



**HAL**  
open science

## Rapport d'activité CRPE pour l'année 1978

- 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 1978. Note Technique CRPE n°73. 1979. hal-02192233

**HAL Id: hal-02192233**

**<https://hal-lara.archives-ouvertes.fr/hal-02192233>**

Submitted on 23 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 182 (39)  
**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/73**

*rapport d'activité CRPE  
pour l'année 1978*

C. N. R. S.  
Centre de Documentation  
Scientifique et Technique  
Paris 16<sup>e</sup> arr.

CRPE/ETE  
92131 ISSY LES MOULINEAUX  
CRPE/PCE  
45045 ORLÉANS CÉDEX

B

JAN. 1981

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

NOTE TECHNIQUE CRPE/73

RAPPORT D'ACTIVITE CRPE  
POUR L'ANNEE 1978

C.R.P.E./E.T.E.

92131 - ISSY LES MOULINEAUX

C.R.P.E./P.C.E.

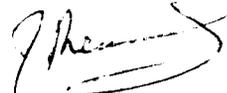
45045 - ORLEANS CEDEX

Le Directeur



J. HIEBLOT

Le Directeur Adjoint



I. REVAH

Mai 1979

## TABLE DES MATIERES

	<u>PAGES</u>
<u>I. INTRODUCTION</u>	1
<u>II. DEPARTEMENT ETUDE PAR TELEDETECTION DE L'ENVIRONNEMENT</u>	
<u>II.1. INTERACTIONS ONDES-PARTICULES</u>	5
II.1.1. Satellites GEOS	5
II.1.2. Traitement du signal	8
II.1.3. Phénomènes non lineaires entre ondes et particules	9
II.1.4. Symposia	11
<u>II.2. RESONANCES DE PLASMAS</u>	13
II.2.1. Etude des résonances de plasma sur les satellites GEOS 1 et 2	14
II.2.1.1. Diagnostic de la densité électronique et du champ magnétique dans la magnétosphère	
II.2.1.2. Etude des fluctuations de la densité électronique	
II.2.1.3. Etude de la propagation des ondes électrostatiques de résonance	
II.2.1.4. Etudes théoriques des réponses résonantes du plasma aux fréquences $f_{Qn}$	
II.2.2. Etude des ondes naturelles sur le satellite ISEE 1	18
II.2.3. Etude de la convection magnétosphérique	18
<u>II.3. ETUDE DYNAMIQUE DE L'IONOSPHERE PAR DIFFUSION INCOHERENTE</u>	19
II.3.1. Structure de l'ionosphère et de la thermosphère	19
II.3.2. Electrodynamique des moyennes latitudes	21
II.3.3. Ionosphère des hautes latitudes : préparation d'EISCAT	23

	<u>PAGES</u>
II.3.4. Couplage d'ondes hyperfréquences dans l'ionosphère	25
II.3.5. Ondes atmosphériques	26
II.3.6. Etudes mésosphériques	27
II.3.7. Activités techniques	28
II.4. <u>DYNAMIQUE DE LA BASSE THERMOSPHERE (RADAR METEORIQUE)</u>	31
II.4.1. Activité technique	31
II.4.2. Ondes planétaires et circulation générale	32
II.4.3. Marées atmosphériques	32
II.4.4. Ondes de gravité	32
II.4.5. Comparaison avec d'autres types de mesures	33
II.5. <u>CONVECTION NUAGEUSE TRIDIMENSIONNELLE ET PRECIPITATIONS</u>	35
II.5.1. Réalisation de campagnes d'observations	35
II.5.2. Préparation d'expériences ultérieures pour l'étude de la convection développée	36
II.5.3. Améliorations techniques des radars	36
II.5.4. Mise au point de méthodologies de dépouillement des données	37
II.5.5. Résultats scientifiques	38
II.5.6. Perspectives	39
II.6. <u>CONVECTION TRIDIMENSIONNELLE DES BASSES COUCHES</u>	41
II.6.1. Définition des objectifs scientifiques	41
II.6.2. Résultats obtenus	41
II.6.3. Perspectives	44
II.7. <u>ETUDES FONDAMENTALES DE PROPAGATION</u>	47
Figures II.1 à II.18	48 à 83

III. DEPARTEMENT PHYSICO-CHIMIE DE L'ENVIRONNEMENT

	<u>PAGES</u>
III.1. <u>PHYSICO-CHIMIE DES ATMOSPHERES</u>	85
III.1.1. Formation des ions agrégats mésosphériques	85
III.1.2. Formation de molécules interstellaires complexes	86
III.1.3. Composition de l'atmosphère de Vénus	87
III.2. <u>CARACTERISATION DES SURFACES</u>	89
III.3. <u>METROLOGIE DES PLASMAS SPATIAUX</u>	91
 <u>ETUDES EXPERIMENTALES</u>	
III.3.1. Expériences en plasma de laboratoire	91
III.3.2. Expériences en fusées "Porc-épic"	92
III.3.3. Expériences en fusées Substorm-GEOS	93
III.3.4. Participation au programme GEOS	94
 <u>ETUDES THEORIQUES</u>	
III.3.5. Spectre croisé	95
III.3.6. Sonde quadripolaire EBF	96
III.3.7. Fonction de distribution des ondes	97
III.3.8. Confinement magnétique d'un écoulement de plasma	98
III.4. <u>DETECTION DES PHENOMENES PHYSIQUES DU PLASMA POLAIRE</u>	101
III.4.1. Etude des instabilités de la couche E polaire	101
III.4.2. Etude de la dynamique et du couplage magnétosphère- ionosphère à bord du satellite ARCAD 3	101
III.4.3. Etude du plasma thermique dans la magnétosphère à bord du satellite GEOS	103
III.4.4. Etude de faisabilité d'expérience de mesure de champ électrique parallèle par injection de particules chargées	104

	<u>PAGES</u>
III.4.5. Les échos à la fréquence hybride basse	104
III.4.6. Les ondes cyclotroniques en laboratoire et dans la magnétosphère	105
III.5. <u>ETUDES EN PLASMA DE LABORATOIRE</u>	109
III.5.1. Travaux scientifiques généraux : étude expérimentale des effets de dérive sur les ondes de Landau en plasma maxwellien quasi-homogène	109
III.5.2. Participation au programme PICPAB	110
III.5.2.1. Source d'ions	
III.5.2.2. Sonde de Langmuir asservie au potentiel plasma	
III.5.3. Plasma de simulation	110
III.5.4. Etudes prospectives, expériences spatiales coopératives avec l'Université d'Utah - U.S.A.	111
III.6. <u>ETUDES THEORIQUES DES PLASMAS</u>	113
<u>REMARQUES GENERALES</u>	
III.6.1. Antennes en milieu ionisé	113
III.6.2. Méthodes algébro-numérique : les Pas de Géants	113
III.6.3. Simulation sur ordinateurs de plasmas fortement corrélés	115
III.6.4. Physique non-linéaire - Théorie des groupes	116
III.6.4.1. Groupes de transformation et dynamique stellaire	
III.6.4.2. Groupes de transformation et dynamique des faisceaux et des plasma (géométrie unidimensionnelle plane)	
III.6.4.3. Lois de similitude et performances des machines à fusion	
III.6.5. Structure et simulation des autocommutateurs	118
Figures III-1 à III-2	122 à 125

IV. PERSONNEL DU CRPE

PAGES

- moyens généraux	127
- répartition par équipes du personnel ETE	129
- répartition par équipes du personnel PCE	131

V. BIBLIOGRAPHIE

133 à 160

## I. INTRODUCTION

L'année 1978 a été, pour le C.R.P.E., celle de l'exploitation intensive des données nouvelles (Geos I, Geos II, ISEE et, au sol, l'ensemble de deux radars Doppler atmosphériques), celle de la préparation technique et scientifique de programmes futurs (Arcad III et Picpab dans le domaine spatial et EISCAT au sol), ce fut aussi une année d'inflexion de nos programmes vers des applications liées aux télécommunications (propagation en présence de météores, charges utiles de télécommunication, modèles de réseaux de commutation).

Pour que des expérimentations de la complexité de GEOS ou de l'étude de la convection nuageuse par radar Doppler deviennent productives sur le plan géophysique il faut une dizaine d'années de travaux préparatoires tant scientifiques que techniques, et il faut rendre hommage à la ténacité de leurs promoteurs et à l'adaptativité des équipes qui ont su forger les méthodes d'interprétation au fur et à mesure des progrès ou des bouleversements des connaissances dans leur discipline. Qui, il y a dix ans, pouvait prévoir que les résultats les plus spectaculaires de GEOS porteraient sur les ondes à caractère électrostatique et, en UBF, les ondes multiharmoniques ? Que la sonde à résonance non seulement fonctionnerait dans le vent solaire mais qu'elle y mesurerait un bruit interprétable en terme d'instabilité de ce plasma ? Comment prévoir que les premiers résultats de l'équipe convection porteraient sur l'étude des fronts et, dans le pur domaine de la convection, sur des sites de montagne, à la suite du prêt de nos appareils à une expérimentation de contrôle de modification du temps ?

Plusieurs expérimentations sont en gestation au C.R.P.E. et ne deviendront productives que dans les années à venir. La plus importante, la plus proche dans le temps, est EISCAT dans l'organisation multinationale de laquelle des chercheurs du C.R.P.E. assument diverses responsabilités de premier plan. Tout laisse présager que le C.R.P.E. sera dans les premiers à exploiter ces futures données : l'expérimentation faite par le C.R.P.E. à

Chatanika pour mesurer, en région aurorale, la raie de plasma, par diffusion incohérente, lors de précipitation de particules, a en effet été un succès -les études théoriques et expérimentales sur la pénétration des courants de convection ont abouti- l'expérience, grâce au sondeur de St Santin, a confirmé l'existence d'effets non linéaires entre ondes hyperfréquence distantes de la fréquence plasma du milieu. Puis viendra en 1981 le lancement d'Arcad III, un peu tard pour l'IMS, qu'il aurait bien complété grâce à son orbite très incliné et à son excentricité. Enfin Picpab qui ouvre la voie aux expériences actives sur le Spacelab, celle-ci visant, grâce à un canon à ions, à décrire les champs électriques alignés le long du champ magnétique.

D'autres études, plus anciennes, restent productives et forment le fond continu de réflexion théorique ou d'expérimentation d'où émergent de temps en temps des programmes plus ambitieux ; ce fond continu, en tout état de cause, présente souvent une efficacité dans le progrès des connaissances que n'ont pas des programmes plus coûteux. Radars météoriques, grand sondeur de St Santin, études de physique mathématique, métrologie des plasmas spatiaux sont à ranger dans ce secteur de production scientifique continue du laboratoire.

Enfin un rapport d'activité sur 1978 montrera mal l'inflexion assez nette des programmes du C.R.P.E., au cours de cette même année, vers des études plus directement orientées vers les télécommunications. Cependant déjà quelques publications en font foi (137), (205), (449).

Il est plus facile de décrire le passé que de donner des indications sur les modifications qui se feront jour. Il est cependant certain que le mouvement vers des objectifs de télécommunication se poursuivra un an ou deux. Un cinquième environ du C.R.P.E. travaillera alors dans ce domaine et il serait bon que des organes compétents du C.N.R.S. (la section 2 du Comité National, par exemple) en soient saisis.

En géophysique deux regroupements devraient se faire, l'un sur la physique des zones de hautes latitudes autour d'EISCAT, l'autre sur le programme international MAP (Middle Atmosphere Program). D'anciennes études du C.R.P.E. comme le grand sondeur de St Santin ou les radars météoriques devraient, dans un cadre comme dans l'autre, trouver une nouvelle inspiration.

La préparation de très gros programmes spatiaux mobilise encore sur des échéanciers tendus l'essentiel des forces à Orléans ; passé cet effort exceptionnel, une diversité plus grande des méthodes sinon des objectifs doit se rétablir : le dynamisme des équipes en physicochimie des atmosphères, en physique mathématique ou en métrologie des plasmas suffiront à rétablir cet équilibre.

Une préoccupation nous reste cependant lorsque nous voyons l'abondance des données dont nous disposons et la richesse de l'éventail des disciplines géophysiques ou appliquées du laboratoire. C'est de ne pouvoir accueillir plus de jeunes chercheurs : leur premier poste, au-delà des bourses et allocations de recherches, est trop aléatoire. Par la suite le C.R.P.E. a toujours fait la preuve de son aptitude, grâce à ses liens avec le C.N.E.T., le C.N.E.S. et diverses industries, à offrir à ceux qui le désiraient des changements profonds dans leur carrière personnelle.

