour laquelle la surface d'indice du mode cyclotronique est cylindrique, fréquence hybride haute et fréquence des modes de Bernstein à vitesse de groupe nulle). La structure fine de la courbe de réponse en fréquence permet de déterminer la température avec précision (525).

Une étude détaillée de l'effet de dérive du plasma sur le mode électrostatique a été réalisée dans des conditions de plasma sans champ magnétique représentant le vent solaire : les modes dominants se trouvent déformés en bon accord avec des expériences réalisées précédemment et, pour des grandes valeurs de la vitesse de dérive, il se forme un mode de faisceau chaud (244, 520).

En outre, divers travaux sont en cours : influence de l'anisotropie des fonctions de distribution sur l'excitation des ondes cyclotroniques, ainsi que, dans le domaine ionique, l'étude de la génération d'ondes par un faisceau de Xénon injecté dans le plasma ionosphérique lors de l'expérience PORCUPINE (230).

Enfin, pour obtenir une meilleure définition spatio-temporelle des fluctuations de densité et température électronique, nous avons développé un nouveau mode de fonctionnement de nos sondes qui permettra avec le satellite polaire ARCAD 3 de mieux définir les zones de turbulence ou de courants alignés nécessaires aux modèles théoriques.

IX. PHYSIQUE THEORIQUE ET MODELISATION

IX.1 SIMULATION SUR ORDINATEUR DES PLASMAS FORTEMENT CORRELES

M. Navet, E. Jamin, M.R. Feix en collaboration avec Ph. Choquard, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.

L'année 1980 a vu se terminer les études sur les systèmes Coulombiens unidimensionnels. Plusieurs points restaient à élucider ; notamment :

- le rôle des conditions aux limites dans la formation du "cristal de Wigner" prévue par la théorie et retrouvée sur les expériences numériques. Comme on pouvait s'y attendre cette "cristallisation" n'apparaît sur la densité à une particule que dans le cas d'un mur rigide et disparaît pour des conditions périodiques alors que, bien entendu, la fonction de corrélation de deux particules reste dans ce dernier cas une fonction de $x_1 - x_2$ présentant une oscillation de période n^{-1} (n densité).

- le concept de polarisation du plasma dans un champ extérieur. Cette dernière, selon Lenard, présentait une périodicité avec le champ appliqué, en ce sens que la polarisation par élément de volume oscillait entre une valeur positive et négative. La microphysique du phénomène révèle que le champ extérieur polarise les paires électrons-ions qui constituent l'essentiel du plasma fortement corrélé. Toutefois, lorsque ce champ dépasse un certain seuil, une paire électron-ion se dissocie et des charges superficielles de signes opposées apparaissent sur les deux murs. La polarisation volumétrique change de signe cependant que 2 charges opposées sont maintenues dans le voisinage des murs. Lorsque le champ extérieur augmente, la polarisation commence par diminuer (le champ total étant de signe contraire au champ extérieur) puis s'annule et enfin augmente jusqu'à rupture d'une nouvelle paire et le processus recommence. Il y a donc transfert d'une polarisation en volume à une polarisation par apparition de charges superficielles. Cette dernière étude met, bien sûr, en oeuvre des codes de dynamique moléculaire.

D'autre part, l'étude des systèmes bidimensionnels a été lancée et des résultats ont déjà été obtenus. La méthode utilisée est la méthode de Monte Carlo avec un nombre de particules pouvant atteindre 200. On travaille avec une seule composante plus un fond continu, neutralisant, homogène et immobile. Les conditions

aux limites correspondent soit à des murs parfaitement réfléchissant, de forme circulaire ou carré, soit à des particules maintenues sur une frontière hexagonale simulant un milieu infini. Le potentiel est, soit un potentiel bidimensionnellement "orthodoxe" (en - log r), soit celui correspondant à des points chargés confinés sur une surface (en r^{-1}). On a tout d'abord repris la théorie usuelle qui prévoyait une pression négative pour ν (constante de couplage) supérieure à 4 et on a montré que, de même qu'en une et trois dimensions, c'est seulement par la modification de la densité aux environs des parois que s'introduit la correction à la pression d'un gaz parfait, correction qui, bien sûr, conserve la positivité de la pression totale. L'étude de la densité n(r) dans le cas de fort couplage indique une structure cristalline qui prend naissance au voisinage du bord et qui se propage vers l'intérieur. N est actuellement trop petit pour savoir si la structure cristalline subsiste pour $N \to \infty$ ou reste un simple effet de bord.

Trois publications (112, 113, 135) ont résulté de ces travaux. D'autres sont en préparation.

IX.2 SIMULATION NUMERIQUE DES "DOUBLES COUCHES"

Dans un plasma non collisionnel, des conditions limites ad-hoc fixées dans un plasma de faible dimension permettent d'obtenir une solution stationnaire avec un saut de potentiel. La plupart des simulations numériques consacrées au problème des doubles couches s'appuient sur cette remarque. De ce fait, elles sont mal adaptées à la description de phénomènes d'accélérations qui pourraient se produire à l'échelle de la longueur de Debye au sein des arcs auroraux.

Nous nous sommes attaqués depuis 2 ans au problème plus réaliste (mais plus délicat) de l'apparition à partir d'une situation turbulente (instabilité de courant) de structures de potentiel localisées. Les résultats obtenus l'an dernier ont été améliorés de manière importante :

- l'étude de la dynamique des structures organisées (saut de potentiel et de densité importants) a permis de comprendre le mécanisme physique qui conduit à leur création ;

- une simulation fondée sur un code plus coûteux, mais moins "bruyant" : le code Vlasov a été mis en oeuvre avec succès. Elle confirme les résultats précédents et

en particulier le fait que les structures observées ne sont pas des artefacts dus au bruit des codes "particules".

Ces travaux sont réalisés en collaboration avec le Centre de Physique Théorique de l'Ecole Polytechnique.

IX.3 THEORIE DES GROUPES ET PHYSIQUE NON LINEAIRE

IX.3.1 Théorie des faisceaux d'électrons

M.P. Moraux, M.R. Feix

Ces méthodes des groupes d'invariance et de quasi-invariance ont été appliquées au problème de l'évolution bidimensionnelle d'une population d'électrons dans un champ magnétique variant avec le temps (avec symétrie cylindrique). Dans le cas d'un champ magnétique décroissant comme t^{-1} une solution self similaire peut être obtenue qui généralise pour la condition $2\omega_p^2/\omega_c^2 > 1$ la solution flot de Brillouin (qui elle n'existe que pour une inégalité de sens contraire). Dans le cas où initialement le champ magnétique est trop faible pour maintenir le plasma et où, de plus, B décroît en t^{-1}, une expansion auto-semblable est solution. Deux publications sont en cours. Enfin ces résultats forment une partie de la Thèse de 3ème cycle de M.P. Moraux, soutenue en juin 1980 (409).

IX.3.2 Equation de Schroedinger pour un pulse de potentiel

M.R. Feix, P. Bertrand, G. Mourgues, J.C. Andrieux

Soit un pulse de potentiel défini par les constantes caractéristiques de temps, de distance et de potentiel respectivement T, Δ et Φ. L'application de transformations de redimensionnement montre l'existence de deux paramètres caractérisant le problème. Le premier $C = \Phi T^2/m\Delta^2$ indique dans quelle mesure le pulse peut être considéré comme instantané ou encore dans quelle mesure la variation temporelle de potentiel ressentie est due au terme de convection (mouvement de la particule) ou à la variation explicite avec le temps du potentiel. C = 0 indique que le pulse peut être considéré comme instantané (sudden approximation). Le deuxième paramètre $A = \Phi T/h$ indique dans quelle mesure le problème est classique $A \gg 1$ ou quantique $A \sim 1$. Une étude numérique sur un potentiel de la forme

$$\varphi = \varphi_o \cos kx (2\pi)^{-1/2} \exp - t^2/2T^2$$

indique dans l'espace des paramètres AC comment les différentes limites sont obtenues. De plus le cas C = 0 (sudden approximation) est interprété dans le formalisme de la fonction de distribution de Wigner. Il est alors montré que l'application d'une impulsion de Dirac en temps (arbitraire quant à sa dépendance spatiale) donne strictement pour les 3 premiers moments de la fonction de Wigner les résultats de la physique classique, c'est-à-dire : 1° la densité avant et après l'impulsion est la même, 2° la quantité de mouvement locale est augmentée de sa valeur classique, 3° la dispersion quadratique reste la même. Par contre, il est bien connu qu'une microstructure apparaît en mécanique quantique puisque la distribution de Wigner prend parfois des valeurs négatives.

Enfin, ce problème nous a inspiré un schéma numérique de résolution de l'équation de Schroedinger dépendant du temps. Nous décomposons le potentiel en une série d'impulsions de Dirac et remarquons que nous savons résoudre le problème du mouvement entre deux impulsions (déphasage dans l'espace des k) ainsi que le problème de l'impulsion (déphasage dans l'espace des x). L'utilisation de transformées de Fourier rapides permet un passage d'un des espaces à l'autre. Cette philosophie consistant à modifier le modèle pour pouvoir résoudre exactement rappelle celle du Multiple Water Bag que nous avons jadis utilisé avec succès comme modèle numérique dans les études de plasma. Une publication est résultée de ces travaux (105), une autre est en cours.

IX.3.3 Invariants adiabatiques pour des puits de potentiel variant avec le temps

J.R. Burgan, A. Munier, M.R. Feix

Nous prenons l'exemple d'un potentiel infini à l'extérieur et nul à l'intérieur d'une boîte unidimensionnelle présentant un mur fixe et dont la dimension varie comme $(1 + \Omega t)^{\alpha}$. On avait montré (voir rapport de l'an dernier) que le cas $\alpha = 1/2$ était susceptible d'un traitement par les transformations auto-semblables tandis que $\alpha = 1$ se traitait par quasi-invariance.

D'autre part, pour $\Omega \to 0$ il existe au départ un invariant adiabatique. Toutefois dans le cas $\alpha > 1$ cet invariant cesse d'être valable après un certain temps. Ceci se conçoit aisément si l'on remarque que $\alpha > 1$ correspond à un mur qui s'accélère cependant que les particules après un certain temps ne reviennent plus frapper le mur mobile et conservent alors leur énergie cinétique. Toutefois ce n'est pas $\alpha = 1$ qui constitue le cas limite pour la conservation de l'invariant adiabatique quel que soit le temps mais bien le cas $\alpha = 1/2$ qui donne justement en mécanique quantique la solution auto-semblable. Il y a là un intéressant exemple de l'interprétation plus

précise du concept d'invariant adiabatique par la mécanique quantique. Enfin la quasi-invariance permet de prédire le comportement curieux des particules dans le cas $1/2 < \alpha < 1$. Après un certain régime transitoire les particules heurtent le mur mobile, perdant de l'énergie mais gardant la même direction de vitesse et par conséquent restant dans le voisinage de ce mur qu'elles rattrapent donnant lieu à une nouvelle perte d'énergie toujours sans changement de la direction de vitesse, le processus recommençant indéfiniment ; on a pu en étudiant la série des vitesses vérifier ce comportement. Une publication (111) en est résultée, une autre est en cours.

IX.3.4 Dynamique stellaire

A. Munier, J.R. Burgan, D. Lynden Bell (Cambridge), M.R. Feix

On a étudié les expansions auto-semblables pour des systèmes hydrodynamiques à symétrie cylindrique ou sphérique décrits par les lois de Poisson, continuité, Euler et une relation isentropique caractérisée par un rapport γ des chaleurs spécifiques (ce modèle représentant une étoile variable). Des solutions auto-semblables existent pour le cas $\gamma = 4/3$ avec une expansion en $(1 + \Omega t)^{2/3}$ et, ce qui est important, des systèmes initiaux limités dans l'espace (très souvent les solutions auto-semblables impliquent des systèmes infinis et par conséquent des échanges, à l'infini, de matière et d'énergie d'interprétation délicate). Une relation est obtenue entre constante de temps permissible Ω^{-1} et la fréquence de Jeans de l'état initial (pour une densité homogène). Enfin, il est aussi possible d'obtenir des solutions impliquant un effondrement de l'étoile en un temps fini avec une loi en $(1 - \Omega t)^{2/3}$.