## II. DEPARTEMENT ETUDE PAR TELEDETECTION DE L'ENVIRONNEMENT

### II.1 INTERACTIONS ONDES-PARTICULES

Les travaux du groupe ont eu cette année quatre directions principales :

- Dépouillement des données de GEOS-1 ; exposé et publication des résultats préliminaires ; début du dépouillement des données de GEOS-2.
- Etude critique et mise au point de nouvelles méthodes de traitement des signaux variant rapidement dans le temps.
- Travaux théoriques sur certains effets non linéaires associés aux interactions entre ondes et particules.
- Organisation de Colloques et Symposia.

#### II.1.1. Satellites GEOS

Grâce au long travail de préparation du traitement des données de GEOS, que nous avons entrepris depuis de nombreuses années en liaison avec le CNES et l'ESOC, il a été possible d'obtenir assez rapidement, au sortir d'une expérience complexe et à grand débit de télémétrie, une visualisation très élaborée des différents types de phénomènes observés.

L'orbite très déformée de GEOS-1 ( $\sim 2\ 000 - 38\ 000$  km), si elle a constitué un handicap pour la mise au point des programmes d'utilisation de satellite, et si elle a accru la complexité du dépouillement de ses données, a en revanche permis d'obtenir une plus large couverture des différentes régions de la magnétosphère et de mieux séparer les conditions d'apparition des différents phénomènes (distance radiale, latitude, temps local et activité magnétique).

Le Symposium de l'ESLAB (Innsbrück, juin 1978), consacré aux résultats obtenus à l'aide des satellites GEOS et ISEE a été l'occasion pour les chercheurs responsables des expériences "ondes" de démontrer la qualité de l'"outil GEOS" dans le domaine de la détection et de la caractérisation des différents types d'ondes se propageant dans la magnétosphère, et dans celui de la détermination des propriétés du plasma thermique. La longue liste des articles consacrés aux résultats préliminaires de GEOS-1 (réf. 19, 21, 22, 23, 32, 48, 129), ne doit pas faire illusion : il ne s'agit que de la version écrite des communications présentées à ce Symposium. Elle démontre toutefois :

1. que le satellite a rempli les objectifs scientifiques que les expérimentateurs -et l'ESA- lui avaient assignés.
2. qu'un effort suffisant avait été consenti, tant par les expérimentateurs que par les agences, nationale (CNES) ou internationale (ESOC), pour que le dépouillement suive dans un délai raisonnable l'obtention des données.
3. que les expérimentateurs ont suffisamment pris à coeur cette expérience pour pouvoir présenter, sous une forme publiable, l'ensemble de leurs résultats préliminaires.

Ces articles présentent d'ailleurs des résultats géophysiques ; ils ne consistent pas simplement dans des descriptions d'appareils ou des démonstrations du bon fonctionnement de ceux-ci. Parmi l'ensemble des résultats présentés, certains sont des plus originaux et valent la peine d'être notés. C'est le cas pour :

- l'identification non ambiguë des différentes émissions électrostatiques. C'est ainsi que l'on a pu montrer (fig. II.1) que les émissions discrètes au-dessus de la fréquence de plasma électronique se produisaient exactement aux fréquences " $f_q$ ", qui correspondent aux ondes se propageant à vitesse de groupe nulle entre les différents

harmoniques de la gyrofréquence électronique (20,129). Les conditions d'apparition des émissions aux harmoniques demi-entiers de la gyrofréquence électronique ont également été clarifiées. Le rapport des densités de plasma froid et chaud est en particulier beaucoup plus élevé ( $n_f/n_c \sim 10-30$ ) que ce que les théories communément admises laissaient prévoir ( $n_f/n_c \sim 0.1-1$ ) (fig. II.2).

- la mise en évidence de nouvelles émissions UBF. En particulier des ondes multiharmoniques, dont le fondamental est proche de, mais non égal à, la gyrofréquence protonique ont été observées. Ces ondes ont un vecteur d'onde voisin de la perpendiculaire au champ magnétique local, mais n'ont que très rarement une composante électrique détectable (fig. II.3). Le rôle joué par l'ion  $He^+$  dans l'apparition de ces ondes (ainsi que d'autres ondes de fréquence inférieure à la gyrofréquence des protons) a été démontré (48).
- la découverte des caractéristiques complexes du phénomène de conjugaison (entre sol et satellite), tant pour les ondes UBF que pour les ondes TBF (47, 22, 23, 32) (fig. II.4-5).

Cet ensemble d'observations -complétées récemment par celles de GEOS 2- conduit à repenser certains des mécanismes auxquels on attribue d'habitude la génération de ces ondes. L'étude comparée du spectre des ondes et de la fonction de distribution des particules (obtenue grâce aux autres expériences de GEOS) sera certainement riche d'enseignements dans ce domaine.

Ces travaux ont été effectués principalement avec Mme N. CORNILLEAU-WEHRLIN pour les ondes TBF, Mme S. PERRAUT et A. ROUX pour les ondes UBF. Notons aussi la participation de chercheurs appartenant à d'autres laboratoires français (MM. F. GLANGEAUD au CEPHAG, M. TIXIER au LPHA) ou aux laboratoires étrangers qui sont nos associés dans l'expérience S-300 sur GEOS.

### II.1.2. Traitement du signal

Nos recherches dans ce domaine ont suivi deux directions. La première, liée à la détermination de la polarisation (et de la direction de propagation) d'un signal électromagnétique dont les caractéristiques varient rapidement au cours du temps, est directement motivée par l'analyse des données de GEOS. Dans le domaine TBF par exemple, il est important de suivre les variations avec la fréquence de la direction de la normale d'onde. Une méthode a donc été mise au point (fig. II.6) qui restitue, dans le plan fréquence-temps, la variation des 2 angles  $\theta$  et  $\phi$  caractérisant cette direction par rapport au champ magnétique (122). Cette méthode, qui n'a pour l'instant été appliquée qu'aux données du satellite américain OGO5, présente d'énormes avantages par rapport aux méthodes intégrées fondées sur l'utilisation de la matrice de covariance par exemple, mais elle n'a pas les possibilités de restitution complète obtenues grâce aux techniques -plus lourdes- mises au point par F. LEFEUVRE et M. PARROT à Orléans. En particulier, la prise en considération de l'information contenue dans les composantes électriques s'avère difficile. La transposition aux données de GEOS est en cours, grâce au travail de Mme N. CORNILLEAU-WEHRLIN et de M. G. LOISIER.

Dans le domaine UBF, une méthode similaire est appliquée pour étudier les signaux détectés à bord de GEOS et pour discriminer en particulier les ondes polarisées circulairement, perpendiculairement au champ magnétique local, et les ondes polarisées linéairement, parallèlement à celui-ci (voir en particulier la fig. II.3). L'application -en routine- de cette méthode a posé quelques problèmes délicats (liés à la présence d'un fort signal à la fréquence de rotation du satellite), qui ont été résolus grâce au travail de P. ROBERT (128)

La deuxième direction de recherche est dans la droite ligne de l'étude, entreprise depuis plusieurs années dans notre laboratoire, des concepts de fréquence instantanée et de temps de groupe instantané. On a démontré (45) que ces concepts n'étaient pas équivalents pour un signal dont l'amplitude -comme la fréquence- varient rapidement au cours du temps (fig. II.7).

De ce fait l'analyse de signaux à plusieurs composantes (dont le spectre instantané présente plusieurs pics en fréquence, lesquels varient au cours du temps) peut conduire à de fausses interprétations quant à la nature "vraie" du signal original. Ceci a de graves conséquences quant à l'interprétation de l'origine des émissions magnétosphériques (114, 115) puisque de fausses structures quasi-monochromatiques peuvent apparaître lors d'une analyse sous forme de spectrogrammes (fig. II.8). En revanche, dans certains cas relativement simples, la mise en oeuvre de la méthode dite "modifiée" de la fenêtre glissante (voir rapports précédents) permet toujours de reconstituer les structures même bizarres des émissions magnétosphériques. C'est ainsi que l'on a confirmé l'existence de structure en "chevrons" pour certaines émissions UBF (113) Enfin les méthodes fondées sur la notion de signal analytique gardent toujours leur intérêt, principalement pour l'étude des... cris d'animaux (27, 112).

Cette deuxième étude a été poursuivie principalement avec l'aide de Mme DE VILLEDARY mais il est juste de mentionner que, tant les principes liés à l'analyse de la polarisation que ceux liés à la détermination des puissances spectrales instantanées de signaux complexes ont été découverts par un étudiant japonais, Mr. KODERA, lors d'un stage qu'il effectua il y a quelques années dans notre laboratoire.

L'ensemble des travaux ci-dessus décrits a fait l'objet de nombreuses communications au Symposium Inter Commissions de l'URSI (Helsinki, août 1978) sur les Méthodes d'Analyse des Ondes. Un bon nombre d'entre eux ont donné lieu à des articles à paraître dans le numéro spécial des Annales des Télécommunications consacré à ce Symposium, les autres étant publiés dans des revues diverses.

### II.1.3 Phénomènes non linéaires entre ondes et particules

Deux types de recherches théoriques ont été entreprises (et ont abouti) dans le groupe, sur des phénomènes non linéaires, naturels ou artificiels, se produisant dans la magnétosphère.

Le premier type de phénomène est lié à l'action d'une onde monochromatique de grande amplitude (engendrée artificiellement par un émetteur de très basse fréquence situé au sol) sur les particules chargées de moyenne énergie (10 - 100 keV) circulant dans la magnétosphère. La première étude (49) a consisté à établir les bases quantitatives du mécanisme de piégeage et de dépiégeage des particules dans une onde monochromatique se propageant en milieu inhomogène. On peut ensuite en déduire que les particules relâchées en dehors du plan de l'équateur après la phase de piégeage ont toutes les caractéristiques d'un faisceau lequel engendre, par instabilité cyclotronique, une onde nouvelle communément appelée "émission déclenchée". L'étude a permis d'interpréter qualitativement et quantitativement les différents phénomènes observés lors des injections d'ondes TBF effectuées à partir de la base de Siple (Antarctique). Dans le même esprit, la deuxième étude (108, 109) a permis d'interpréter le phénomène de disparition de bruit ("bande calme") observé aux fréquences juste inférieures à la fréquence de l'onde monochromatique intense (fig. II.9).

Le deuxième type de phénomène est celui qui a trait au rayonnement kilométrique terrestre (on sait que la Terre est un émetteur radioélectrique puissant -1 à 10 GW- dans la bande de fréquence comprise entre  $\sim$  100 et 500 kHz). Une théorie a été proposée (49) qui interprète ce rayonnement en terme d'une interaction entre un faisceau de particules aurales et une onde électrostatique, dont l'inhomogénéité du milieu fait croître fortement l'amplitude au point d'aboutir à une décomposition en deux ondes, dont l'une, électromagnétique, permet au rayonnement de s'échapper.

Ces travaux théoriques doivent trouver leur prolongement dans l'interprétation des différents types d'émissions observées à bord de GEOS (émissions au double de la fréquence de plasma, émissions multiharmoniques UBF, couplage d'ondes UBF et TBF, etc).

#### II.1.4 Symposia

Le responsable de l'équipe (R. GENDRIN), alors Président de la Commission H (Ondes dans les plasmas) de l'URSI, a organisé les sessions de cette Commission à l'Assemblée Générale d' Helsinki (août 1978). Deux Symposia, interdisciplinaires, constituaient l'essentiel de ces sessions : l'un sur les Instabilités dans les Plasmas Spatiaux, l'autre sur les Méthodes d'Analyse des Ondes.

## II.2 RESONANCES DE PLASMA

Les lancements des satellites GEOS 1 (avril 1977), ISEE A (octobre 1977) et GEOS 2 (juillet 1978) ont marqué une nouvelle étape dans l'application aux plasmas spatiaux de la technique du sondage à relaxation. Cette technique permet d'observer, grâce à un émetteur et un récepteur couplés en fréquence, les phénomènes de résonance de plasma qui se produisent à certaines fréquences caractéristiques de la propagation des ondes dans les plasmas, à savoir : fréquence de plasma  $f_{pe}$ , gyrofréquence électronique  $f_{ce}$  et ses harmoniques  $nf_{ce}$ , fréquence hybride haute  $f_{uH}$ , et série des fréquences  $f_{Qn}$  supérieures à  $f_{uH}$  et comprises entre  $nf_{ce}$  et  $(n+1) f_{ce}$ .

Après les résultats obtenus au cours des années précédentes à la suite d'expériences réalisées en fusée sonde dans l'ionosphère, ceux des satellites GEOS 1 et 2 et ISEE 1 apportent :

- d'une part l'extension à la magnétosphère et au vent solaire du diagnostic des plasmas spatiaux (densité électronique, champ magnétique, et peut-être aussi température et vitesse de dérive), ce diagnostic étant indispensable pour réaliser l'étude de la dynamique de l'environnement terrestre ;
- d'autre part des perspectives nouvelles pour l'étude de la propagation des ondes dans les plasmas : en effet de nouveaux phénomènes sont observés (par exemple les résonances à  $f_{Qn}$  sur GEOS 1 et 2) en plus de ceux escomptés, et tous le sont avec des outils très raffinés (sur GEOS par exemple tous les paramètres de l'expérience peuvent être optimisés par télécommande).

Le présent compte-rendu montre les principales directions prises par les travaux expérimentaux et théoriques entrepris au vu des premiers mois de production des données pour GEOS et ISEE.

### II.2.1. Etude des résonances de plasma sur les satellites GEOS 1 et 2

(J. ETCHETO, B. HIGEL)

La figure II.10 montre un exemple typique des données fournies par GEOS 1. En plus des résonances attendues ( $f_{pe}$ ,  $nf_{ce}$ ) qui conduisent à des mesures de densité et champ magnétique, apparaissent les résonances à  $f_{Qn}$ , qui n'avaient été que rarement observées précédemment dans l'ionosphère. On peut noter qu'une comparaison des mesures de densité avec celles d'autres expériences (421, 25) (voir figure II.11) a montré l'insensibilité des mesures par sondage à relaxation aux perturbations apportées par le satellite (figure II.12).

L'étude des résonances proprement dite a pris une nouvelle dimension grâce à la mise en service opérationnel (début 1978) d'un nouvel outil conçu spécialement pour les valoriser : il s'agit du calculateur HP 2100 installé à l'ESOC et raccordé au système ESOC de gestion en temps réel des satellites GEOS. Les programmes logiciels implantés sur ce mini-ordinateur traitent les données S 301 d'une part pour fournir avec un temps de réponse de quelques secondes les valeurs de la fréquence de plasma  $f_{pe}$  et de la gyrofréquence  $f_{ce}$ , d'autre part pour envoyer au satellite les ordres de télécommande adéquats pour réaliser la poursuite automatique en temps réel d'une résonance choisie. Les résultats obtenus peuvent être présentés selon trois thèmes (référence (41)).

#### II.2.1.1. Diagnostic de la densité électronique et du champ magnétique dans la magnétosphère

La figure II.13 est un exemple de profil obtenu pour une journée de fonctionnement pratiquement continu de l'expérience S 301 sur GEOS 2 (une mesure toutes les 22 secondes). Pour les jours "standard" (partage du temps entre les expériences de S 300) on a une mesure au moins toutes les 12 minutes. Ce diagnostic est fourni de façon opérationnelle (24 heures sur 24 pour GEOS 2), avec un taux de disponibilité du calculateur actuellement

(mars 79) supérieur à 95 %. L'interprétation des résultats en termes de dynamique magnétosphérique va être entreprise en collaboration avec les expérimentateurs disposant des mesures complémentaires (température électronique, champ électrique statique, particules de basse énergie). D'ailleurs par leur insertion dans la banque de données GEOS constituée en temps réel, ces mesures sont mises à la disposition des expérimentateurs pour l'interprétation de leurs propres résultats.

#### II.2.1.2. Etude des fluctuations de densité électronique

En mode de fonctionnement non supervisé activement par le calculateur, la résolution temporelle des mesures de densité est de 22 secondes, temps nécessaire pour un balayage complet en fréquence (résolution spatiale correspondante : 50 km). Le pilotage automatique du système de poursuite des résonances permet de restreindre le balayage au strict minimum (quelques % autour de la fréquence de résonance) et d'obtenir une cadence de mesure atteignant 1 point toutes les 86 millisecondes (spatialement 200 mètres). La figure II.14 est un exemple des résultats obtenus. Les fluctuations de densité, mises en évidence précédemment par l'observation des résonances de plasma dans l'ionosphère (expériences EIDI, référence (40)), vont pouvoir être systématiquement étudiées dans la magnétosphère (référence (41)).

#### II.2.1.3. Etude de la propagation des ondes électrostatiques de résonance

En l'absence de fluctuations de densité, le système de poursuite automatique permet d'observer la directivité spatiale du champ électrique des ondes reçues, en mettant à profit la rotation des antennes réceptrices dans le plan perpendiculaire à l'axe de spin du satellite (période : 6 secondes) (références (41) (432)) (figure II.15). Les résultats confirment l'interprétation des résonances à  $nf_{ce}$  par les modes de Bernstein réalisés précédemment dans l'ionosphère (expériences EIDI) et apportent des informations indispensables pour l'interprétation des résonances à  $f_{Qn}$  par les modes de Bernstein également (voir paragraphe II.2.1.4.). Le déploiement

des antennes de GEOS 2 a été mis à profit pour une observation systématique de la directivité de toutes les résonances, pour laquelle la longueur de l'antenne joue un rôle déterminant. On a aussi fait varier la puissance des ondes excitatrices pour étudier la linéarité des phénomènes de résonance. Les mesures de directivité sont en cours de dépouillement et d'interprétation, en particulier dans le cadre du sujet d'une thèse de 3ème cycle (A. FRECAUT).

II.2.1.4. Etudes théoriques des réponses résonantes du plasma  
aux fréquences  $f_{Qn}$  (H. de FERAUDY)

Outre les résonances à la fréquence hybride haute  $f_{uH}$  et aux harmoniques de la gyrofréquence électronique  $nf_{ce}$ , l'approximation quasi statique de la théorie des ondes dans les plasmas prévoit l'existence de résonances apparaissant dans chaque intervalle séparant deux  $nf_{ce}$  pour des fréquences supérieures à  $f_{uH}$  : ce sont les  $f_{Qn}$ .

Un des faits expérimentaux remarquables des expériences de relaxation embarquées à bord des GEOS 1 et 2 est l'observation d'une réponse longue et à spectre étroit lorsque le plasma est excité au voisinage d'une résonance  $f_{Qn}$ .

La théorie indique que ces résonances se produisent pour une longueur d'onde telle que la vitesse du plasma par rapport au récepteur, dans le cas des expériences GEOS, induit un effet Doppler sensible. Il résulte un écart significatif entre les fréquences des réponses du sondeur identifiées comme résonances aux  $f_{Qn}$  et les fréquences  $f_{Qn}$  prévues par la théorie. L'estimation de ce décalage doit permettre d'évaluer la vitesse du plasma par rapport au véhicule et d'en déduire la vitesse de dérive du plasma magnétosphérique par rapport à la terre.

Les travaux se sont développés dans deux directions :

- La recherche d'une expression analytique aussi simple que possible de l'équation de dispersion des ondes électrostatiques au voisinage des  $f_{Qn}$ . Une telle expression a été obtenue pour des fréquences  $f \gg f_{ce}$  et pour une direction de propagation perpendiculaire au champ magnétique statique. Elle permet, par une résolution numérique simple (faible encombrement mémoire, petit nombre d'itérations), d'obtenir rapidement la localisation en fréquence et en longueur d'onde de ces  $f_{Qn}$  pour des conditions données de plasma (densité électronique, température, champ magnétique). L'extension de cette méthode pour des directions de propagation s'écartant de la stricte perpendicularité au champ magnétique statique est en cours (voir II.2.1.3. ci-dessus).
  
- Des travaux antérieurs ont montré que l'hypothèse d'une onde quasi accompagnant le véhicule était plausible et que l'inhomogénéité du plasma rencontré ne devait pas affecter d'une manière déterminante les caractéristiques de propagation des ondes au voisinage des  $f_{Qn}$ . En collaboration avec Michel HAMELIN du CRPE/PCE, on a développé un premier modèle simple dans lequel le plasma est homogène et l'onde "accompagne" strictement le satellite. Toutefois il a été tenu compte des effets de géométrie des antennes émettrices et réceptrices. La vitesse du plasma est prise comme paramètre ; on l'ajuste de manière à faire coïncider les fréquences théoriques et les fréquences observées. Cette étude utilise un développement de Taylor de l'équation de dispersion au voisinage des  $f_{Qn}$  mis au point par Michel HAMELIN. Ce travail a donné lieu à une communication (426).

Actuellement la systématisation et l'automatisation de cette méthode de mesure des vitesses de dérive du plasma est en cours. Les données obtenues dans le mode de poursuite des résonances permettront d'obtenir une bonne résolution spatiale.

### II.2.2. Etudes des ondes naturelles sur le satellite ISEE 1 (J. ETCHETO)

Les sondeurs se sont avérés être d'excellents moyens d'observation des ondes naturelles présentes dans le milieu (grande résolution en fréquence) dont l'interprétation est grandement facilitée par la détermination des fréquences caractéristiques du plasma obtenues quand l'émetteur est en fonctionnement. Cela a mené à exploiter les données de ce point de vue sur ISEE avec M. Trotignon et en collaboration avec l'équipe de l'observatoire de Meudon (dont nous sommes coinvestigateurs sur cette expérience).

Une étude préliminaire des données obtenues dans le vent solaire (début de vie du satellite) a permis de répertorier un certain nombre de types de phénomènes (117) (423) dont nous poursuivons l'étude plus détaillée : émission de différents types d'ondes naturelles, apparition brutale d'importantes fluctuations de la densité du vent solaire. Nous sommes en train de vérifier que beaucoup de ces phénomènes sont liés au fait que la ligne de force du champ magnétique où sont faites les observations est connectée à l'onde de choc de la terre. Nous poursuivons également l'exploitation de nos données dans les régions frontières de la magnétosphère (choc, magnétopause). La figure II.16 montre un passage de choc par ISEE. L'examen de nos premières mesures a montré qu'il fallait changer le mode de fonctionnement de l'expérience pour étudier ces régions et nous recevrons bientôt les premières mesures ainsi obtenues.

### II.2.3. Etude de la convection magnétosphérique

Nous avons, avec J.J. BLOCH, interprété des mesures de densité de GEOS 1 en terme de convection magnétosphérique (30). Cela a montré que les théories régnantes étaient qualitativement en accord avec nos mesures mais nous poursuivons cette étude de façon plus quantitative. La figure II.17 montre un profile de densité typique mesuré par GEOS 1. Une comparaison entre les mesures de GEOS 1 et de ISEE, faite sur quelques exemples, a montré que l'orbite de GEOS ne donnait qu'une vue partielle de la répartition de densité et que la situation réelle est complexe : la définition couramment admise de la plasmopause est simpliste et toute étude détaillée de convection commence par la clarification de la notion de plasmopause.

### II.3 ETUDE DYNAMIQUE DE L'IONOSPHERE PAR DIFFUSION INCOHERENTE

L'activité du groupe évolue dans le sens d'un élargissement de sa compréhension de l'ionosphère-thermosphère des moyennes latitudes par une prise en compte de son couplage avec les domaines voisins de l'atmosphère. Tandis que des étapes nouvelles ont été franchies dans la compréhension "en soi" de ce milieu (étude de la structure thermique de la basse thermosphère, électrodynamique "calme" des moyennes latitudes), l'étude de ses échanges d'impulsion et d'énergie avec les régions environnantes met en évidence la nécessité de l'analyser comme un système ouvert :

- ouvert sur l'ionosphère de haute latitude et sur la magnétosphère (électrodynamique "perturbée" et étude des orages magnétiques).
- ouvert sur la basse atmosphère (étude de la propagation jusqu'à la basse thermosphère des marées atmosphériques et des ondes de gravité de moyenne échelle engendrées dans la stratosphère et la troposphère).

Les activités nouvelles du groupe, en plus d'une expérience de pure physique des plasmas (couplage d'ondes hyperfréquences dans l'ionosphère), sont orientées dans la direction de ces ouvertures :

- vers l'ionosphère de haute latitude, avec la préparation de la participation française à l'expérience EISCAT, sondeur à diffusion auroral en Scandinavie, dont l'exploitation doit démarrer en fin 1979.
- vers la moyenne et basse atmosphère, grâce à l'extension vers la mésosphère et la stratosphère du domaine de mesures du sondeur de Saint-Santin.

#### II.3.1. Structure de l'ionosphère et de la thermosphère

Irrégularité d'ionisation de la région F1 (TAIEB, SCIALOM, KOCKARTS).

Cette étude a été menée à son terme avec la publication d'un article (55) faisant le bilan du rôle relatif des transports, des phénomènes de recombinaison, et de la distribution verticale des ions  $O^+$  dans les variations en fonction de la saison et du cycle solaire de l'intensité de l'irrégularité et de son altitude et apparition.