Le concept de quasi-invariance a été alors utilisé pour étudier ce qui se passe lorsque $\gamma \neq 4/3$ avec l'idée que les solutions self similaires sont de par leur nature des solutions "pivots". Les résultats sont encore préliminaires et conduisent à considérer une nouvelle hydrodynamique où nous devons prendre en considération des forces fictives traduisant les transformations de l'espace des phases. Toutefois, il apparaît que pour $\gamma < 4/3$ les forces de gravitation voient leur rôle diminuer avec le temps (impliquant une expansion du système) tandis que pour $\gamma > 4/3$ on peut envisager des cassures du système, les parties internes s'effondrant vers le centre tandis que les parties externes finissent par s'éloigner indéfiniment.

Enfin, signalons la solution du problème d'une particule dans le champ gravitationnel d'une masse variant avec le temps comme $(1 + \Omega t)^{-n}$. Le cas $n = 1/2$ est traité à l'aide des groupes de transformation auto-semblables et le cas $n = 1$ à l'aide des transformations canoniques généralisées. La solution asymptotique est fournie dans

les autres cas par les méthodes de quasi-invariance et de nouveau on peut montrer que c'est bien le cas n = 1/2 (où l'on peut obtenir une solution auto-semblable) qui est le cas pivot. Pour n < 1/2 la particule reste constamment sous l'influence du champ gravitationnel aussi faible soit-il (car sa vitesse devient également très faible) tandis que pour n > 1/2 elle lui échappe après un certain nombre de rotations. Une publication est parue en 1980 (134). Une autre est en cours. Ces résultats ont été incorporés dans la Thèse d'Etat d'A. Munier, soutenue en avril 1980 (410).

IX.4 STRUCTURE ET SIMULATION DES RESEAUX DE CONNEXION

E. Bonomi, J.L. Lutton, M.R. Feix

Nous avons continué l'étude des réseaux de connexion (système réseaux de Clos à étage) en généralisant les résultats obtenus pour 3 étages à un nombre quelconque d'étages. En particulier, nous avons obtenu les formules de probabilité de blocage pour un réseau à 2n + 1 étages en utilisant le concept d'extensivité développé l'an dernier. La théorie est asymptotique en ce sens qu'il est nécessaire que N soit grand ainsi que n qui varie comme $Log_2 N$ (en fait la théorie marche bien dès que n = 3, c'est-à-dire pour 7 étages). Les simulations numériques ont donné un excellent accord avec les formules théoriques.

Toutefois, notre effort a surtout porté sur les nouvelles structures et philosophie de connexion.

Une première modification consiste à ne pas simplement accepter ou rejeter une demande de connexion mais à la mettre en attente et à la satisfaire dès que cela est possible. L'intérêt de cette stratégie dépendra de la distribution des temps d'attente. La simulation indique une distribution exponentielle avec des temps d'attente moyens qui sont toutefois nettement inférieurs à la durée moyenne d'une conversation, ce qui rend cette stratégie attractive.

Une autre étude a porté sur les réseaux en boucle. Il s'agit d'une ligne circulaire sur laquelle l'information circule (ordinairement dans un seul sens). N stations sont branchées qui peuvent émettre seulement si un blanc passe devant ou si un paquet leur est destiné. L'idée est d'avoir un système totalement déhiérarchisé et non supervisé, les stations émettant dès qu'elles peuvent.

Nous avons montré qu'étant donnée la distribution de probabilité du trafic pour chaque station, on pouvait en déduire une intensité de trafic par station et donc finalement une matrice de trafic optimum en ce sens que la boucle est en tout point saturée. Si chaque station émet un peu moins que le maximum autorisé, le trafic reste fluide. Cependant, l'étude révèle que certaines stations sont en situation dominante et peuvent, au détriment de certaines autres, écouler un trafic supérieur. De plus des alliances peuvent se former. Comme le trafic peut varier dans de larges limites, il est nécessaire d'imposer des règles d'émission simples qui permettent au stations d'écouler leur trafic si celui-ci est inférieur à un trafic préalablement décidé et éventuellement un trafic supérieur dans la mesure où certaines des autres stations ne désirent pas écouler leur trafic normal. La stratégie consiste pour les stations dominantes à "passer la main" assez souvent aux stations dominées suivant des fréquences à établir. On notera une certaine similitude avec des problèmes de jeux et de recherche opérationnels. Une publication (109) est résultée de ces travaux, deux autres sont en cours. E. Bonomi a soutenu une Thèse de 3ème cycle sur les réseaux de connexion en novembre 1980 (404).

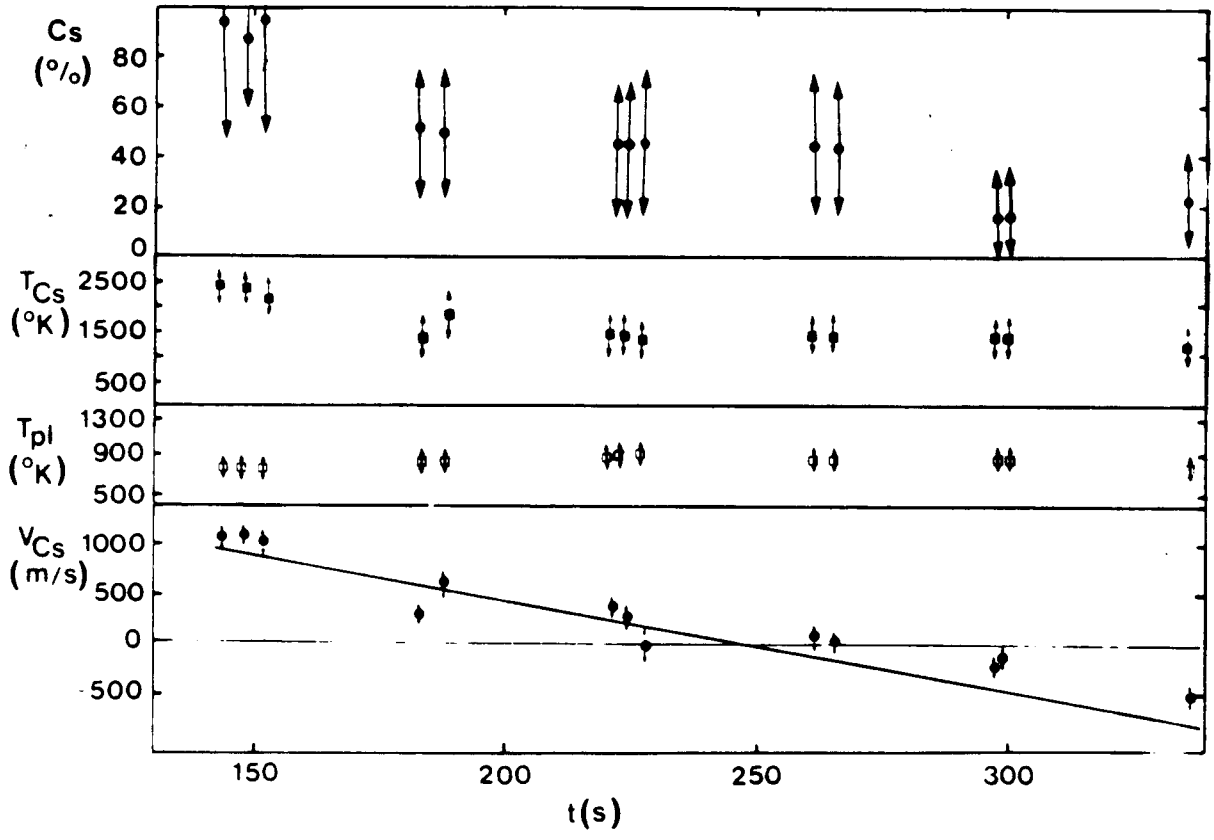


Figure 1 (X) : Concentration (%), température (T_{Cs}) et vitesse des ions cesium le long du champ magnétique (V_{Cs}) ainsi que température (T_{pl}) du plasma ionosphérique mesurés au niveau du nose cone par les analyseurs à potentiel retardateur. Les grandes barres d'incertitudes sont dues à la difficulté de déterminer si le plasma de cesium est dense mais froid ou peu dense mais chaud.

X. EXPERIENCES ACTIVES

X.1 EXPERIENCE PICPAB (Phenomena induced by charged particle beams)

En 1980 les tests d'acceptance de l'expérience ont été effectués à Toulouse et se continueront jusqu'à juin 1981. Parallèlement, le dépouillement de l'essai fonctionnel de l'ensemble de l'expérience, réalisé dans la grande chambre à vide de la SOPEMEA à Toulouse (SIMLES) a été continué et les premiers résultats seront présentés au congrès du NATO ADVANCED RESEARCH INSTITUTE à GEILO (Norvège) en avril 1981.

X.2 EXPERIENCE ARAKS

Les résultats de la mesure de la vitesse de dérive des ions sur le nose cône de l'expérience ARAKS par un analyseur à potentiel retardateur, obtenus en collaboration avec le LGE ont été publiés (139) Ils montrent la présence en grande quantité d'ions Césium d'énergie thermique ou légèrement suprathermique, au niveau du nose cône (fig. 1). Ces ions proviennent de la source à plasma, placée à bord de l'engin porteur de l'accélérateur d'électrons, pour accroître sa neutralisation électrique. L'hypothèse selon laquelle les ions ont été accélérés par le potentiel positif de l'engin lors de l'injection des électrons ($\sim$200 V) puis freinés par collisions avec l'atmosphère neutre pour être mesurés avec des énergies thermiques sur le nose cône, est étudiée actuellement.

X.3 ETUDES DE FAISABILITE DE LA MESURE DES CHAMPS ELECTRIQUES PARALLELES PAR INJECTION DE PARTICULES CHARGEES

Il a été établi (524) que l'usage des ions lithium est préférable à celui des protons ou des ions Deuterium pour augmenter les chances de détection des flux de particules émises vers le haut depuis l'ionosphère et éventuellement reprécipitées dans l'atmosphère par une différence de potentiel alignée avec le champ magnétique. Les difficultés d'une telle expérience ont été discutées et les études complémentaires devant être entreprises pour prouver définitivement la faisabilité de cette expérience ont été signalées.

X.4 ACCELERATEURS D'IONS

Dans ce domaine, les recherches ont pour objet l'étude et l'évaluation des performances en environnement spatial de divers types de sources d'ions susceptibles de fournir des faisceaux monocinétiques d'ions légers d'une dizaine de milliampères sous quelques kilovolts.

L'année écoulée a vu la fin des études sur la source d'ions du type à électrons oscillants, source qui avait été choisie pour l'expérience PICPAB embarquée sur le premier laboratoire spatial européen SPACELAB (140, 141, 412).

La source saddle field ne délivrant pas un faisceau adapté aux futures expériences d'interaction plasma ionosphérique - faisceau, nos investigations ont porté sur des sources à ionisation par champs HF ou UHF avec extraction indépendante (extraction du type de Ward).

Une première source à induction par bobine hf à 13 MHz a été étudiée. Un modèle en "configuration spatiale" a été construit et testé. Ce modèle, d'un volume de 1,5 l et d'un poids de 1 kg délivre un faisceau monocinétique modulable en intensité (par modulation de la puissance HF). Nous obtenons typiquement un faisceau de 25 mA d'ions hydrogène pour une tension d'extraction de 4,5 kV et une puissance HF de 150 W ; un champ magnétique de confinement de 60 gauss est nécessaire. Une seconde source dont l'ionisation est obtenue par une cavité hyperfréquence alimentée à une fréquence de 900 MHz a été étudiée. Cette source encore à l'état de prototype délivre un faisceau monocinétique d'ions hydrogène de 15 mA pour une tension d'extraction de 7 kV, une puissance UHF de 30 W et sans champ magnétique de confinement. L'intensité de courant est aussi aisément modulable par modulation de la puissance UHF. Cette source présente un volume de 300 cm^3 et pèse environ 300 g.