Structure de la thermosphère (ALCAYDE, BAUER, BERNARD, EMERY, FONTANARI, KOCKARTS)

La structure thermique de la basse thermosphère a été étudiée à l'échelle d'un cycle solaire complet (101), ce qui a permis de mettre en évidence sa variation annuelle et d'estimer indirectement le coefficient de diffusion turbulente. Dans la haute thermosphère les progrès réalisés durant les années passées ont permis d'aborder une phase de synthèse des modèles issus des différents sondeurs et satellites (1). B. EMERY, scientifique américaine hôte du CRPE pendant 15 mois dans le cadre du programme d'échange NSF/CNRS, a achevé son étude des vents thermosphériques entreprise à l'aide du radar à diffusion incohérente de Millstone Hill (Massachusetts) (28, 29) et proposé une méthode permettant, en tenant compte du terme de friction ions-neutres dans l'équation de l'énergie du gaz d'ions, d'améliorer le calcul de la température exosphérique et de la densité d'oxygène atomique (422).

Enfin, en réponse à une invitation, M. BLANC a présenté un exposé de synthèse des progrès des dernières années dans la description de la structure et de la dynamique de l'ionosphère des moyennes latitude (409), lors de l'assemblée générale de l'URSI.

- Dynamique de l'ionosphère équatoriale (J.M. FAYNOT, P. VILA)

Une étude d'ensemble des strates ascendantes de l'ionosphère équatoriale observées sur trois années au-dessus de Sarh (111) a permis de dépasser des hypothèses simplificatrices antérieures. Il y est suggéré que la variation matinale de la couche  $F_2$  ionosphérique, et ses changements

jour à jour, sont contrôlés par un mécanisme complexe de couplage électrodynamique entre les vents neutres zonaux en région E et en région F, du type "dynamo de la région F".

- Effets ionosphériques de l'éclipse solaire du 23 octobre 1976

(P. BAUER, M.L. DUBOIN, J.M. FAYNOT, P. VILA)

Malgré le caractère partiel (14 % du disque solaire) de l'éclipse qui s'est produite au voisinage de la zone de lever au point conjugué magnétique de Saint-Santin, des effets très clairs ont été mis en évidence par comparaison avec un jour de contrôle. On a observé le jour de l'éclipse (i) une couche ionosphérique plus forte, (ii) des températures électroniques plus faibles et (iii) une diminution d'intensité de l'émission de la raie rouge à  $6\ 300\ \text{Å}$ . Une perturbation du champ électrique ionosphérique par l'éclipse, agissant en opposition à la descente du niveau de la couche au lever conjugué, est une explication possible. Une étude en cours permettra de tester quantitativement la relation de ces trois effets au phénomène d'absorption des photoélectrons conjugués par l'ionosphère locale.

II.3.2. Electrodynamique des moyennes latitudes

Cette étude se poursuit sur deux niveaux : l'étude des champs électriques en région F, leur morphologie par jours calmes et durant les orages magnétiques ; l'étude de l'interaction champs électriques-mouvements neutres dans la basse thermosphère, et des courants électriques qu'elle produit.

a) Champs électriques en région F (BLANC)

La morphologie des champs électriques par jours calmes, leur variation jour à jour et saisonnière ont été modélisées en collaboration avec P. AMAYENC (102). Une image représentative du champ "dynamo" induit dans l'ionosphère par les marées atmosphériques a ainsi été obtenue. Il reste à prolonger cette image à l'échelle du globe, pour pouvoir enfin

réaliser un test cohérent de la théorie dynamo atmosphérique.

M. BARON (Stanford Research Institute, Californie) et M. BLANC, qui ont succédé en juillet 1978 à P. BAUER et J.V. EVANS à la présidence du groupe de travail de l'URSI sur la diffusion incohérente, ont engagé cet effort en collaboration avec A.D. RICHMOND (NOAA, Colorado). Il vise à constituer dans le courant de l'année 1979, à partir de l'ensemble des données de champs électriques fournies par tous les sondeurs à diffusion, un modèle saisonnier du potentiel électrostatique ionosphérique en moyennes et basses latitudes.

Les effets des sous-orages et des orages magnétosphériques sur le champ électrique commencent à être partiellement compris. La relation de ces perturbations du champ aux variations du champ magnétique interplanétaire et au développement du courant annulaire de la magnétosphère (11) a été étudiée sur un grand nombre de cas en vue de la rédaction prochaine d'un article faisant la synthèse sur ce point.

L'interprétation théorique de ces perturbations peut être maintenant abordée de façon quantitative précise grâce au modèle dynamo développé sur le calculateur du CNET. Ce modèle a été systématiquement utilisé pour étudier les contributions respectives d'un mécanisme de "dynamo perturbée" (effet des vents produits par le chauffage auroral pendant les orages) et d'une pénétration directe du champ de convection magnétosphérique aux perturbations observées.

b) Electrodynamique de la basse thermosphère (MAZAUDIER, SENIOR, TAIEB, VILA, BLANC)

Cette étude est le prolongement indispensable de la précédente, puisqu'elle vise à étudier directement la région où les champs électriques sont engendrés par l'écoulement de courants électriques dans la couche conductrice de l'ionosphère, typiquement de 90 à 170 km d'altitude.

C. TAIEB s'est consacré à l'étude de la cohérence entre les mouvements du plasma dans cette gamme d'altitude, les modèles courants de fréquences de collisions ions-neutres, et l'hypothèse classique d'équipotentialité des lignes de force. Ce test de cohérence est un préliminaire indispensable à une description systématique des interactions ions-neutres dans cette région. Cette description est maintenant entreprise. C. MAZAUDIER a commencé une étude morphologique des courants ionosphériques portant sur leurs variations en altitude et en temps, tandis que C. SENIOR a mis au point le calcul des profils de conductivité électrique à partir des données du sondeur. Ces efforts, qui sont directement utilisables pour les études EISCAT, promettent d'amener un grand nombre de résultats originaux dans les années à venir.

### II.3.3. Ionosphère des hautes latitudes : préparation d'EISCAT

Avec l'échéance maintenant proche de l'ouverture du radar auroral EISCAT, le groupe s'est engagé dans la préparation de son exploitation scientifique à différents niveaux :

- Préparation scientifique de la communauté française, avec l'édition des exposés du colloque de La Londe-Les-Maurs, centré sur l'"Electrodynamique des atmosphères" et donc faisant une large part à l'électrodynamique des hautes latitudes (213).
- Information du public, grâce à un article de vulgarisation dans "la Recherche" (12).
- Prises de responsabilités dans la société EISCAT et le développement de son instrument. P. BAUER a été désigné pour succéder à H. RISHBETH à la présidence du conseil scientifique de la société. Il a également présenté à l'assemblée générale de l'URSI une communication invitée (404) faisant le point des applications d'EISCAT à l'étude de l'atmosphère neutre.

G. LEJEUNE (CEPHAG) a effectué un long séjour à Kiruna (Suède) pour implanter le programme d'interprétation physique des spectres de diffusion incohérente sur le calculateur d'EISCAT.

- Préparation directe des expériences EISCAT, au moyen de programmes de collaboration avec les groupes américains exploitant le sondeur auroral de Chatanika (Alaska). Sous la responsabilité de W. KOFMAN (CEPHAG), le corrélateur à large bande du CRPE a été installé au foyer du radar de Chatanika, permettant la première mise en évidence expérimentale de l'excitation d'oscillations de plasma dans la région E aurorale par les précipitations d'électrons énergétiques. Cette expérience ouvre la voie à la mesure directe des courants parallèles par diffusion incohérente. D. ALCAYDE et M. BLANC ont séjourné un mois au SRI, organisme responsable du radar, pour faire le point des résultats scientifiques obtenus par les Américains à Chatanika, et pour réaliser une série d'observations coordonnées entre Chatanika et Saint-Santin. Enfin, pour compléter ce bilan scientifique et accroître la banque de données et programmes sur la physique des régions aurorales, M. BLANC a effectué un séjour de 5 mois dans le groupe du professeur P.M. BANKS à Utah State University, pour travailler sur les données des radars de Chatanika et Millstone Hill. Le travail effectué, et les données recueillies, en collaboration avec les groupes du SRI et de USU, va permettre au groupe d'une part de se familiariser aux mesures de l'ionosphère aurorale, d'autre part de mener un certain nombre d'études sur différents aspects de la convection du plasma en zone aurorale : étude des variations du champ électrique en zone aurorale et en moyenne latitude pendant les sous-orages magnétiques ; morphologie des électrojets auroraux, en particulier profil vertical des courants et conductivités.
- Etablissement des programmes d'observations pour la participation française à EISCAT, grâce à un séminaire organisé à Toulouse par le CESR (201).

- Développement de plusieurs outils numériques "lourds" d'étude de l'ionosphère aurorale. E. BAROUCH a démarré la réalisation d'un programme d'interprétation des profils de densité de la région E aurorale qui, à partir d'une modélisation de l'interaction entre les précipitations d'électrons auroraux et la haute atmosphère, permettra de déduire des données du radar EISCAT le spectre d'énergie des électrons précipités. C. TAIEB développe, en collaboration avec M. POINSARD du centre de calcul du CNET, un modèle numérique de résolution des équations de transport du plasma ionosphérique, en vue de l'interprétation des données de vitesse, composition, et densité de EISCAT.

#### II.3.4. Couplage d'ondes hyperfréquences dans l'ionosphère (BAUER, CERISIER, LAVERGNAT)

L'expérience d'interaction non-linéaire entre deux ondes hyperfréquences émises par le sondeur de Saint-Santin a donné lieu à des développements expérimentaux et suscité un important effort théorique.

La recherche de la condition de résonance avec le milieu (satisfaite lorsque la différence des deux fréquences émises égale la fréquence de plasma du milieu) a été rendue automatique grâce à l'utilisation d'une rampe de fréquence. Les produits de l'interaction ont été observés depuis les trois stations de réception simultanément, c'est-à-dire pour trois vecteurs d'ondes de directions différentes. Les résultats ont fait l'objet d'une communication à l'URSI (405). On s'oriente maintenant vers une configuration monostatique de l'expérience, c'est-à-dire un sondage par impulsion avec réception à Saint-Santin même à l'aide d'une antenne auxiliaire.

L'interprétation théorique des observations, qui pose un problème complexe de physique des plasmas non homogènes, a nettement progressé et laisse prévoir une publication prochaine.

### II.3.5. Ondes atmosphériques (BERNARD, BERTIN, TESTUD, VIDAL-MADJAR)

La génération, la propagation verticale, et l'interaction avec la basse thermosphère des ondes atmosphériques engendrées dans la troposphère-stratosphère ont été étudiées dans deux domaines spectraux.

Les marées atmosphériques, et plus particulièrement leur variabilité jour à jour ont fait l'objet de la thèse de R. BERNARD, soutenue en novembre (5, 305). Ce travail a utilisé conjointement les données du sondeur de Saint-Santin et celles du radar météorologique (voir compte-rendu de ce groupe).

Les ondes de gravité de moyenne échelle ont été étudiées sur un domaine spectral élargi. Dans la haute thermosphère, leur détection par des réseaux de polarimètres en France et en Angleterre (10) a permis, par un calcul de tracé inverse de rayons, de localiser leur source avec une excellente précision sur le bord polaire du jet stream météorologique. Elles ont été plus récemment également détectées dans la basse thermosphère (entre 100 et 120 km d'altitude) où des ondes de plus courte période (10 à 20 minutes) non observables aux altitudes supérieures peuvent être ainsi étudiées. VIDAL-MADJAR a montré qu'à partir uniquement des observations du sondeur à trois altitudes on pouvait calculer l'ensemble des caractéristiques, y compris le vecteur d'onde horizontal, de l'onde (233, 309). Il a étudié leur effet sur le vent moyen et leur dissipation dans la basse thermosphère à l'aide d'un modèle numérique (455), et montré qu'elles constituent une source importante d'impulsion et d'énergie dans cette région, où elles sont dissipées essentiellement entre 120 et 200 kilomètres d'altitude. Enfin, en collaboration avec F. BERTIN et J. TESTUD, il a proposé un mécanisme de génération pour ces ondes (61). Comme leur vitesse de phase est très supérieure à la vitesse d'écoulement du jet stream, il semble qu'elles sont non des ondes "primaires" créées par les instabilités d'écoulement du jet, mais le résultat d'interactions non linéaires entre différents modes instables à faible vitesse de phase. L'ensemble de ce travail a fait l'objet d'une thèse soutenue en octobre (233, 309).

### II.3.6. Etudes mésosphériques (BERTIN, FUKUYAMA, KOFMAN)

Motivé par les études précédemment mentionnées qui ont mis en évidence l'influence des basses couches sur la thermosphère, un effort important a été poursuivi, sous l'impulsion de F. BERTIN, pour étendre à la mésosphère et à la stratosphère la gamme d'altitudes accessible au sondeur de Saint-Santin.

La théorie de la mesure a progressé grâce à l'étude du spectre de diffusion incohérente mésosphérique. FUKUYAMA et KOFMAN ont montré que les deux composantes du spectre, un spectre "ionique" étroit (quelques dizaines de Hz) et un spectre électronique large (quelques kHz) sont superposés, et que de la mesure simultanée de ces deux composantes on peut déduire la densité du gaz neutre et la concentration d'ions négatifs, en plus du vent neutre et de la densité d'électrons.

Au cours de campagnes préliminaires, F. BERTIN a pu effectivement mesurer les deux composantes et en déduire une densité neutre en bon accord avec les modèles, ainsi qu'un profil de vent cohérent avec celui mesuré par le radar météorique. Ces résultats préliminaires seront prochainement publiés.

Cependant l'extrême difficulté de la mesure dans les conditions actuelles, due à la nécessité de discriminer en temps réel les effets de signaux parasites dus à la propagation troposphérique et aux échos sur les avions, amène à rechercher une configuration du sondeur mieux adaptée à une étude systématique de la mésosphère. Une étude de faisabilité (203) a permis de conclure qu'une méthode de codage en phase de l'émetteur, permettant de discriminer les échos parasites par leur distance, répond au problème. La mise en oeuvre de la nouvelle configuration est prévue pour la fin de 1979. Elle permettra à l'équipe d'avoir accès simultanément à deux instruments (Saint-Santin et EISCAT) pour étudier la mésosphère.

### II.3.7. Activités techniques

Menées au sein du groupe "techniques sol" sous la responsabilité de F. BAUDIN, elles ont porté d'une part sur l'amélioration de l'équipement existant, d'autre part sur le développement ou la modification de matériels en vue d'expériences nouvelles.

#### 1. Amélioration de l'équipement

L'antenne de réception de Mende a été soumise à des mesures géométriques précises sur la base desquelles on a pu corriger la position du réflecteur hyperbolique, améliorant ainsi le diagramme d'antenne (M. DURREMBERGER, en collaboration avec les services de mécanique du CNET et l'INAG).

Les chaînes d'analyse spectrale par polycorrélateurs ont été adaptées aux mesures dans la mésosphère, grâce à l'insertion de deux filtres d'analyse à 1,75 MHz de bandes 1 et 3 kHz (M. MOUGINOT).

La schématisation du sondeur, qui rassemble toutes les informations techniques sur les chaînes des quatre stations, a été remise à jour (M. LECOURT).

La configuration du système informatique des stations de Monpazier et Mende a fait l'objet d'adjonctions et de modifications importantes. Un dérouleur de bandes 9 pistes a été acquis pour chaque station afin de les adapter aux normes modernes des centres de calcul. A Mende, on a acquis un système DMA (direct memory access) permettant de mener de front l'écriture sur bande magnétique et le traitement du signal de mesure. Cette amélioration, rendue nécessaire par les besoins de l'expérience "pulsations magnétiques" du CEPHAG à Grenoble, permet d'augmenter la cadence d'enregistrement des données tout en réduisant à zéro les temps morts. Enfin, toujours à Mende, l'adjonction d'une unité disque de 128 K mots va permettre d'étendre considérablement les possibilités de développement du software de gestion des expériences.

## 2. Expérience "interaction d'ondes" en monostatique

Cette expérience nécessitant le passage à une configuration monostatique en vue de l'amélioration de son bilan de puissance, on a procédé à la mise en place d'une chaîne de réception radar sur le site même de Saint-Santin.

- L'antenne parabolique de Saint-Santin a été pointée vers la verticale (M. DURREMBERGER et services de mécanique du CNET).
- Un récepteur à 935 MHz, transposant le signal à 70 MHz en sortie, a été mis en place (M. CAMUS).
- Enfin les interfaces logiques réalisant la synchronisation émission-réception ont été construites (M. DUBOIS).

#### II.4. DYNAMIQUE DE LA BASSE THERMOSPHERE (RADAR METEORIQUE)

L'objectif du groupe radar météorologique en 1978 était essentiellement la poursuite des campagnes de mesures coordonnées au niveau international, notamment par le radar installé à Porto Rico à proximité du sondeur à diffusion incohérente d'Arécibo. L'activité scientifique portait parallèlement sur l'exploitation de l'ensemble des données acquises précédemment pour l'étude de la propagation des ondes atmosphériques dans la haute mésosphère.

##### II.4.1. Activité technique

Après la campagne d'installation et d'essai d'août 1977, quatre campagnes ont été effectuées suivant le programme établi en accord avec l'équipe du sondeur à diffusion d'Arécibo (décembre 1977, mars 1978, juin 1978 et août 1978). Trois de ces campagnes se sont déroulées correctement, mais celle de juin a été écourtée par une panne causée par la foudre.

Depuis août 1978, le radar météorologique de Porto Rico a été mis à la disposition du Pr. ROPER du Georgia Tech. (Atlanta) qui doit en assurer le fonctionnement grâce à un financement de la NSF. Cependant l'installation nécessaire d'un ordinateur de gestion en temps réel permettant de réduire les opérations de dépouillement a retardé la mise en route qui n'a pas été possible avant 1979.

Le radar météorologique de Monpazier a assuré les mêmes campagnes. La priorité accordée au fonctionnement du radar de Porto Rico n'a pas permis l'utilisation des deux émetteurs pour la mesure de la turbulence. Cette expérience reprendra au début 1979. L'activité scientifique s'est poursuivie suivant les principaux axes définis par les différents types d'ondes observées dans la haute mésosphère.

#### II.4.2. Ondes planétaires et circulation générale (M. MASSEBEUF)

L'ensemble des mesures faites à Garchy et Kiruna a permis la réalisation d'un modèle des variations saisonnières de la circulation générale à ces deux latitudes définissant les variations annuelles et semi-annuelles de la composante zonale du vent . D'autre part, une étude des différentes périodes apparaissant dans le spectre des ondes planétaires aux différentes latitudes (Kiruna - Garchy - Porto-Rico) est entreprise, pour une comparaison avec les périodes propres des ondes libres susceptibles de se propager dans la haute mésosphère.

#### II.4.3. Marées atmosphériques (R. BERNARD)

L'analyse des données du radar météorologique et du sondeur à diffusion du CRPE a permis de définir expérimentalement le régime moyen des marées aux moyennes et hautes latitudes, ses variations saisonnières, et de caractériser la forte variabilité observée comme la superposition d'une variation lente (d'échelle supérieure à la semaine) de l'onde principale, et d'ondes de courte longueur d'onde et de durée de vie limitée. L'étude théorique de la propagation des marées a permis de rendre compte des variations saisonnières (par le calcul de la source d'excitation) et d'autre part de définir les causes de la variabilité, en étendant les modèles d'interaction avec la structure de base de l'atmosphère au cas où celle-ci dépend de la longitude (301) . Les données de Porto-Rico ont permis de confirmer le modèle théorique développé à partir des mesures de Garchy et Kiruna.

#### II.4.4. Ondes de gravité (M.E. LE QUERE)

Une étude expérimentale a été entreprise, cherchant à caractériser les ondes de gravité et leurs répartition spectrale aux différentes latitudes. L'étude statistique ainsi menée a permis de mettre en évidence une plus grande amplitude moyenne des ondes de gravité à haute latitude (Kiruna) qu'à basse et moyenne latitude (Porto-Rico et Garchy). Par contre aucune variation saisonnière notable n'est observée.

D'autre part, la détermination de la période de la longueur d'onde verticale permet de définir la direction de propagation si on dispose soit de la polarisation en observant les deux composantes du vecteur vitesse (grâce au radar de Paray-le-Monial), soit de deux stations d'observation proches (radars de Garchy et de Monpazier). M.E. LE QUERE a montré que les ondes de gravité proviennent essentiellement du Nord, Nord-Ouest, L'ensemble de cette étude constituera sa thèse de 3ème cycle.

#### II.4.5. Comparaison avec d'autres types de mesures (J.L. FELLOUS)

- les mesures faites à Arécibo par le sondeur à diffusion, dans la même gamme d'altitude que le radar, ont permis de comparer directement les deux méthodes, montrant les différences de résolution temporelle et spatiale. L'accord entre ces deux instruments permettra de les utiliser de façon complémentaire, le radar au-dessous de 100 km, le sondeur à diffusion au-dessus.
- une étude systématique de comparaison entre les mesures de vent du radar météorologique et les mesures optiques de raie verte 5577 Å à l'Observatoire de Haute-Provence a été entreprise, en collaboration avec le laboratoire d'aéronomie de Verrières. Des oscillations de même périodicité (marées - ondes planétaires - ondes de gravité) ont été observées simultanément par les deux méthodes. La comparaison des phases et des amplitudes de ces oscillations, faite pour quelques cas, est en bon accord avec la théorie développée par M. PETITDIDIER. L'étude doit être poursuivie à partir d'autres campagnes. Elle pourra aussi se baser sur des mesures similaires faites à l'Observatoire d'Arécibo (Porto-Rico).
- les campagnes de mesures coordonnées au niveau international ont abouti à une première série de publications groupées (34) permettant un premier essai de description globale des marées et de la circulation générale.

- la collaboration avec l'Institut d'Hydrométéorologie de Moscou s'est également poursuivie pour l'étude des ondes planétaires et des marées. Une comparaison des méthodes de mesures des radars français et soviétiques a permis de définir une méthode indirecte de détermination de l'altitude pour ces derniers.

## II.5 CONVECTION NUAGEUSE TRIDIMENSIONNELLE ET PRECIPITATIONS

Les objectifs scientifiques élaborés en 1977 ont été poursuivis durant l'année 1978. Il s'agit de l'utilisation des radars Doppler du système RONSARD pour :

- l'étude des systèmes frontaux à moyenne latitude,
- l'étude de la convection profonde.

Pour remplir ces objectifs, l'activité du groupe a été diversifiée sur les tâches suivantes :

- Réalisation de campagnes d'observations,
- Préparation de campagnes ultérieures,
- Amélioration technologique des radars,
- Mise au point de méthodologies de dépouillement des données,
- Obtention et interprétation de résultats scientifiques.

### II.5.1. Réalisation de campagnes d'observations

Deux expériences ont été conduites en 1978 :

- i) La première ("FRONTS 78") destinée à compléter le capital de données obtenues lors de la première campagne de ce type (FRONTS 77) (214) a eu lieu en région parisienne du 7 au 31 mars 1978. Elle associait le système RONSARD et un ensemble de mesures météorologiques (une station de sondages météorologiques et mesures au sol classiques) sous la responsabilité de l'EERM. Deux observations de passages frontaux bien organisés les 16 et 22 mars ont pu être obtenues.
- ii) La deuxième s'est déroulée du 17 juillet au 1er août 78 en Suisse dans la région de Zurich à l'occasion d'une implantation préalable du système RONSARD (prestation de service du CRPE à l'IOPG de

Clermont Ferrand). Elle visait à acquérir des données dans des cellules convectives liées à des orages. Cette expérience s'est déroulée en coopération avec les moyens expérimentaux du LAPGTH/ETH de Zurich (radar de surveillance 10 cm, réseau sol de pluviomètres - grélimètres) et de ceux de l'équipe ROSSET du LAMP de Clermont Ferrand (une station de radiosondages météorologiques).

Plusieurs cellules convectives réparties sur 4 jours de mesures ont pu être observées.

#### II.5.2. Préparation d'expériences ultérieures pour l'étude de la convection développée

Dans le cadre des études de la convection développée devant conduire en 1981 à l'expérience COPT (202) (Convection Profonde Tropicale) en Côte d'Ivoire, l'expérience préparatoire "Landes 79" destinées à obtenir des données de convection profonde à moyenne latitude, en utilisant des moyens comparables à ceux de l'expérience COPT, a été définitivement organisée. Elle se déroulera dans la région de Bordeaux du 17 juillet au 31 août 1979 et elle associera le système RONSARD du CRPE, la station météorologique 4 M (EERM), un ensemble de mesures de l'intensité et de la localisation des charges électriques atmosphériques (ONERA), des mesures météorologiques au sol et un radar de surveillance (Météorologie Nationale, Bordeaux). Elle servira également de support au développement du modèle théorique de convection profonde à moyenne échelle du L.M.D. pour le projet COPT.

La préparation de l'expérience COPT proprement dite a également été poursuivie au plan de sa définition détaillée et de la mise en place des contacts nécessaires à sa réalisation.

#### II.5.3. Améliorations techniques des radars

Un important travail de fiabilisation générale du matériel a été réalisé en 1978. D'autre part, les performances des radars ont été améliorées

par des modifications techniques permettant :

- l'élimination des imperfections du contrôle automatique de gain,
- la mesure précise des valeurs de variance de vitesse,
- la détection et la correction automatique des vitesses ambiguës.

En outre, une étude concernant l'étalonnage absolu des radars par des mesures des fonctions de transfert interne a été menée à bien (B. NUTTEN et coll.).

#### II.5.4. Mise au point de méthodologies de dépouillement des données

Trois types de programmes lourds correspondant à divers modes d'acquisition des données par les radars ont été certifiés et rendus opérationnels.