X.5 EXPERIENCES ACTIVES "ONDES TBF"

Des ondes émises par l'émetteur Omega de Norvège, et reçues à bord de GEOS-1, ont été analysées à partir de trois méthodes de détermination de normales d'ondes. Les deux premières : méthode des produits croisés $\vec{b}(t) \times \vec{b}(t+\tau)$ et méthode de Means, sont basées sur l'utilisation de l'hypothèse onde plane. La troisième : méthode de détermination de la fonction de distribution des ondes, suppose que le champ d'onde électromagnétique observé est aléatoire. L'étude systématique de 7 pulses d'Oméga a

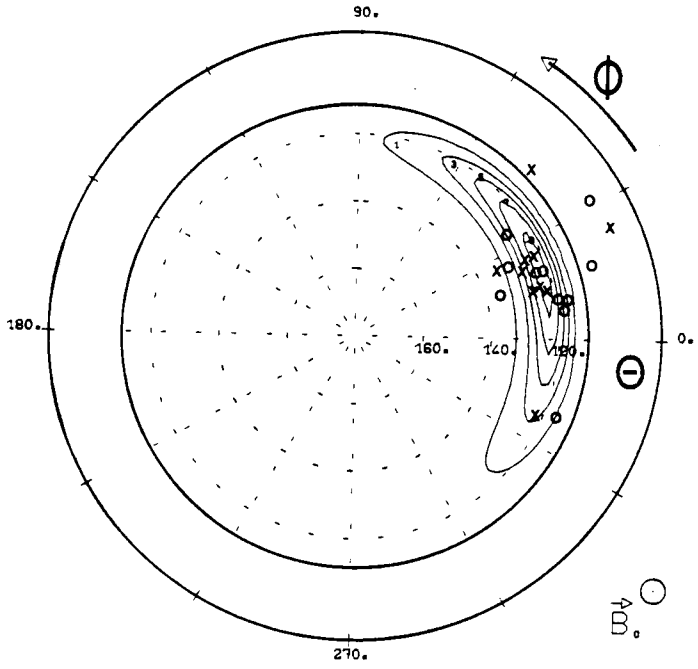


Figure 2 (X) : Analyse de signaux émis par l'émetteur Omega de Norvège et reçus à bord du satellite GEOS 1. Le champ magnétique terrestre $\vec{B}_o$ est perpendiculaire au plan de la feuille et orienté vers l'avant. Les directions de normale d'onde $\vec{K}$ sont repérées par un angle polaire $\theta = (\vec{K}, \vec{B}_o)$ et par un angle azimutal φ dont l'énergie est au méridien magnétique. Les petits cercles représentent les solutions obtenues à partir de la méthode des produits croisés $\vec{b}(t) \times \vec{b}(t+\tau)$; $\vec{b}(t)$ étant le vecteur champ magnétique de l'onde. Les croix indiquent les solutions obtenues à partir de la méthode de Means. Les traits pleins sont les contours de la fonction de distribution des ondes estimées à partir d'une méthode du maximum d'entropie. Les seules solutions qui ont un sens physique sont celles situées à l'intérieur du cercle de rayon $\sim 107°$. Au-delà les ondes ne se propagent pas. Dans le cas présenté ici il y a un assez bon accord entre les 3 méthodes ; la fonction de distribution des ondes donnant une représentation globale du faisceau d'ondes reçu par le satellite.

permis de déterminer les limites de validité de chaque méthode en fonction des propriétés statistiques des signaux : rapport signal/bruit, stationnarité en temps, degré de polarisation, polarisation (figure 2).

D'un point de vue purement géophysique on a montré que la propagation était beaucoup plus oblique que prévue et que les directions de normales d'ondes étaient soumises à des oscillations périodiques de période $\sim 0.2 - 0.3$ seconde et d'amplitude $\simeq 15°$ autour de la valeur moyenne.

XI. ETUDES DIVERSES. QUELQUES REALISATIONS TECHNIQUES

XI.1 CHARGES UTILES DE SATELLITES DE TELECOMMUNICATIONS

Dans le cadre des études de charges utiles pour les futurs satellites de télécommunication entreprises au CRPE, le département TSD a réalisé un prototype d'unité de commande pour une matrice de commutation (321).

L'unité de commande et la matrice de commutation qui lui est associée constituent les éléments centraux d'un satellite de télécommunication fonctionnant suivant le principe de l'Accès Multiple à Répartition dans le Temps et Commutation à Bord (AMRT-CB).

A bord du satellite, chaque récepteur couvre une zone de couverture particulière ; toutes les zones sont interconnectées cycliquement grâce à la matrice de commutation. Toutes les stations terriennes peuvent donc communiquer entre elles dès lors qu'un élément de temps du cycle, appelé Trame, a été affecté à chaque liaison.

L'unité réalisée peut commander aussi bien une matrice de commutation en hyperfréquence qu'une matrice de commutation en bande de base. Un maximum de souplesse a été donné au système pour pouvoir s'adapter à un grand nombre de cas : par exemple la trame AMRT peut être choisie entre 125 μs et 48 ms par pas de 125 μs.

La figure 1 donne le schéma synoptique de l'unité de commande réalisée.

Un oscillateur à quartz, X 0, pilote la base de temps qui délivre les signaux de synchronisation nécessaires (trame, supertrame...).

La base de temps pilote deux séquenceurs de mode : l'un "Maître" commande la matrice de commutation tandis que l'autre "Esclave" est utilisé soit pour enregistrer une nouvelle séquence (mode externe) soit pour contrôler le séquenceur Maître (mode interne).

Le programmeur accède au séquenceur esclave, s'il est en mode externe, et assure l'interface avec la télécommande et la télémesure.

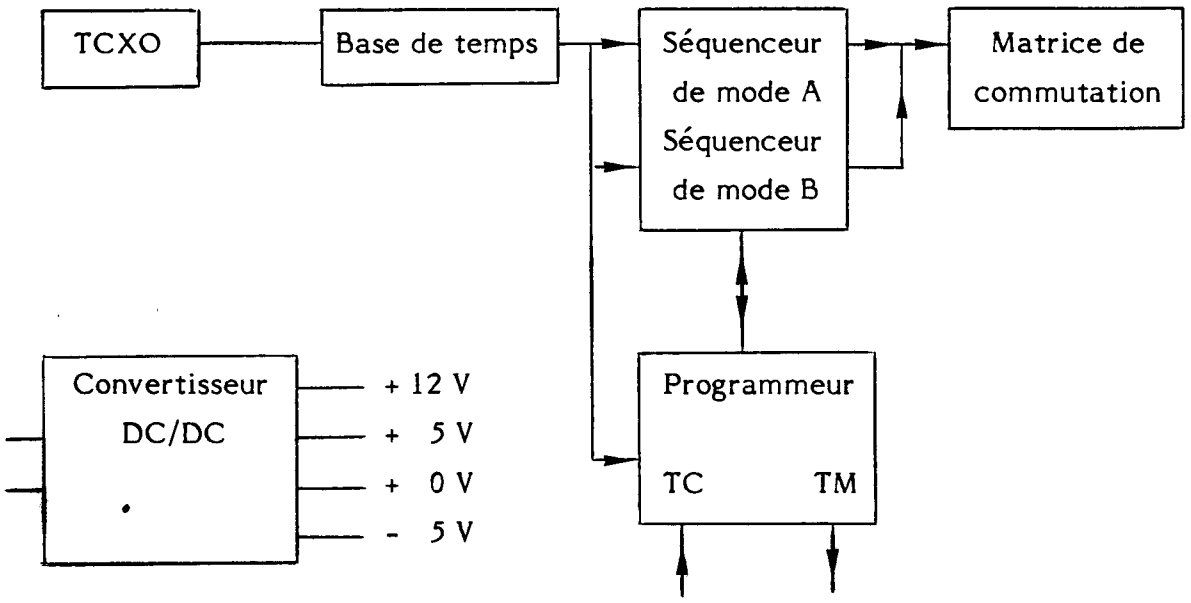


Schéma Synoptique de l'unité de commande

Figure 1

XI.2 CARACTERISATION DES SURFACES PAR MICROSCOPIE AUGER ET MICROSCOPIE ELECTRONIQUE A MIROIR

On étudie les cinétiques d'adsorption de l'oxygène et de l'air sur diverses surfaces métalliques en suivant l'évolution des pics caractéristiques des éléments (O, N, métal) sur le spectre des électrons Auger (AES) et en mesurant les variations du potentiel de surface à l'aide du microscope électronique à miroir (MEM).

Les mécanismes d'oxydation du cuivre (face $1_1 1_1 0$) ont été étudiés en fonction de la pression et de la température. On a montré que la chimisorption à très basse pression de l'oxygène est pratiquement indépendante de la température et que l'azote ne vient se fixer sur la surface qu'après l'oxygène. Cette étude faite en collaboration avec le Laboratoire de Chimie des Solides de l'Université d'Orléans (Professeur J. Bardolle) s'inscrit dans le cadre de l'Action Coordonnée contacts électriques dirigée par le CNET Lannion (260).

L'oxydation à très basse pression de titane polycristallin a également été étudiée en fonction de la température. Les étapes successives de ce processus ont été identifiées (incorporation de l'oxygène sous la surface, adsorption des molécules, formation de l'oxyde) et leur dépendance vis-à-vis de la pression évaluée (206, 402).

On a enfin étudié par spectroscopie des électrons de basse énergie l'aluminium polycristallin. On corrèle le spectre des pertes électroniques (ELS) avec la réponse du MEM pendant l'oxydation de l'aluminium dans le but de mieux comprendre les premières étapes de ce processus et l'origine des différents pics de pertes. Cette étude se poursuit en collaboration avec le CEN de Saclay (C. Legressus) et de l'INSA de Lyon (C. Guittard).

XI.3 TRAITEMENT DE DONNEES DE TELEDETECTION

Les travaux en traitement des signaux de télédétection ont conduit au dépôt d'un brevet sur une méthode d'analyse spectrale en temps réel des signaux d'un radar à synthèse d'ouverture. La reconstitution de l'image de l'océan Atlantique présentée sur la figure 2 et prise par SEASAT-1 a nécessité la transmission d'un très grand débit de données (correspondant à 120 M bit/s) suivie d'un traitement particulièrement complexe. Le spectre de cette image engendré ensuite en temps différé à partir de celle-ci par des méthodes optiques qui sont d'une mise en oeuvre délicate, permet l'estimation des paramètres descriptifs de la houle (direction de longueur d'onde). Une méthode développée à RPE permet le calcul en temps réel de ce spectre par un traitement numérique, dont le résultat est présenté sur la figure 3.

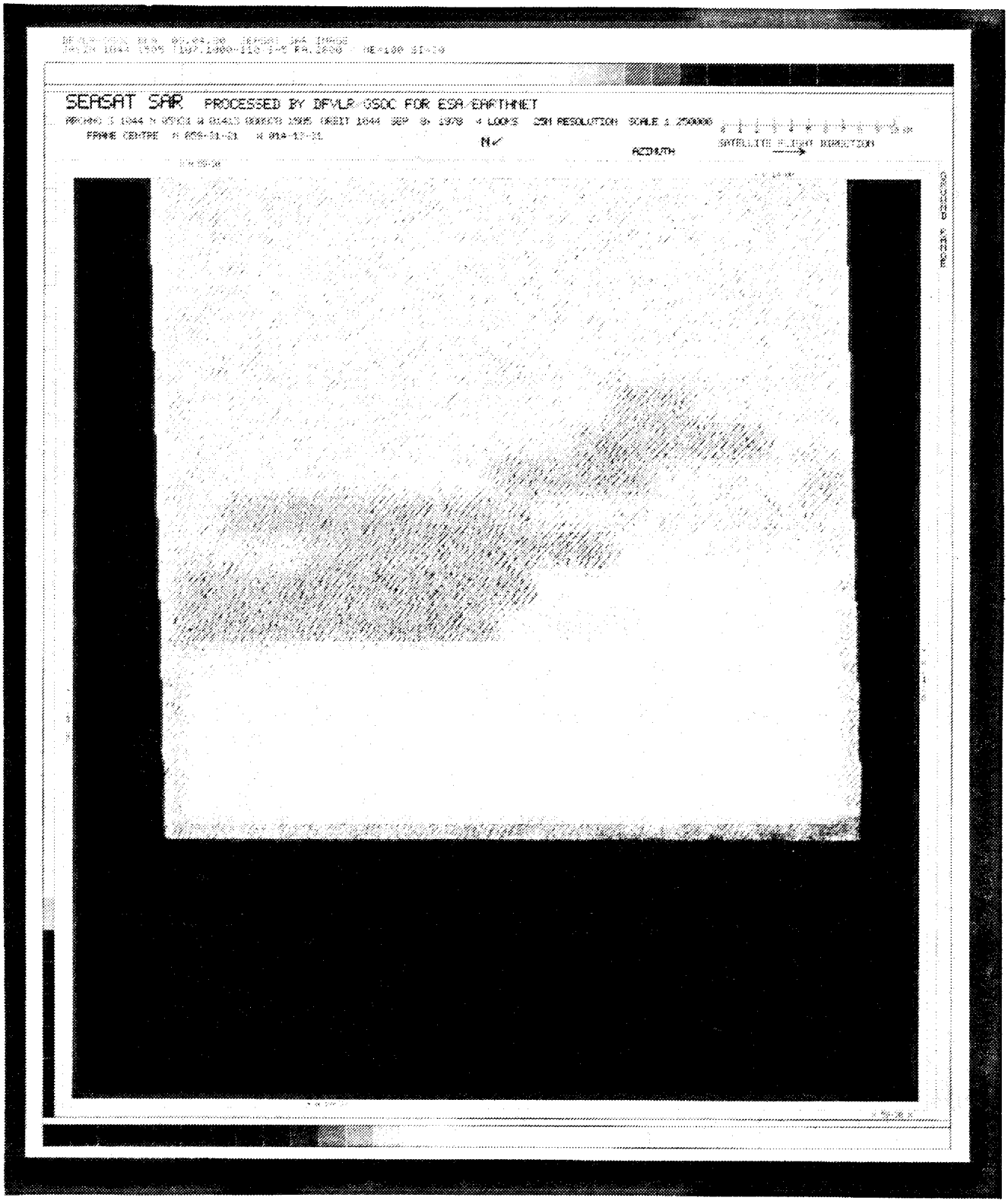

SEASAT SAR PROCESSED BY DFVLR/GSOC FOR ESA/EARTHNET
AZIMUTH
SATELLITE FLIGHT DIRECTION

Figure 2 (XI)

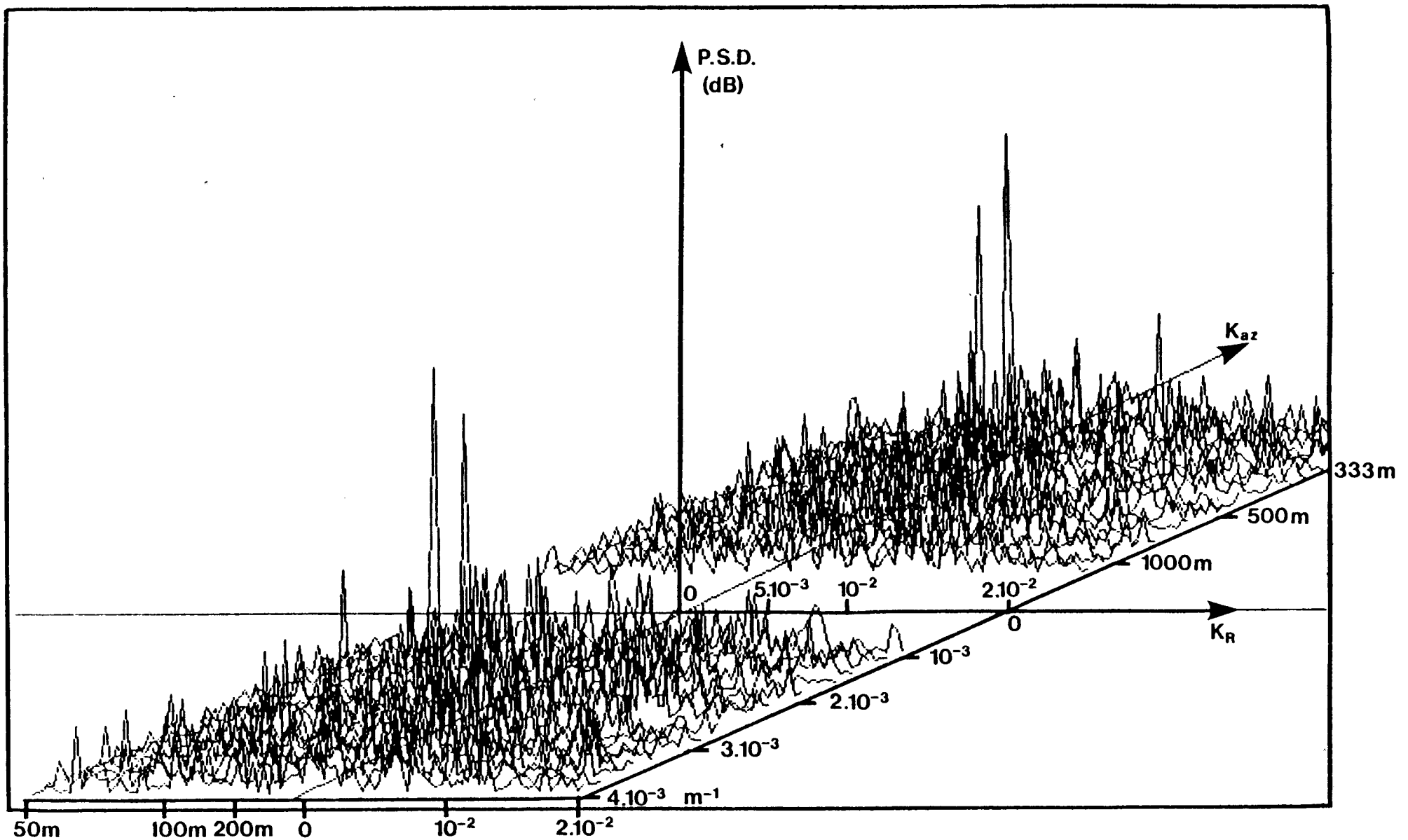

P.S.D.
(dB)
K_{az}
K_R
333m
500m
1000m
0
5.10^{-3}
10^{-2}
2.10^{-2}
0
10^{-3}
2.10^{-3}
3.10^{-3}
4.10^{-3} m^{-1}
50m
100m
200m
0
10^{-2}
2.10^{-2}

Figure 3 (XI)

CENTRE DE RECHERCHES EN PHYSIQUE DE L'ENVIRONNEMENT TERRESTRE ET PLANETAIRE (CRPE)

Directeur : J. HIEBLOT

Secrétaire : J. PERROT

Directeur Adjoint : I. REVAH

Secrétaire : N. ADANE

Responsable de l'Echelon d'Issy-les-Moulineaux : P. BAUER

Secrétaire : J. GUITTARD

Conseiller Scientifique pour l'Echelon d'Orléans : O. STOREY

Groupe MOYENS GENERAUX CRPE (MGC)

Chef du groupe : M. MARTINEZ

Echelon Issy-les-Moulineaux

M. LANGERMAN

R. BELHACENE
D. BROUSSEAU
L. CLAVERO
N. DUPIN
M. GOMEZ
G. NEHOU
M. PENNEC
Y. SUIGNARD

Echelon d'Orléans

D. ROSSIGNOL

J.P. BUREAU
C. CHUDY
J. DUMUIDS
M.H. LAVIE
D. LHUILLIER
C. MARCADET

Divers et Détachés

F. MARGERIDON	détaché
D. PENFORNIS	détaché
G. DOYEN	détaché
J.C. MESNAGER	détaché

ECHELON D'ISSY-LES-MOULINEAUX
Responsable de l'Echelon : P. BAUER

BASSE ATMOSPHERE ET PROPAGATION (BAP)

Chef du département : J. TESTUD

Convect. Nuag. Tridim. et Précipi.

J. TESTUD, P. AMAYENC, M. CHONG, D. HAUSER, Y. LEMAITRE, M. LOYET, B. NUTTEN, F. ROUX

Convect. Tridi. des Basses Couches

A. WEILL, P. BOUTELOUP, L. EYMARD, C. KLAPISZ, O. TACONET

Télédétection

D. VIDAL-MADJAR, R. BERNARD, P. MARTIN

Etude de la Propa. Troposphérique

D. VIDAL-MADJAR, P. GOLE, M. JUY, S. MAYRARGUE, J.P. MON, N. SPANJAARD, M. ROORYCK, J. TIFFON

HAUTE ET MOYENNE ATMOSPHERE (HMA)

Chef du département : M. BLANC

Atmosphère Moyenne

F. BERTIN, A. CREMIEU, J.L. FELLOUS, M.E. FREZAL, M. MASSEBEUF

Haute Atmosphère ionisée

M. BLANC, E. BAROUCH, C. DEL POZO, M.L. DUBOIN, C. MAZAUDIER, J.J. PONTHIEU, C. SENIOR, C. TAIEB, D. FONTAINE, P. VILA

ONDES DANS LES PLASMAS NATURELS (OPN)

Chef du département : R. GENDRIN
Adjoint : A. ROUX

Convection Magnétosphérique

J. ETCHETO, J. BERCHEM, J.G. TROTIGNON, L. WU

Physique des Résonances

B. HIGEL, H. DE FERAUDY, A. DERIEUX, A. FRECAUT

Ondes U.B.F.

S. PERRAUT, G. CHANTEUR, J.L. RAUCH

Ondes T.B.F.

N. CORNILLEAU, G. BELMONT, J. DELCOURT, B. LEMBEGE, O. PICON, J. SOLOMON

TECHNIQUES SPATIALES ET TRAITEMENT DE DONNEES (TSD)

Chef du département : M. AUGER
Adjoint : B. DE LA PORTE

Charges utiles pour Télécom.