- i) La méthodologie "VAD", bien adaptée à l'étude des situations stratiformes, donne accès à la vitesse horizontale moyenne et à sa divergence dans une aire typique de 50 km de diamètre avec une résolution en altitude de 300 m.
- ii) La méthodologie "COPLAN", destinée essentiellement à l'étude de cellules convectives, permet la restitution de champ de vitesse tridimensionnelle et de ses dérivées jusqu'au 2ème ordre, à l'intérieur d'un cube de 50 x 50 x 20 km avec une résolution horizontale de 1 x 1 km et verticale de 300 m.
- iii) La méthodologie "Tir vertical" permet d'atteindre des caractéristiques granulométriques des précipitations (spectres dimensionnels nombre-diamètre des hydrométéores précipitants) ainsi que la vitesse verticale de l'air au zénith du radar avec une résolution verticale de 200 m au-dessus de 800 m d'altitude.

L'utilisation de ces méthodologies permet d'aborder l'analyse d'une situation observée, à des échelles spatiales différentes et complémentaires.

### II.5.5. Résultats scientifiques

A partir du capital de données existant, le groupe a poursuivi ou entrepris plusieurs études présentées ci-après :

i) Etude d'un front froid (J. TESTUD et coll.)

Cette étude fait suite aux travaux de thèse de 3ème cycle (1977) de G. BREGER, relative à l'observation du 20 mai 1976. L'analyse du champ de vitesse tridimensionnel a été approfondie. On a pu en inferrer la structure thermique associée et aborder une étude des relations du champ de vitesse avec la structure des précipitations observées. Ces résultats ont été rassemblés dans une publication en cours de soumission (132).

ii) Etude dynamique tridimensionnelle sur des éléments convectifs.

Les observations sont relatives à la campagne FRONTS 77 (6 octobre) (453) et à la campagne Suisse (18 juillet) (M. CHONG, F. ROUX). Dans les deux cas, le schéma de circulation tridimensionnelle a été établi et on a pu montrer la stabilité des structures en tenant compte de l'advection avec le vent moyen. Ces résultats permettent de caractériser le bilan d'échange de masse, quantité de mouvement, divergence et rotationnel dans le nuage. En outre, les capacités du traitement utilisé ont également permis de calculer le Lagrangien de la vitesse verticale qui constitue un traceur de la perturbation de température potentielle virtuelle par rapport à l'état stable préconvectif. Cette approche permet ainsi de caractériser les échanges de flux thermiques dans la cellule convective.

iii) Etude microphysique des précipitations et des mouvements verticaux de l'air à petite échelle (P. AMAYENC, D. HAUSER)

L'étude utilisant les tirs verticaux des radars est relative aux cas d'une précipitation stratiforme (front chaud du 2.11.77) (403) et d'une cellule convective (Suisse - 18.07.78). Il s'est agi de comparer entre elles

les diverses méthodes que l'on peut utiliser pour déterminer la vitesse verticale de l'air et la distribution dimensionnelle des hydrométéores et de proposer des améliorations aux approches utilisées antérieurement en déterminant simultanément les deux quantités précédentes.

On a montré que, tandis que les structures de vitesse verticale restent cohérentes à l'échelle d'une séquence d'observation (environ 2 mn), les distributions dimensionnelles présentent une forte variabilité. Les relations entre réflectivité radar, contenu en eau précipitante et taux de précipitation sont conformes à celles prévues théoriquement lorsqu'on tient compte de la variabilité des distributions.

#### II.5.6. Perspectives

Doté de programmes de dépouillement performants et éprouvés, le groupe poursuivra en 1979 les travaux engagés sur les thèmes exposés précédemment. La complémentarité des programmes d'observation à diverses échelles permettra d'approfondir les mécanismes d'interaction entre la dynamique et les processus de formation des précipitations. Enfin, l'objectif majeur qui reste l'étude de la convection profonde trouvera matière à développement tant au plan expérimental que théorique.

## II.6 CONVECTION TRIDIMENSIONNELLE DES BASSES COUCHES

### II.6.1. Définition des objectifs scientifiques

L'objectif prioritaire est l'utilisation du sondage acoustique Doppler afin de développer l'étude de la couche limite atmosphérique :

- 1) Ondes de gravité,
- 2) Dynamique des érosions d'inversion,
- 3) Structure des cellules convectives,
- 4) Etablissement des bilans énergétiques turbulents,
- 5) Structure des profils de vent,
- 6) Signature de la vitesse verticale des écoulements dans la couche limite atmosphérique.

Le caractère presque parfaitement eulérien des mesures sodar et de l'observation simultanée par facsimilé de la couche limite atmosphérique permet de développer des études en particulier dans des domaines ou des "créneaux" de recherche existant : (phénomènes instationnaires de transition). L'année 1978 nous a permis de tirer l'enseignement de la campagne de VOVES 77 et d'entreprendre une campagne de mesure d'hiver VOVES 78.

### II.6.2. Résultats obtenus

#### 1. Ondes de gravité

L. Eymard a concrétisé son étude sur les oscillations d'inversion par une thèse de spécialité (208, 305), et deux articles (110) (458). Deux grands types d'ondes ont été observées :

a) des ondes de gravité-inertie créées dans un cisaillement de vent dans la couche d'inversion, piégées avec un niveau critique (niveau de résonance) de période de l'ordre de quelques minutes, de célérité voisine de  $8 \text{ ms}^{-1}$  et colinéaires au vent dans la couche d'observation.

b) des ondes de gravité-inertie, en interaction avec les cellules convectives sous-jacentes de période voisine de la dizaine de minutes se propageant obliquement par rapport au vent dans la couche d'observation et transportant de l'énergie vers le haut contrairement au mode a). Une étude d'évolution d'un système d'onde depuis la nuit jusqu'à la fin de matinée a montré l'existence des deux systèmes a) avant que la convection se fasse pénétrante, et a) + b) existant simultanément au moment où la couche convective s'épaissit. Cette étude est orientée actuellement dans le sens de l'interaction cellules convectives-couche d'inversion (P. Bouteloup), dans un but d'obtention de données énergétiques quantitatives : contribution des ondes dans l'évolution de l'inversion matinale.

## 2. Dynamique des érosions d'inversion, bilans énergétiques, paramétrisation

Des bilans énergétiques à partir des mesures sodar ont été effectués et l'on a essayé de relier les érosions d'inversion non pas au flux de chaleur au sol, mais à la variance de vitesse verticale dans la couche convective ; nous pensons ainsi pouvoir expliquer les stagnations d'inversion dans les conditions fortement convectives, à flux de chaleur croissant dans le temps.

L'expérience de VOVES 77 nous a permis d'étudier l'hypothèse d'advection de turbulence thermique dans les couches d'inversion observable par le sodar et de formaliser cette hypothèse (63).

L'utilisation du concept de similitude locale appliqué à la variance de vitesse verticale nous a donné l'occasion d'obtenir des profils de flux de chaleurs et d'utiliser les données sodar pour le calcul du flux de chaleur au sol (comparable aux mesures in situ, par l'I.N.R.A.) et d'autre part de déterminer l'altitude de l'inversion le matin (couches minces).

Notre méthode a l'avantage, pour des intervalles de temps courts :

- i) de permettre de suivre les cellules convectives contribuant au flux de chaleur ; il suffit alors de calculer celui-ci, sur un temps suffisant pour intégrer plusieurs de ces "thermiques", méthode puissante, puisque le concept de moyenne de LUMLEY - PANOVSKY (1965) impliquait des mesures en aveugle sur des temps de l'ordre de l'heure, en laissant échapper la variabilité des phénomènes.
  
- ii) cette méthode a l'avantage sur les mesures avion de permettre l'exploration des couches minces et l'étude des phénomènes instationnaires, en nous affranchissant des problèmes de sillage ou "convection" inhérente aux systèmes de mesures sur mâts météorologiques. Cette étude a fait l'objet de trois articles (134, 458, 460) et trois communications. Nous avons d'autre part été amenés à formaliser l'expression des fonctions de structures des fluctuations de température, une formule pour la couche convective donnant l'expression de  $C_T^2$  jusqu'à  $0.9 Z_I$ ,  $Z_I$  étant l'altitude de l'inversion pour le radar (zone de maximum pour la réflectivité, équivalent au maximum de flux négatif) (134).

### 3. Profil de vent

C. KLAPISZ tout en collaborant aux autres études a systématisé les profils de vent dans les inversions matinales et proposé une formule originale, consistante avec les théories existantes et représentant véritablement un progrès dans l'extension des connaissances de la couche de surface, vers la couche bien mélangée et la couche d'inversion (135).

### 4. Cellules convectives, mouvements verticaux

O. TACONNET entreprend une thèse de spécialité sur la signature de la vitesse verticale dans la couche limite. Son étude commence à donner des résultats sur la dissymétrie de distribution. Un des objectifs importants

sera de relier les mouvements descendants dans l'inversion avec le flux de de chaleur négatif.

### II.6.3. Perspectives

Depuis la campagne couche limite de CHIGNE 1975, le sondage acoustique Doppler est utilisé de façon quantitative dans nos études de micrométéorologie : un bilan non exhaustif montre que nous avons pu étudier sous un jour nouveau à partir d'échantillonnages conditionnels :

- 1) les érosions d'inversion,
- 2) les oscillations des couches d'inversion,
- 3) la dynamique de cellules convective,
- 4) les profils de vent matinaux,
- 5) la paramétrisation des variances de vitesse verticale et des moments d'ordre trois de celle-ci (SKEWNESS),
  
- 6) la conversion énergie cinétique turbulente en flux de chaleur sensible,
  
- 7) les mesures de taux de dissipation turbulente dans diverses conditions et leur relation avec les bilans d'énergie cinétique turbulente,
  
- 8) les interactions "turbulence" et "oscillations de l'inversion",
- 9) la paramétrisation de la "réflectivité" acoustique.

sans compter l'ensemble d'expériences communes avec d'autres équipes (E.E.R.M., INRA) qui nous ont permis d'entreprendre des études comparatives.

Au plan international, notre équipe est reconnue ; il semble d'ailleurs que notre conception d'utilisation du sodar nous ait été favorable : nous avons utilisé un instrument, en nous contentant du développement technique de 1974,

suffisant pour nos études, puisque la physique de la mesure avait été élaborée (A. SPIZZICHINO, M. AUBRY et al.). Ceci nous a permis d'aller très loin dans l'utilisation du sondeur acoustique, au contraire de nos partenaires étrangers qui ont choisi les développements techniques au détriment des résultats scientifiques.

Le développement technique n'a pas pour autant été abandonné puisque F. BAUDIN, chef du groupe technique sol, développe un sodar Doppler simplifié à partir d'un microprocesseur, et que d'autre part un microsondeur Doppler nécessaire pour compléter notre étude des basses couches est aussi en cours de développement : cet ensemble de deux instruments correspond à une motivation scientifique ; en effet à court et à moyen terme nous souhaitons entreprendre des études de couche limite à "moyenne échelle" ou échelle régionale, en nous intéressant particulièrement aux problèmes des effets d'hétérogénéités, ainsi que la représentativité d'une paramétrisation à moyenne échelle : le sondeur acoustique Doppler appliqué à des mesures en des points d'une maille de 25 km x 25 km ou plus, en y joignant d'autres instruments de mesure, devrait nous donner des informations intéressantes sur la couche limite atmosphérique (couche limite hétérogène) alors que jusqu'à présent nos connaissances se rapportent à la couche limite planétaire, homogène, "idéalisée" et telle que des mesures "unidimensionnelles" sont capables de la représenter.

## II.7 ETUDES FONDAMENTALES DE PROPAGATION (J.P. MON)

Depuis le milieu de l'année 1978 le C.R.P.E. s'est engagé dans des études de propagation des ondes électromagnétiques dans l'atmosphère terrestre. Ces études sont menées en comparant les données acquises simultanément sur des liaisons radioélectriques d'une part et par des sondeurs acoustiques (SODAR) ou des radars météorologiques (RONSARD) d'autre part.

La spécificité de ces équipements conduit à distinguer deux domaines d'étude : celui de la propagation en air clair et celui de la propagation en présence d'hydrométéores. Les liaisons radioélectriques considérées sont soit des liaisons en visibilité soit des liaisons obliques (Satellite-Terre) fonctionnant à des fréquences supérieures au Gigahertz.

Le but de ces études est d'essayer de comprendre, à partir d'études de cas, la structure fine des phénomènes et d'élaborer des théories que l'on comparera à des mesures obtenues lors d'évènements météorologiques particuliers.

Une première série de mesures concernant la propagation en présence d'hydrométéores a été effectuée au mois de juillet 1978, en liaison avec les P.T.T. suisses, lors de la campagne entreprise en Suisse par le groupe "Convection nuageuse tridimensionnelle et précipitations". Les mesures sont en cours d'exploitation.