Y. DE JAVEL, J.J. BLOCH, J. MARQUE

Charges utiles Scientifiques

A. MEYER, R. BLONDEAU, E. DELACROIX, C. DESCHANCIAUX, L. NISSOU

Mini info. GEOS

R. RIGUET, G. LAURENT, C. SEBASTIEN

Mini info. Basse Atmosphère

E. PAWELA, M. DAUTRICHE, B. PIRON

Info. et traitements des données

B. DE LA PORTE, C. BOUCHON, M. BOUVARD, J. DERENNES, C. DE VILLEDARY, C. FOURNIER, M. LAFEUILLE, E. PORTENEUVE, R. PRON, P. ROBERT, G. SCIALOM, W. STZEPOURGINSKI

TECHNIQUES SOL (TES)

Chef du département : F. BAUDIN

Stations ionosphériques

H. SALIOU, D. BORIE, R. DURBE, M. LECOURT, M. REGIS, J.P. ROQUEJOFFRE, J. SUBSOL, X. WELFELE, Y. RUIN

Système Ronsard

A. SAUVAGET, J.Y. BERLIVET, M. CARPENTIER, J.M. ETCHETO, J. FAROUX

Etude et maintenance

F. BAUDIN, J. BILBILLE, J. CAMUS, M. CLEMENT, H. DEMESSANCE, S. DUBOIS, H. DURREMBERGER, J.F. FEVRE, A. GABISON, J. MOUGINOT, C. PEURE

Personnel non rattaché à un groupe

J. JABOIN Documentaliste
M. LE FLOCH "

ECHELON D'ORLEANS

Conseiller Scientifique : O. STOREY

GEOPHYSIQUE SPATIALE (GES)

Chef du département : C. BEGHIN

Magnét.
P. DECREAU
R. DEBRIE
M. HAMELIN
M. PARROT
C. RENARD

Couplage Ionosp. Magnétosphère
M. PIRRE
R. POTTELETTE
J. THIEL

Métrol. des Plasm. Spatiaux
J.M. ILLIANO
G. PESNEL

Techniques Spatiales
J.F. KARCZEWSKI
B. DUBOYS
P. FERGEAU
P. FORT
X. FOULON
A. HAUSER
M. LEVEQUE
J.M. MOREAU
B. POIRIER
F.X. SENE

EXPERIENCES DE LABORATOIRE (EXL)

Chef du département : D. HENRY

Technique Sol
Y. ARNAL
M. CHABASSIERE
R. CHEZLEMAS
J. CUGUILLERE
P. FROT
R. MASSIF
J.L. MICHAU
J. LESPAGNOL

Physico-chimie des Atmosphères
R. BURKE
B. DUMAX
J. FAGUET
I. McLAREN
R. THOMAS

Caractéris. des Plasm.
O. STOREY
L. CAIRO
M. MALINGRE

Physico-chimie des Surfaces
M. BUJOR
J.B. BIGNOLAS
PHU SY UY

Source d'ions
D. HENRY
Y. HAJLAOUI
L. POMATHIOD

ATELIER ET BUREAU D'ETUDES (ABE)

Responsable : J. BRUGIERE

P. BADETS
A. BONNET
M. DION
J. LE BIHAN
P. MACCHI
G. MAILLE

PHYSIQUE THEORIQUE MODELISATION (PTM)

Chef du département : M. FEIX

Etudes théoriques
M. FEIX
E. BONOMI
E. FIJALKOW
E. JAMIN
M.P. MORAUX
G. MOURGUES
J.L. LUTTON
M. NAVET

Théorie du signal
F. LEFEUVRE
C. DELANNOY (pi)
F. BAUSSET
P. GILLE
C. KOPPREITTER
T.K. PHAN

Mini-informatique et matériel
J.P. DUME
J.C. TOUSSAINT
P. DECREAU

Personnel non rattaché à un groupe

A. KARCZEWSKI (Documentation)
G. DOYEN (Garchy)

BIBLIOGRAPHIE

REVUES ET OUVRAGES COLLECTIFS

(101) ALTMAN C., FIJALKOW E., The horizontal propagation of Pc1 pulsations in the ionosphere, Planet. Space Sci., 28 (1), 61-68, 1980.

(102) BARASSIN J., BARASSIN A., THOMAS R., Ternary association reactions leading to formation of $CH_3^+(H_2O)_n$ in the energy range 0,04 - 0.1 eV, Chem. Phys. Lett., 71 (2), 269-273, 1980.

(103) BAUER P., Etude de l'ionosphère par diffusion incohérente dans la perspective du projet EISCAT, J. Phys., 41 (4/S), C3/185-186, 1980.

(104) BEGHIN C., Plasma physics investigations on the first Spacelab payload, ESA Journal, 3 (2), 123-133, 1979.

(105) BERTRAND P., TUAN N.V., GROS M., IZBAR B., FEIX M., GUTIERREZ J., Classical Vlasov plasma description through quantum numerical methods, J. Plasma Phys., 23 (3), 401-422, 1980.

(106) BLANC M., Convection du plasma dans l'ionosphère et la magnétosphère : un circuit électrique et son schéma de résolution, Ann. Géophys., 36 (1), 1-29, 1980.

(107) BLANC M., RICHMOND A.D., The ionospheric disturbance dynamo, J. Geophys. Res., 85 (A4), 1669-1686, 1980.

(108) BLANC M., THOMAS D.P., WILLIAMS P.J.S., On the latitude variation of magnetospheric electric fields at mid-latitudes, J. Atmos. Terr. Phys., 42 (4), 407-409, 1980.

(109) BONOMI E., FEIX M.R., HEBUTERNE G., Théorie de l'information, Structure et modélisation d'un réseau de connexion, Ann. Télécom., 35 (1-2), 39-59, 1980.

(110) BURGAN J.R., FEIX M.R., FIJALKOW E., MORAUX M.P., MUNIER A., Groups transformations and critical asymptoties : applications to non-linear differential and partial derivative equations, Méthodes de Calcul pour l'Etude des Phénomènes Critiques, Springer Series in Synergetics, 1980.

(111) BURGAN J.R., FEIX M.R., FIJALKOW E., MUNIER A., NAKACH R., Revue sur l'application des groupes à la résolution des équations non linéaires, Physique des fluides et physique des plasmas, J. Physique, Colloque C3, Suppl. n° 4, C3-377 - C3-382, 1980.

(112) CALINON R., CHOQUARD Ph., JAMIN E., NAVET M., On the equation of state of the 2D wigner model, Proceedings of the Conference on Statistical Mechanics in two Dimensions Lake Geneva, U.S.A., 1980.

(113) CHOQUARD Ph., KUNZ H., MARTIN Ph. A., NAVET M., One dimensional Coulomb systems, Proceedings of the Conference on Statistical Physics, Fribourg, Europhysics Conference, 1980.

(114) DECREAU P.M.E., Physique de la magnétosphère, Symbioses, XI (4), 39-46, 1979.

(115) DELANNOY C., Un algorithme rapide de recherche de plus proches voisins, RAIRO Informatique/Computer Science, 14 (3), 275-286, 1980.

(116) DELCOURT J., Experimental and theoretical study of radiometeors, in Solid Particles in the Solar System, Eds. HALLIDAY I. and B.A. McINTOSH, International Astronomical Union Symposium n° 90, 133-136, D. Reidel, 1980.

(117) FARGETTON H., GENDRIN R., LACOUME J.L., Adaptative methods for spectral analysis of time-varying signals, EUSIPCO 80, 1ère Conférence Internationale de Traitement du Signal, Lausanne, Suisse, 16 - 19 septembre 1980. In Signal processing : Theories and Applications, Eds. KUNT M. & DE COULON F., 777-792, North-Holland and Eurasip, 1980.

(118) FEIX M.R., GUASP J., GUTIERREZ J., Plasma physics and its applications in thermonuclear fusion, Grupo Interuniversitario de Fisica Teorica, Espagne, février 1980 (Notes of the lectures given at the 1 curso interuniversitario de fisica del plasma, Madrid, 5 - 10 novembre 1979).

(119) FUKUYAMA K., KOFMAN W., Incoherent scattering of an electromagnetic wave in the mesosphere : a theoretical consideration, J. Geomag. Geoelectr., 32 (2), 67-81, 1980.

(120) GENDRIN R., Kinetic energy density and diamagnetic effects during plasma injection events, Geophys. Res. Letts., 7 (12), 1105-1108, 1980.

(121) GENDRIN R., Some aspects of ULF waves observed onboard GEOS related to convection, heating and precipitation processes, Nato Advanced Study Institute on Exploration of the Polar Upper Atmosphere, Lillehammer, Norvège, 05 - 16 mai 1980, in Exploration of the Polar Upper Atmosphere, Eds. DEEHR C.S. & HOLTET J.A., Proc. Nato Study Inst., 337-354, D. Reidel, 1980.

(122) GENDRIN R., ROUX A., Energization of helium ions by proton-induced hydromagnetic waves, J. Geophys. Res., 85 (A9), 4577-4586, 1980.

(123) GLANGEAUD F., LACOUME J.L., FARGETTON H., GENDRIN R., PERRAUT S., TROITSKAYA V.A., Cross-spectral analysis of Pc1 emissions recorded at different stations, J. Geophys. Res., 85 (A8), 4115-4124, 1980.

(124) HAMELIN M., Excitation of LHR electrostatic waves in a warm magnetoplasma by current pulses : Application to the VLF echoes excited by the Isis 2 HF transmitter, Radio Sci., 15 (1), 49-57, 1980.

(125) JUY M., ROORYCK M., Première analyse des mesures de propagation oblique effectuées à Gometz-la-Ville sur le signal du satellite SIRIO 1, Ann. Télécom., 35 (1-2), 3-14, 1980;

(126) LAVERGNAT J., ILLIANO J.M., DELAHAYE J.Y., NEY R., Non linear effects in the vicinity of a radio frequency probe, Plasma Phys., 22 (1), 57-67, 1980.

(127) LAVERGNAT J., LEQUEAU D., PELLAT D., ROUX A., Non linear mechanism for the production of the low frequency electrostatic waves, Ann. Géophys., 36 (3), 439-442, 1980.

(128) LEBRETON J.P., HENRY D., Electrostatic waves in a drifting ionospheric simulation plasma in the vicinity of the plasma frequency, Phys. Lett., 76 (A1), 49-52, 1980.

(129) LEMBEGE B., Theoretical study of backward propagating cyclotron harmonic waves for frequencies ω around ω_{cyl}, Plasma Phys., 22 (10-11), 991-1001, 1980.

(130) LEMBEGE B., Cyclotron harmonic waves detected in the direction parallel to the magnetostatic field, Phys. Fluids, 23 (10), 2128-2133, 1980.

(131) MON J.P., WEILL A., MARTIN L., Effect of tropospheric disturbances on a 4.1 and 6.2 GHz line of sight path, URSI - Commission F, Effets de la basse atmosphère sur la propagation, Lennoxville, Canada, 26 - 30 mai 1980 in Ann. Télécom., 35 (11-12), 468-471, 1980.

(132) MOURGUES G., FIJALKOW E., FEIX M.R., Oscillations forcées créées par une antenne ponctuelle dans un plasma en dérive, Plasma Phys., 22 (5), 367-399, 1980.

(133) MUNIER A., BURGAN J.R., GUTIERREZ J., FEIX M.R., Group transformation and the non linear heat diffusion equation, SIAM Part A, 40, n° 2, 1981.

(134) MUNIER A., BURGAN J.R., FEIX M.R., FIJALKOW E., Self similar analysis of Vlasov-Einstein equations in spherical symmetry, Astrophys. J., 236, 970-989, 1980.

(135) NAVET M., FEIX M.R., Polarisability and pressure in one dimensional component plasmas, Helvetic Physica Acta, Actes du Congrès Annuel de la Société de Physique, 1980.

(136) NAVET M., JAMIN E., FEIX M.R., Equation d'état du plasma classique à une composante, C.R. Acad. Sci. Paris, 290B (11), 223-226, 1980.

(137) NAVET M., JAMIN E., FEIX M.R., La définition de la pression du plasma classique à une composante, C.R. Acad. Sci. Paris, 290B (12), 239-242, 1980.

(138) NAVET M., JAMIN E., FEIX M.R., "Virial" pressure of the classical one component plasma, J. Phys. Lett., 41 (3), 69-73, 1980.

(139) PIRRE M., BERTHELIER J.J., Ion drift velocity measurements on the nose cone during the first ARAKS experiment, Ann. Géophys., 36 (3), 389-396, 1980.

(140) POMATHIOD L., HENRY D., ARNAL Y., BOSWELL R., Development of an ion source from Spacelab, Space Sci. Instrum., 5 (2), 197-207, 1980.

(141) POMATHIOD L., HENRY D., ARNAL Y., BOSWELL R., Properties and discharge mechanisms of a saddle-field ion source, Inst. Phys. Conf. Ser., n° 54, 309-315, 7, 1980.