La propagation en air clair a été étudiée sur les liaisons à 4,1 et 6,2 GHz établies par le département du CNET "Antennes et Propagation Hertzienne" entre Viabon et Sermaise au cours de la campagne de mesures entreprise à Voves par le groupe "Convection tridimensionnelle des basses couches", du 22 novembre au 20 décembre 1978. Les résultats sont en cours d'interprétation.

FIGURE II-1

SATELLITE GEOS-1

Identification d'émissions électrostatiques naturelles au-dessus de la fréquence de plasma. Durant la plus grande partie du passage représenté ici, le détecteur d'ondes électriques était en mode passif. On note une forte émission à la fréquence hybride haute (très peu différente ici de la fréquence de plasma) et quelques émissions aux fréquences  $f_q$  immédiatement supérieures. L'identification est obtenue grâce au cycle actif (sondeur à relaxation) mis en marche à la fin du passage (réf. 20, 129).

Fig. II-1

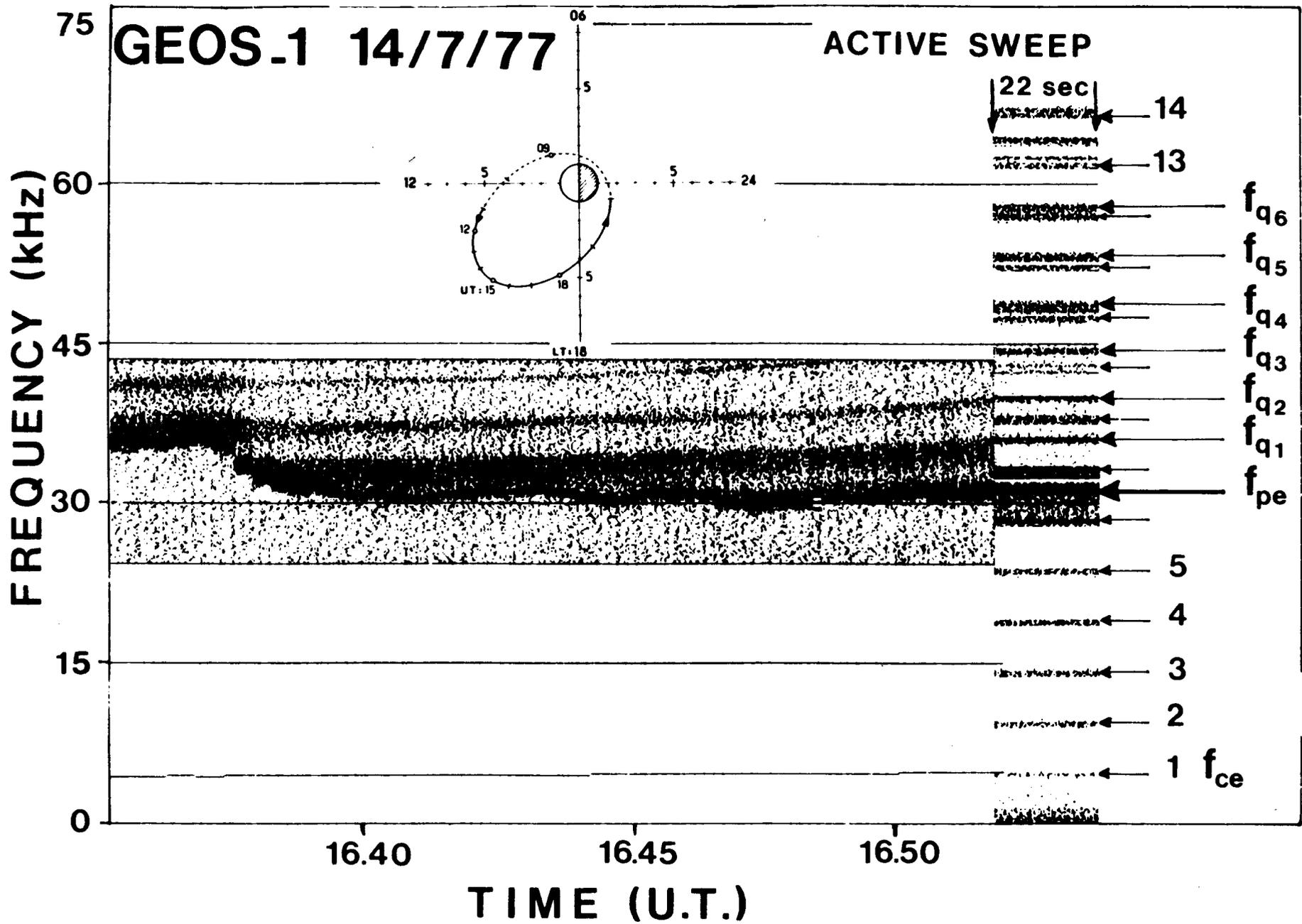


FIGURE II-2

SATELLITE GEOS-1

Emissions électrostatiques naturelles au voisinage des multiples demi-entiers de la gyrofréquence électronique. Contrairement à ce qui était cru jusqu'alors, ces émissions peuvent apparaître même lorsque la densité de plasma froid (environ  $20 \text{ cm}^{-3}$  sur cet exemple) est élevée. Ces ondes sont très localisées ( $\pm 4^\circ$ ) au voisinage de l'équateur géomagnétique.

JULY 6, 1977

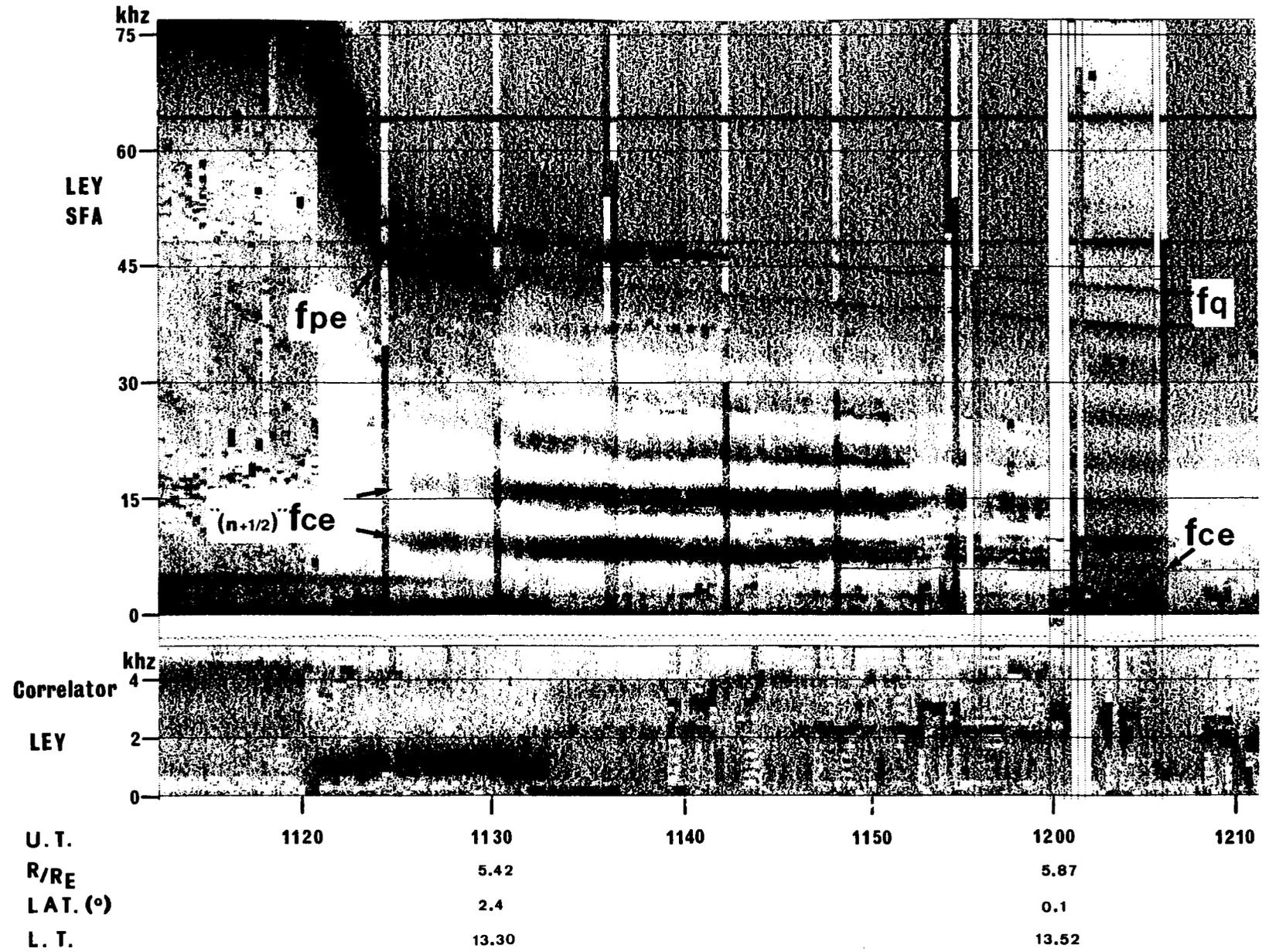


Fig. II-2

FIGURE II-3

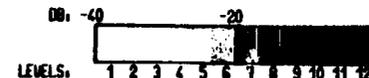
SATELLITE GEOS-1

Ondes naturelles d'ultra basse fréquence, détectées sur les antennes magnétiques UBF de GEOS. On distingue les ondes de fréquence inférieure à la gyrofréquence des protons (II), dont la polarisation, quasi circulaire, est contenue dans le plan perpendiculaire en champ magnétique (ici peu différent de l'axe de rotation Z du satellite) et les ondes à harmoniques multiples (I) dont la composante principale est parallèle au champ magnétique et dont le fondamental est très voisin, et en général supérieur, de la gyrofréquence des protons (R. GENDRIN, S. PERRAUT, A. ROUX, non publié).