(142) POTTELETTE R., ILLIANO J.M., Measurement of high frequency waves in an auroral plasma, in European Rocket and Balloon Programmes and Related Research, GUYENNE T.D. & LEVY G. Eds., 309-312, Rapport ESA SP-152, juin 1980.

(143) RENARD C., POKHOUNKOV A.A., Caractéristiques d'ondes de gravité observées dans l'ionosphère polaire, C. R. Acad. Sci. Paris, 290B (2), 39-42, 1980.

(144) RICHMOND A.D., BLANC M., EMERY B.A., WAND R.H., FEJER B.G., WOODMAN R.F., GANGULY S., AMAYENC P., BEHNKE R.A., CALDERON C., EVANS J.V., An empirical model of quiet day ionospheric electric fields at middle and low latitudes, J. Geophys. Res., 85 (A9), 4658- 4664, 1980.

(145) SHEPHERD G.G., BOSTROM R., DERBLOM H., FALTHAMMER C.G., GENDRIN R., KAILA K., KORTH A., PEDERSEN A., PELLINEN R., WRENN G., Plasma and field signatures of poleward propagating auroral precipitation observed at the foot of the GEOS 2 field line, J. Geophys. Res., 85 (A9), 4587-4601, 1980.

(146) STOREY L.R.O., CAIRO L., Kinetic theory of the boundary layer between a flowing isotropic plasma and a magnetic field, in Magnetospheric Boundary Layers, 289-293, Rapport ESA SP-148.

(147) STOREY L.R.O., LEFEUVRE F., The analysis of 6-component measurements of a random electromagnetic wave field in a magnetoplasma, II. The integration kernels, Geophys. J.R. Astr. Soc., 62 (1), 195-219, 1980.

(148) STOREY L.R.O., THIEL J., BOSWELL R.W., Location of the interference structure near the lower oblique (whistler) resonance cone, Phys. Fluids, 23 (3), 654-655, 1980.

(149) TANAKA Y., CAIRO L., Propagation of VLF waves through the equatorial anomaly, Ann. Géophys., 36 (4), 555-575, 1980.

(150) TANAKA Y., HAYAKAWA M., Longitudinal effect in the enhancement of daytime whistler activity at low latitudes, Ann. Géophys., 36 (4), 577-585, 1980.

(151) TESTUD J., BREGER G., AMAYENC P., CHONG M., NUTTEN B., SAUVAGET A., A Doppler radar observation of a cold front : three dimensional air circulation, related precipitation system and associated wave-like motions, J. Atmos. Sci., 37(1), 78-98, 1980.

(152) THIEL J., DECREAU P.M.E., Excitation of the plasma and lower oblique resonances in a maxwellian magnetoplasma of weak density, Phys. Fluids, 23 (11), 2334-2335, 1980.

(153) THOMAS R., BARASSIN J., BARASSIN A., Etude cinétique du système réactionnel CH_3^+ - NH_3 dans le domaine d'énergie compris entre 0,04 eV et 1 eV, Int. J. Mass. Spectrom. Ion Phys., 33, 383-391, 1980.

(154) WEILL A., KLAPISZ C., STRAUSS R., BAUDIN F., JAUPART C., VANGRUNDERBEECK P., GOUTORBE J.P., Measuring heat flux and structure functions of temperature fluctuation with an acoustic Doppler sodar, J. Appl. Meteor. 19 (2), 199-205, 1980.

COMMUNICATIONS A DES COLLOQUES

(201) AMAYENC P., HAUSER D., Drop size distributions and vertical air motions in a thunderstorm as inferred from Doppler radar observations at vertical incidence, VIIIème Conférence Internationale de Physique des Nuages, Clermont-Ferrand, France, 15 - 19 juillet 1980.

(202) ARNAL Y., HENRY D., POMATHIOD L., Développement d'un injecteur d'ions à partir d'une source du type à "électrons oscillants" pour une expérience embarquée sur la première navette spatiale, Assemblée Annuelle de la Société Française de Physique, Toulouse, France, 25 - 30 juin 1979.

(203) BAUER P., Thermospheric neutral composition changes and their causes, 27ème Symposium du Groupe "Propagation des Ondes Electromagnétiques", (AGARD), Naples, Italie, 27 - 31 octobre 1980.

(204) BERNARD R., BLANC M., LAFEUILLE M., MAZAUDIER C., TAIEB C., A seasonal ionic drift pattern above Saint-Santin, EGS/ESC VIIth Annual Meeting, Budapest, Hongrie, 21 - 29 août 1980.

(205) BERNARD R., FELLOUS J.L., MASSEBEUF M., GLASS M., Latitudunal variation of atmospheric tides : simultaneous meteor radar observations at Monpazier (France, 45° N) and Punta Borinquen (Puerto Rico, 18° N), International Symposium on Equatorial Aeronomy, Puerto Rico, 17 - 24 juillet 1980.

(206) BIGNOLAS J.B., BUJOR M., GENTY A., BARDOLLE J., A study of oxygen chemisorption on single crystals and polycrystals of titanium using Auger analysis and micro electron microscopy, Congrès sur le Titane, Kyoto, Japon, mai 1980.

(207) BLANC M., The effects of auroral activity on the midlatitude ionosphère, 27ème Symposium du groupe "Propagation Electromagnétique", (AGARD), Naples, Italie, 27 - 31 octobre 1980.

(208) BLANC M., ALCAYDE D., MAZAUDIER C., PONTHIEU J.J., SENIOR C., Penetration of E-fields towards low latitudes, IVth Workshop on IMS Observations in Northern Europe, Issy-les-Moulineaux, France, 22 - 26 septembre 1980.

(209) BONOMI E., LUTTON J.L., FEIX M., Réseau de connexion téléphonique : mécanique statistique et introduction d'une gestion intelligente, Colloque sur les Méthodes de Calcul pour l'Etude de Phénomènes Critiques, Carry-les-Rouet (13), France, 2 - 4 juin 1980.

(210) BURKE R., FAGUET J., WAYNE R.P., Kinetics of clustering of NO^+ with N_2, O_2 and NO at low temperature, VIth International Symposium on Gas Kinetics, Southampton, Grande-Bretagne, 4 - 17 juillet 1980.

(211) BURKE R., FAGUET J., WAYNE R.P., Chemical kinetics of mesospheric ion reactions at low temperatures, VIIth Annual Meeting, European Geophysical Society, Budapest, Hongrie, août 1980.

(212) CHAUZY S., RAIZONVILLE P., HAUSER D., ROUX F., Electrical and dynamical description of a frontal storm deduced from Landes 79, VIIIème Conférence Internationale de Physique des Nuages, Clermont-Ferrand, France, 15 - 19 juillet 1980.

(213) CHONG M., AMAYENC P., HAUSER D., SCIALOM G., TESTUD J., Mesoscale flow small scale motions and microphysics of precipitations within a warm front : a dual-Doppler radar observation, VIIIème Conférence Internationale de Physique des Nuages, Clermont-Ferrand, France, 15 - 19 juillet 1980.

(214) CHONG M., ROUX F., TESTUD J., A new filtering and interpolating method for processing dual-Doppler radar data : performance in three dimensional wind restitution ability to derive pressure and temperature method, XIXth Conference on Radar Meteorology, Miami Beach, Floride, U.S.A., 15 - 12 avril 1980.

(215) CHRISTIANSEN P., BORG H., BAHNSEN A., CORNILLEAU N., GRARD R.J.L., JONES D., KORTH A., KREMSER G., PEDERSEN A., PERRAUT S., UNGSTRUP E., WRENN G.L., YOUNG D.T., A GEOS experimenters study of the December 18 and 29, 1978, IVth Workshop on IMS Observations in Northern Europe, Issy-les-Moulineaux, France, 22 - 26 septembre 1980.

(216) ETCHETO J., BERCHEM J., Experimental study of magnetospheric convection, COSPAR XXIIIrd Plenary Meeting, Budapest, Hongrie, 2 - 14 juin 1980.

(217) ETCHETO J., BERCHEM J., Experimental determination of parameters involved in large scale electric field models (GEOS 1, ISEE 1), IVth Workshop on IMS Observations in Northern Europe, Issy-les-Moulineaux, France, 22 - 26 septembre 1980.

(218) ETCHETO J., de FERAUDY H., TROTIGNON J.G., Plasma resonance stimulation in space plasmas, COSPAR XXIIIrd Plenary Meeting, Budapest, Hongrie, 2 - 14 juin 1980.

(219) EYMARD L., Study of clear air convection in the boundary layer, XIVth Conference on Radar Meteorology, Miami, USA, 15 - 18 avril 1980.

(220) EYMARD L., Ecoulement convectif tridimensionnel dans la couche limite observé au moyen des radars "Ronsard", 4ème Journée Franco-Africaine de Physique de l'Atmosphère, Toulouse, France, 9 juillet 1980.

(221) FAYNOT J.M., FAYNOT L., VILA P., a) Equatorial range spread F and sporadic E anticorrelation. b) Tidal shear sporadic E formation at the dip equator, International Symposium on Equatorial Aeronomy, Puerto Rico, 17 - 24 juillet 1980.

(222) FELLOUS J.L., FREZAL M.E., The random wind component in the lower thermosphere, International Symposium on Middle Atmosphere Dynamics and Transport, Urbana, Illinois, 28 juillet - 1 août 1980.

(223) FELLOUS J.L., MASSEBEUF M., PETITDIDIER M., TEITELBAUM H., Simultaneous observations of meteor winds and green line intensity variations, International Symposium on Middle Atmosphere Dynamics and Transport, Urbana, Illinois, 28 juillet - 1 août 1980.

(224) FONTAINE D., A simplified theoretical approach to the morphology of diffuse electron precipitation in the auroral ionosphere, EGS/ESC VIIth Annual Meeting, Budapest, Hongrie, 21 - 29 août 1980.

(225) FREZAL M.E., GLASS M., FELLOUS J.L., MASSEBEUF M., The gravity wave spectrum at low and middle latitude as observed by meteor radars, International Symposium on Equatorial Aeronomy, Puerto Rico, 17 - 24 juillet 1980.

(226) GOLE P., DAUTRICHE M., HAMELIN J., MON J.P., RAMAT P., VERNET M., Radar and atmospheric electricity measurements associated with microwave attenuation and crosspolarization observed on a slant path, URSI, Commission F, Effets de la basse atmosphère sur la propagation, Lennoxville, Canada, 26 - 30 mai 1980.

(227) GOLE P., MON J.P., RAMAT P., Utilisation d'un radar pour étudier l'atténuation et la dépolarisation des hyperfréquences sur un trajet oblique, AGARD, 26th Symposium on "Electromagnetic wave Propagation Pane", Londres, Grande Bretagne, 12 - 16 mai 1980.

(228) GOUGH P., CORNILLEAU N., WRENN G.L., Some aspects of fast-varying wave modulation events detected onboard GEOS, IVth Workshop on IMS Observations in Northern Europe, Issy-les-Moulineaux, France, 22 - 26 septembre 1980.

(229) HAMELIN M., Propagation and directive radiation properties of the cyclotron, harmonic waves in a Maxwellian plasma, Congrès International sur la Physique des Plasmas, Nagoya, Japon, 07 - 11 avril 1980.

(230) HAMELIN M., Excitation of ion cyclotron waves in a multi-component plasma, Vth ESA Symposium on European Rocket and Balloon Programmes and Related Research, Bournemouth, UK, Grande Bretagne, avril 1980.

(231) HARVEY C.C., ETCHETO J., MOZER F., PEDERSEN A., The ISEE spacecraft system : DC electric field plasma and waves, IVth Workshop on IMS Observations in Northern Europe, Issy-les-Moulineaux, France, 22 - 26 septembre 1980.

(232) HAUSER D., AMAYENC P., A new method for deducing hydrometeor-size distributions and vertical air motions from Doppler radar measurements at vertical incidence : first results in a warm frontal stratiform precipitation, XIXth Conference on Radar Meteorology, Miami-Beach, Floride, U.S.A., 15 - 18 avril 1980.

(233) HAUSER D., AMAYENC P., Les radars Ronsard comme moyen d'étude des précipitations, 4ème Journée Franco-Africaine de Physique de l'Atmosphère, Toulouse, France, 9 juillet 1980.

(234) HIGEL B., DECREAU P., de FERAUDY H., WU-LEI, Cold plasma density at the geostationary orbit and its variation with magnetic activity, IVth Workshop on IMS Observations in Northern Europe, Issy-les-Moulineaux, France, 22 - 26 septembre 1980.

(235) JUY M., ROORYCK M., Etude de résultats de propagation obtenus à partir du satellite OTS, URSI, Commission F, Effets de la basse atmosphère sur la propagation, Lennoxville, Canada, 26 - 30 mai 1980.

(236) KOWALKOVSKI L., ETCHETO J., LEMAIRE J., Determination of the plasmapause positions for different electric field models taking into account the interchange instability, IVth Workshop on IMS Observations in Northern Europe, Issy-les-Moulineaux, France, 22 - 26 septembre 1980.

(237) LAROCHE P., METZGER P., TESTUD J., ROUX F., CHAUZY S., Electric field variations produced by natural and triggered lightning and related radar measurements, VIème International Conference on Atmospheric Electricity, Manchester, juillet 1980.

(238) LEBRETON J.P., DEBRIE R., HAMELIN M., Observation of oblique cyclotron harmonic wave radiation in laboratory magnetoplasmas, Congrès International sur la Physique des Plasmas, Nagoya, Japon, 07 - 11 avril 1980.

(239) LEFEUVRE F., VLF electromagnetic wave distribution functions in the magnetosphere, URSI Meeting, Québec, juin 1980.

(240) LEFEUVRE F., BELL T.F., INAN U.S., Estimation of the wave normal distribution at the source for VLF hiss and chorus observed on board GEOS, American Geophysical Union, Toronto, Canada, mai 1980.

(241) LEMAITRE Y., Etude dynamique et thermodynamique de lignes de grain tropicales observées à Korhogo pendant l'expérience COPT 79, 4ème Journée Franco-Africaine de Physique de l'Atmosphère, Toulouse, France, 9 juillet 1980.

(242) LEMBEGE B., Classification of backward propagation cyclotron harmonic, IVth Congress on Waves and Instabilities in Plasmas, Nagoya, Japon, 7 - 11 avril 1980.

(243) LEMBEGE B., Detection of backward propagating cyclotron harmonic waves in the direction parallel to the magnetostatic field, IVth Congress on Waves and Instabilities in Plasmas, Nagoya, Japon, 7 - 11 avril 1980.

(244) LEMBEGE B., DEBRIE R., Drift effect on the electrostatic Landau mode in a maxwellian plasma, International Workshop on Relation between Laboratory and Space Plasmas, Tokyo, Japon, 14 - 15 avril 1980.

(245) MARTIN Ph., Traitement spécialisé des signaux d'un radar à synthèse d'ouverture, Journées d'Automatique, Irisa-Rennes, France, 8 février 1980.

(246) MARTIN Ph., Direct determination of the two-dimensional image spectrum from raw synthetic aperture radar data, ESA SAR Image Quality Workshop, Frascati, Italie, 12 décembre 1980.

(247) MASSEBEUF M., BERNARD R., FELLOUS J.L., GLASS M., Long-period motions and mean zonal circulation at low-latitude in the upper mesosphere, International Symposium on Equatorial Aeronomy, Puerto Rico, 17 - 24 juillet 1980.

(248) MAZAUDIER C., A seasonal electric currents pattern above Saint-Santin, EGS/ESC VIIth Annual Meeting, Budapest, Hongrie, 21 - 29 août 1980.

(249) MAZAUDIER C., BLANC M., Midlatitude electric current disturbance over Saint-Santin and their relation to auroral currents, Nato advanced Study Institute on Exploration of the Polar Upper Atmosphere, Lillehammer, Norvège, 05 - 16 mai 1980.

(250) MON J.P., WEILL A., MARTIN L., Effect of tropospheric disturbances on a 4.1 and 6.2 GHz line of sight path, URSI - Commission F, Effets de la basse atmosphère sur la propagation, Lennoxville, Canada, 26 - 30 mai 1980.

(251) PARK C.G., HELLIWELL R.A., LEFEUVRE F., Ground observations of power line radiation coupled to the ionosphere and magnetosphere, EMC 80 - Vth International Wroclaw Symposium on Electromagnetic Compatibility, Wroclaw, Pologne, 17 - 19 septembre 1980.

(252) PEDERSEN A., AMATA E., BAHNSEN A., CHRISTIANSEN P., CORNILLEAU N., GOUGH P., GRARD R., PERRAUT S., UNGSTRUP E., General characteristics of the fields and waves experiments onboard GEOS average properties and substorm variations, IVth Workshop on IMS Observations in Northern Europe, Issy-les-Moulineaux, France, 22 - 26 septembre 1980.

(253) PERRAUT S., ROUX A., GENDRIN R., De VILLEDARY C., YOUNG D.T., KORTH A., KREMSER G., Role played by the minor He+ in the ULF waves amplification, COSPAR - XXIIIrd Plenary Meeting, Budapest, Hongrie, 2 - 14 juin 1980.

(254) PONTHIEU J.J., DUBOIN M.L., High resolution altitude profiles of the auroral zone energy input; EGS/ESC VIIth Annual Meeting, Budapest, Hongrie, 21 - 29 août 1980.

(255) POTTELETTE R., Active and passive H.F. wave measurements during the PORCUPINE experiment, IVth Workshop on IMS Observations in Northern Europe, Issy-les-Moulineaux, France, 22 - 26 septembre 1980.

(256) POTTELETTE R., ILLIANO J.M., Measurement of high frequency waves in an auroral plasma, ESA Symposium, Bournemouth, 1980.

(257) ROBERT P., GENDRIN R., PERRAUT S., ROUX A., De VILLEDARY C., Methods of investigation of fast-varying magnetospheric currents at the geostationary orbit during substorms (78/12/79 ; 79/03/13 ; 79/07/13 ; 80/02/16), IVth Workshop on IMS Observations in Northern Europe, Issy-les-Moulineaux, France, 22 - 26 septembre 1980.

(258) ROUX F., CHONG M., TESTUD J., Three dimensional motions, fields of pressure, VIIIème Conférence Internationale de Physique des Nuages, Clermont-Ferrand, France, 15 - 19 juillet 1980.

(259) ROUX F., TESTUD J., Les radars Ronsard comme moyen d'étude de la dynamique et de la thermodynamique d'un écoulement convectif, 4ème Journées Franco-Africaines de Physique de l'Atmosphère, Toulouse, France, 8 - 9 juillet 1980.

(260) SIMON D., BARON J.P., BUJOR M., BARDOLLE J., A study of the contamination of telephone relay contacts and of constituting materials (Ag, Cu, Ag-Cu, Ag-Pd), 10th International Conference on Electrical Contacts Phenomena, Budapest, Hongrie, 25 - 29 août 1980.

(261) STOREY L.R.O., The metrology of linear random wave fields in space plasmas, Réunion Radio-Scientifique Nord-Américaine, Université Laval, Québec, 2 - 6 juin 1980.

(262) STOREY L.R.O., MALINGRE M., CAIRO L., DECREAU P., The substorm GEOS anomalous resistivity experiment, IVth Workshop on IMS Observations in Northern Europe, Issy-les-Moulineaux, France, 22 - 26 septembre 1980.

(263) TAIEB C., BLANC M., Field line equipotentiality and ion-neutral collision frequencies in the dynamo region deduced from Saint-Santin ion drift measurements, EGS/ESC VIIth Annual Meeting, Budapest, Hongrie, 21 - 29 août 1980.

(264) THOMAS R., BARASSIN J., BARASSIN A., Kinetic study of the $CH_3^+ + H_2O$ reaction in the pressure range 0.3 - 0.5 torr and energy range 0.04 - 0.1 eV, Symposium on Atomic and Surface Physics, Maria Alm-Hintermoos, Salzbourg, Autriche, 10 - 16 février 1980.

(265) WEILL A., D. VIDAL-MAJAR, C. KLAPISZ, J.P. GOUTORBE, La couche limite hivernale, Journée d'Evry, colloque environnement.

(266) WRENN G., BORG H., DECREAU P., ETCHETO J., HIGEL B., KORTH A., KREMSER G., YOUNG D.T., Plasma density temperature and composition at the geostationary orbit, Average properties and substorm variations, IVth Workshop on IMS Observations in Northern Europe, Issy-les-Moulineaux, France, 22 - 26 septembre 1980.

DOCUMENTS INTERNES

(301) ALCAYDE D., BLANC M., DUBOIN M.L., PONTHIEU J.J., SENIOR C., Programme d'électrodynamique, Note Technique CRPE/90, novembre 1980.

(302) ALCAYDE D., PONTHIEU J.J., Couplage ionosphère-atmosphère neutre ; dépôts d'énergie en zone aurorale, Document de travail CRPE/1066, octobre 1980.

(303) BAROUCH E., Energy spectra of incident electrons from auroral ionization profiles, Note Technique CRPE/87, septembre 1980.

(304) BERTHELIER A., MAZAUDIER C., Courants et conductivités en zone aurorale, Document de travail CRPE/1065, octobre.

(305) BLOCH J.J., Rapport de stage (seconde partie) aux laboratoires de la COMSAT, Document de travail CRPE/1056, janvier 1980.

(306) BLOCH J.J., De JAVEL Y., MON J.P., NUTTEN B., Projet d'étude de faisabilité d'une balise 20/30 GHz embarquée et du système de réception associé, Document de travail CRPE/1060, juin 1980.

(307) Collectif, Rapport d'activité pour l'année 1979, Note Technique CRPE/84, juin 1980.

(308) Collectif, Atmospheric boundary layer studies with an acoustic Doppler, Note Technique CRPE/85, juin 1980.

(309) Collectif, Collection d'articles publiés par le CRPE, Document de travail CRPE/1057, janvier 1980.

(310) Collectif, Groupe Technique ARCAD 3, CRPE-LGE-CNES, Résultats des essais de calibration de l'expérience TBF-ARCAD 3-MQ, Document de travail CRPE/1058, mars 1980.

(311) DELANNOY C., Logiciel de résolution d'un problème inverse à une variable II. Documentation d'utilisation, Note Technique CRPE/81, mars 1980.

(312) DELANNOY C., LEFEUVRE F., Logiciel de résolution d'un problème inverse à une variable I. Exposé des méthodes, Note Technique CRPE/80, mars 1980.

(313) DUBOIN M.L., Revue des informations à tirer des mesures optiques en région aurorale, Document de travail CRPE/1067, novembre 1980.

(314) FEIX I., Programme de test automatique pour le "Passive Package" de l'expérience PICPAB (Rapport de stage effectué au CRPE-ORLEANS), Note Technique CRPE/1068, novembre 1980.

(315) GENDRIN R., General relationships between wave amplification and particle diffusion in a magnetoplasma, Note Technique CRPE/83, juin 1980.

(316) GENDRIN R., Environnement terrestre, activités humaines et relations soleil-terre, Note Technique CRPE/91, décembre 1980.

(317) GENDRIN R., ROUX A., Energization of helium by proton induced hydromagnetic waves, Note Technique CRPE/82, mai 1980.

(318) GENDRIN R., FARGETTON H., LACOUME J.L., Adaptative methods for spectral analysis of time varying signals, Note Technique CRPE/89, novembre 1980.

(319) GILLE P., Présentation de l'ORAS, Document de travail CRPE/1061, juin 1980.

(320) HENRY D., Phénomènes induits par des faisceaux de particules chargées dans l'espace, Document de travail CRPE/1059, avril 1980.

(321) de JAVEL Y., MARQUE J., Unité de commande pour une matrice de commutation en vue de l'accès multiple à répartition dans le temps avec commutation à bord du satellite, Note Technique CRPE/86, juillet 1980.

(322) STRAUSS B., Estimation du bilan d'énergie cinétique turbulente dans la couche limite par sondage acoustique, Document de travail CRPE/1063, juillet 1980.

(323) STOREY L.R.O., POTTELETTE R., Active and passive methods for the study of non-equilibrium plasmas using electrostatic waves, Note Technique CRPE/88, octobre 1980.

(324) TIFFON J., Projet de l'affaiblissement de propagation par les précipitations tropicales associé à l'expérience COPT 81 (convection profonde tropicale 1981), Document de travail CRPE/1062, juillet 1980.

THESES

(401) BERCHEM J., Etude de la convection magnétosphérique à l'aide des données de plasma froid fournies par les satellites GEOS 1 et ISEE 1, Thèse de 3ème cycle, Paris VI, 23 juin 1980.

(402) BIGNOLAS J.B., Etude des premiers stades de la cinétique d'oxydation du titane par spectroscopie des électrons Auger et microscopie électronique à miroir, Thèse de 3ème cycle, Orléans, 17 décembre 1980.

(403) BLANC M., Le champ électrique ionosphérique de moyenne latitude et les dynamos de la haute atmosphère, étude expérimentale par diffusion incohérente et contribution à une interprétation théorique, Thèse de Doctorat d'Etat, Paris VI, 4 novembre 1980.

(404) BONOMI E., Modélisation d'un réseau de connexion : approche par la mécanique statistique, Thèse de 3ème cycle, Orléans, France, 18 novembre 1980.

(405) CORNILLEAU N., Emissions de très basses fréquences dans la magnétosphère, Détection méthodes d'analyse et phénomènes non linéaires, Thèse de Doctorat d'Etat, Paris XI, 30 septembre 1980.

(406) FAGUET J., Cinétique chimique en écoulement supersonique : réactions d'association d'ions mésosphériques à basse température, Thèse de Docteur Ingénieur, Orléans, France, 10 juillet 1980.

(407) FRECAUT A., Etude de la directivité des ondes électrostatiques électroniques excitées dans le plasma magnétosphérique par le sondeur à relaxation des satellites GEOS 1 et GEOS 2 : application à la détermination de la température électronique, Thèse de 3ème cycle, Paris VII, 09 octobre 1980.

(408) HAUSER D., Granulométrie des hydrométéores précipitants en vitesse verticale de l'air - Etude à partir d'un radar Doppler en tir vertical, Thèse de 3ème cycle, Paris VI, 31 janvier 1980.

(409) MORAUX M.P., Quelques applications des groupes d'invariance et de quasi-invariance : équation non linéaire de diffusion de la chaleur, expansion de faisceaux d'électrons, Thèse de 3ème cycle, Orléans, France, 18 juin 1980.

(410) MUNIER A., Groupes d'invariance et de quasi-invariance : applications aux équations d'évolution, Thèse d'Etat, Orléans, France, 21 avril 1980.

(411) PICON O., Influence de l'échange de charge H+, H sur les interactions entre protons et ondes d'ultra basse fréquence dans la magnétosphère, Thèse de 3ème cycle, Paris XI, 20 mai 1980.

(412) POMATHIOD L., Etude des phénomènes physiques responsables du fonctionnement d'une source d'ions de type "à électrons oscillants". Application à la conception et au développement d'un injecteur d'ions embarqué sur le premier laboratoire spatial "Spacelab", Thèse d'Ingénieur - Docteur, Orléans, 29 avril 1980.

(413) ROUX F., Etude de la convection dans l'atmosphère terrestre par un système à deux radars Doppler, Thèse de 3ème cycle, Paris VII, 19 février 1980.

(414) SENIOR C., Les conductivités ionosphériques et leur rôle dans la convection magnétosphérique : une étude expérimentale et théorique, Thèse de 3ème cycle, Paris VI, 13 octobre 1980.

(415) TACONET O., Propriétés et structure des cellules convectives dans la couche limite atmosphérique par sondage acoustique Doppler, Thèse de 3ème cycle, Paris XI, 25 mars 1980.

REVUES A PARAITRE EN 1981

(501) BAROUCH E., Solar wind data and ionospheric potential, Science, 211, 4483, 731, 1981.

(502) BAROUCH E., Energy spectra of incident electrons from auroral ionisation profiles, J. Atmos. Terr. Phys., 1981.

(503) BAUSSET F., Précision de la mesure des paramètres d'un plasma à partir de l'observation directe du microchamp. Application aux plasmas spatiaux, Thèse de 3ème cycle, Paris XI, 26 mai 1981.

(504) BELMONT G., Characteristic frequencies of a non-Maxwellian plasma. A method for localizing the exact frequencies of magnetospheric intense natural waves near f_{pe}, Planet. Space Sci., 1981.

(505) BOSWELL R.W. and J. THIEL, Electron drift-velocity deduced from lower oblique (whistler) resonance cone measurements, Phys. Fluids, 1981.

(506) BUCHALET L.J. and F. LEFEUVRE, One and two direction models from VLF electromagnetic waves observed onboard GEOS 1, J. Geophys. Res., 86 A4, 1981.

(507) CHAUZY S., RAIZONVILLE P., HAUSER D. and ROUX F., Electrical and dynamical description of a frontal storm deduced from Landes 79 experiment, J. Rech. Atmos., 1981.

(508) CORNILLEAU-WEHRLIN N., A new ULF-modulated electrostatic wave detected in the extremely low frequency range onboard GEOS, J. Geophys. Res., 86 A3, 1365-1373, 1981.

(509) DEBRIE R. and J. THIEL, Perpendicular observation of resonances in a Maxwellian magnetoplasma, Phys. Letters A, 1981.

(510) De FERAUDY H. and B. HIGEL, Plasma boundaries at 6.6 R_E as observed by GEOS 2 active wave relaxation sounder, Geophys. Res. Letts., 1981.

(511) FONTAINE D., Etude théorique de la morphologie et de la dynamique des zones aurorales diffuses, Thèse de 3ème cycle, Paris VI, 27 avril 1981.

(512) GENDRIN R., General relationships between wave amplification and particle diffusion in a magnetoplasma, Rev. Geophys. Space Phys., 19 (1), 171-184, 1981.

(513) GOLE P., Dépolarisation des ondes hyperfréquences par les cristaux de glace atmosphérique sur des trajets satellite-terre, Thèse de 3ème cycle, Université de Nice, 22 mai 1981.

(514) GOLE P., DAUTRICHE M., HAMELIN J., MON J.P., RAMAT P. and VERNET M., Radar and atmospheric electricity measurements associated with microwave attenuation and cross-polarization observed on a slant path, Ann. Télécomm., 36 (1-2), 111-116, 1981.

(515) HAUSER D. and P. AMAYENC, A new method for deducing hydrometeor- size distributions and vertical air motions from Doppler radar measurements at vertical incidence, Note Technique CRPE/95, 1981 ; J. Appl. Meteor., 1981.

(516) HAUSER D. and P. AMAYENC, Drop-size distributions and vertical air motions in a thunderstorm as inferred from Doppler radar observations at vertical incidence, Note Technique CRPE/96, 1981 ; J. Rech. Atmos., 1981.

(517) HIGEL B. and WU LEI, Geosynchronous electrodensity and plasma pause characteristics : first statistical studies from the measurements of the GEOS 2 active wave relaxation sounder, J. Geophys. Res., 1981.

(518) LEFEUVRE F., Effets dans la magnétosphère des radiations émises par les lignes électriques, C.R. des Journées Nationales sur la Compatibilité Electromagnétique, Lille, 27-29 janvier 1981.

(519) LEFEUVRE F., PARROT M. and C. DELANNOY, Wave distribution functions estimation of VLF electromagnetic waves observed onboard GEOS-1, J. Geophys. Res., 86 A4, 1981.

(520) LEMBEGE B. and R. DEBRIE, Drift effect on electrostatic modes in an unmagnetized plasma. Part I : Parallel propagation, Phys. Fluids, 1981.

(521) LEMBEGE B. and R. PELLAT, Stability of a thick two-dimensional quasi neutral sheet, Phys. Fluids, 1981.

(522) MON J.P. and MAYRARGUE S., Sodar monitoring of the lower atmosphere and prediction of propagation anomalies on line of sight paths, Proc. ICC, 1981.

(523) MON J.P. et N. SPANJAARD, La propagation des ondes millimétriques sur les trajets Terre ⟷ Espace, Echo Rech., n° 105, 1981.

(524) PIRRE M., Interaction between an artificaly injected ion beam and the neutral atmosphere, Application to the parallel electric field measurement, Ann. Géophys., 1981.

(525) POTTELETTE R., HAMELIN M., LEMBEGE B. and J.M. ILLIANO, Interpretation of the fine structure of electrostatic waves excited in space, Phys. Fluids, 1981.

(526) POTTELETTE R. and L.R.O. STOREY, Active and passive methods for the study of non-equilibrium plasmas, J. Plasma Phys.

(527) RAUCH J.L., Contribution à l'étude du rôle des ondes cyclotroniques ioniques observées à bord des satellites GEOS I et GEOS II. Trace de rayon dans un magnétoplasma à trois composantes, Thèse de 3ème cycle, Paris VI, 1981.

(528) SOLOMON J. and O. PICON, Charge exchange and wave-particle interaction in the proton ring current, J. Geophys. Res., 1981.

(529) STOREY L.R.O. and J. THIEL, Project PORCUPINE : The M.F. mutual impedance probe experiment. Part I : Flight F2 (march 77), Note Technique CRPE/93, 1981.

(530) TACONET O. and A. WEILL, Vertical velocity field and convective plumes in the atmosphere boundary layer as observed with an acoustic Doppler sounder, Boundary Layer Meteo., 1981.

(531) TAIEB C. and M. BLANC, Field line equipotentiality and ion-neutral collisions frequencies in the dynamic region deduced from Saint-Santin ion drift measurements, J. Geophys. Res., 1981.

(532) THIEL J. and R. DEBRIE, Electrostatic waves potential at the plasma and upper hybrid resonance, J. Plasma Phys., 1981.

(533) THIEL J., DORIO R. and C. SOUBRY, The potential created by an alternating point charge in a Maxwellian magnetoplasma, Computed Physics Communications, 1981.

(534) THIEL J. and B. LEMBEGE, Electrostatic electron cyclotron radiation from a point source, Phys. Fluids, 1981.

(535) THOMAS R., BARASSIN J. and A. BARASSIN, Kinetic study at 0.5 Torr of the system $NH_2^+ + CH_3OH$ in the energy range 0.04 - 0.7 eV. Importance of the termolecular formation of NH_4^+ at low energy, Int. J. Mass Spectrom. Ion Phys., 1981.

(536) YOUNG D.T., PERRAUT S., ROUX A., DE VILLEDARY C., GENDRIN R., KORTH A., KREMSER G. and D. JONES, Wave-particle interactions near f_{He^+} observed on GEOS-1 and -2 : 1 - Propagation of ion cyclotron waves in H_{e^+} rich plasma, J. Geophys. Res., 1981.

(537) ZI MIN-YUN, WU LEI, HIGEL and NIELSEN E., Time correlations between ionospheric plasma flow patterns observed by STARE and the plasmapause observed by GEOS 2 - 41. Tagung der Deutschen Geophysikalischen Gesellschaft und 3. Tagung der Arbeits gemeinschaft für Extraterrestrische Physik, 30 März - 3 April 1981, Heidelberg, RFA.

CNET Imp 75/1163