16/ 8/1978

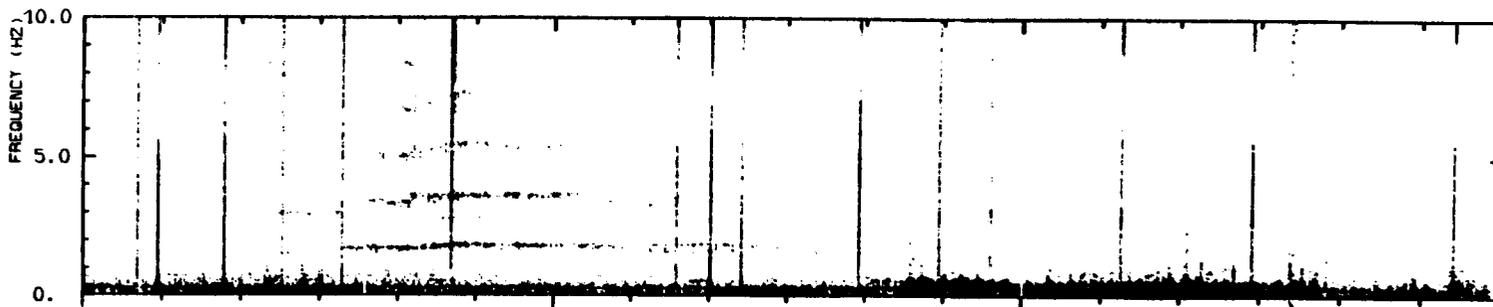
# GEOS II: S-300 EXPERIMENTER SUMMARY

-FRAME 1-



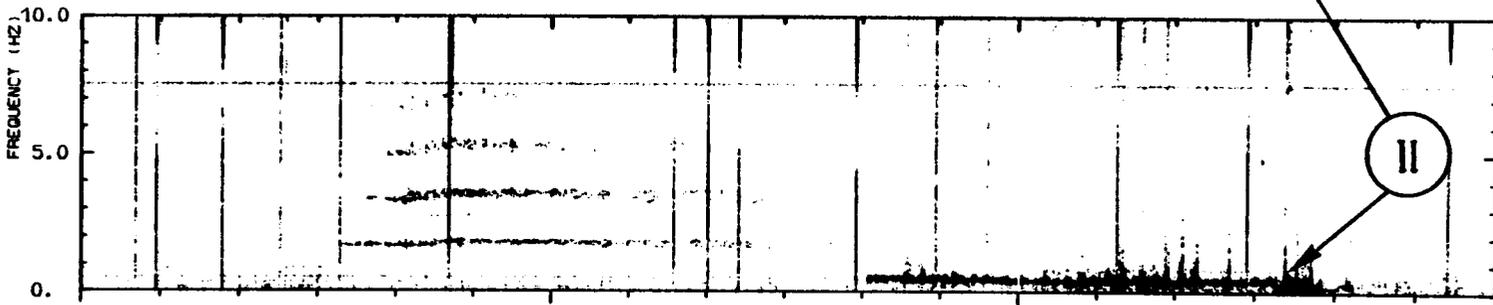
## BR

BLACK<sub>1</sub>  
0.45  $\mu^2$ /Hz  
AT 1 Hz



## BL

BLACK<sub>1</sub>  
0.36  $\mu^2$ /Hz  
AT 1 Hz



## BZ

BLACK<sub>1</sub>  
0.23  $\mu^2$ /Hz  
AT 1 Hz

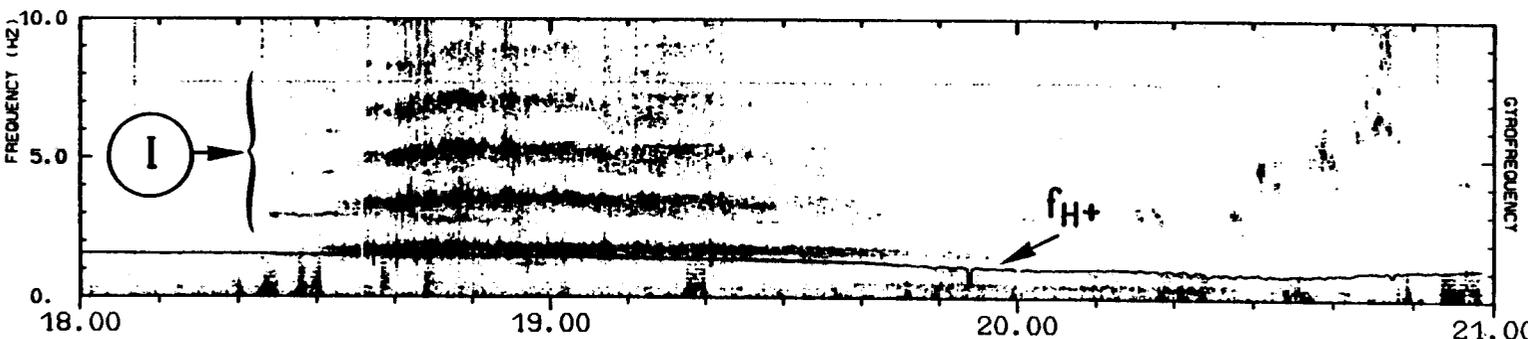


Fig. II-3

- 53 -

Ultra-Low Frequency natural waves detected with the GEOS ULF magnetic antennas. Waves with frequency below the proton gyrofrequency (II) can be seen, the polarization of which is quasi-circular in the plane perpendicular to the magnetic field (in the present case almost aligned with the spin axis of the satellite). Multiharmonic waves (I) have their main component parallel to the magnetic field and a fundamental which is very near to, and generally higher than the proton gyrofrequency ( $f_{H+}$ ).

FIGURE II-4

SATELLITE GEOS-1

Exemple de conjugaison des ondes UBF (de fréquence inférieure à la gyrofréquence des protons), enregistrées aux stations de SKIBOTN (Norvège), HUSAFELL (Islande) et à bord de GEOS-1. La trace du pied de la ligne de force passant par GEOS est représentée sur la partie inférieure de la figure (réf. 32).

SKIBOTN -16.08.1977-

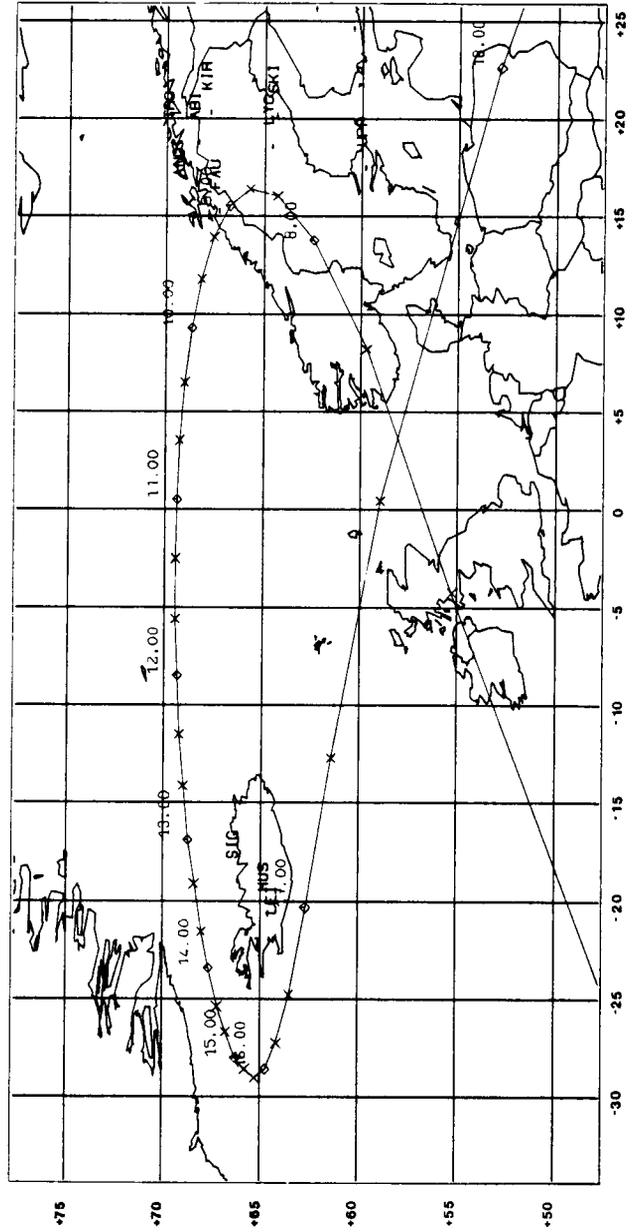
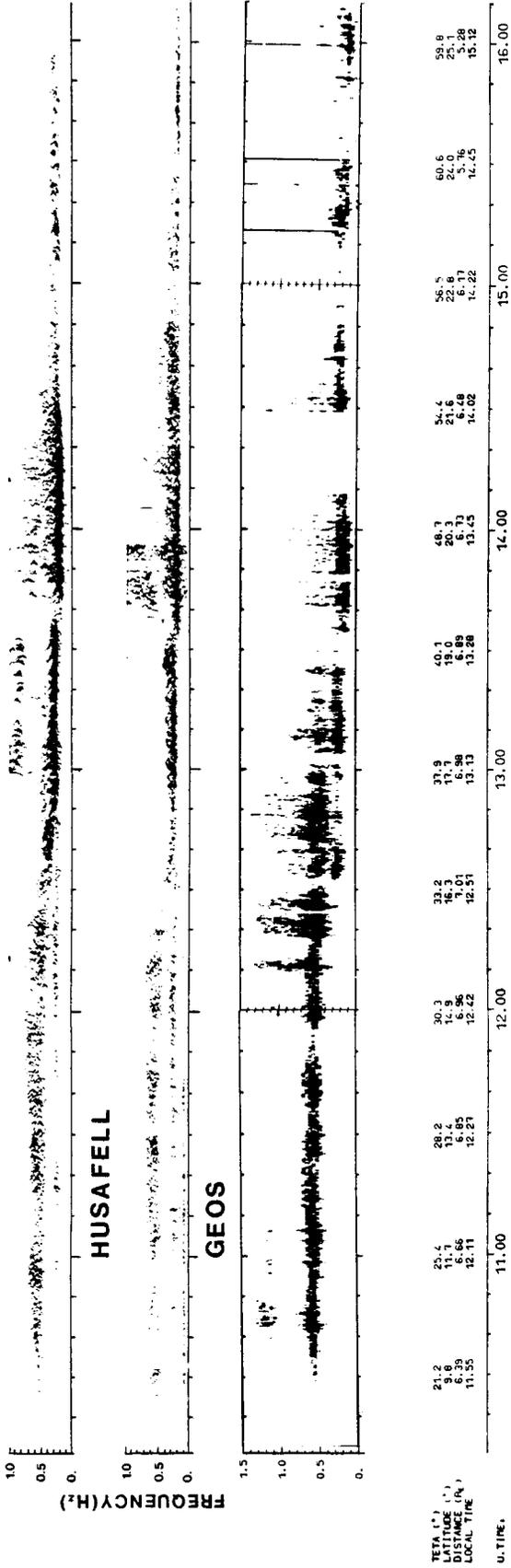


Fig. II-4

FIGURE II-5

SATELLITE GEOS-1

Exemple de conjugaison de souffle radioélectrique (fréquence inférieure à la gyrofréquence électronique) entre la station de HUSAFELL et le satellite GEOS. Le spectrogramme de l'émission est représenté dans la partie supérieure de la figure. Les autres courbes représentent le bruit intégré dans différentes gammes de fréquence. L'apparition simultanée au sol et en satellite des bouffées de bruit peut être due à l'existence éphémère de bulles de plasma froid ou à de multiples injections de particules chaudes (réf. 22).

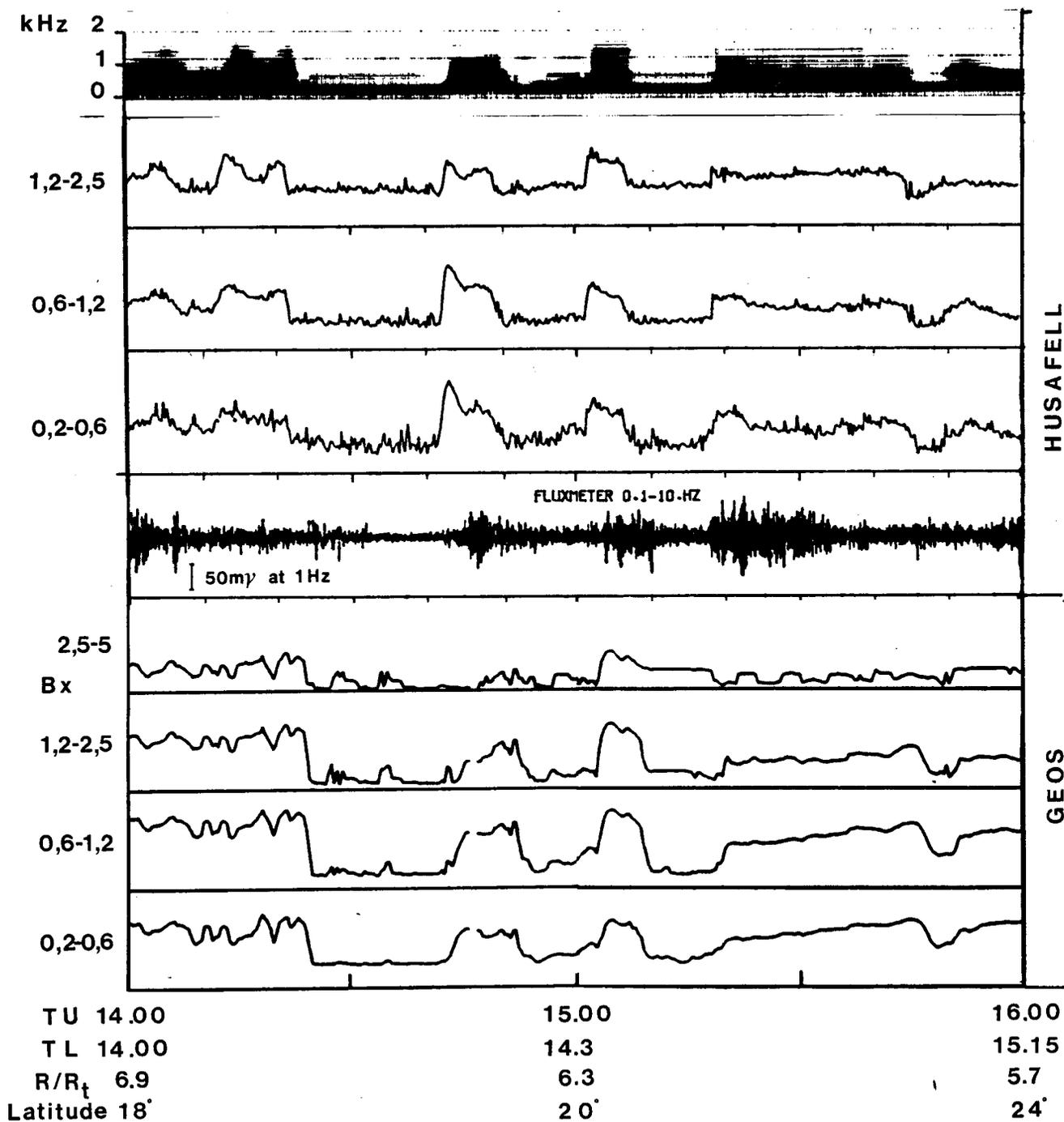


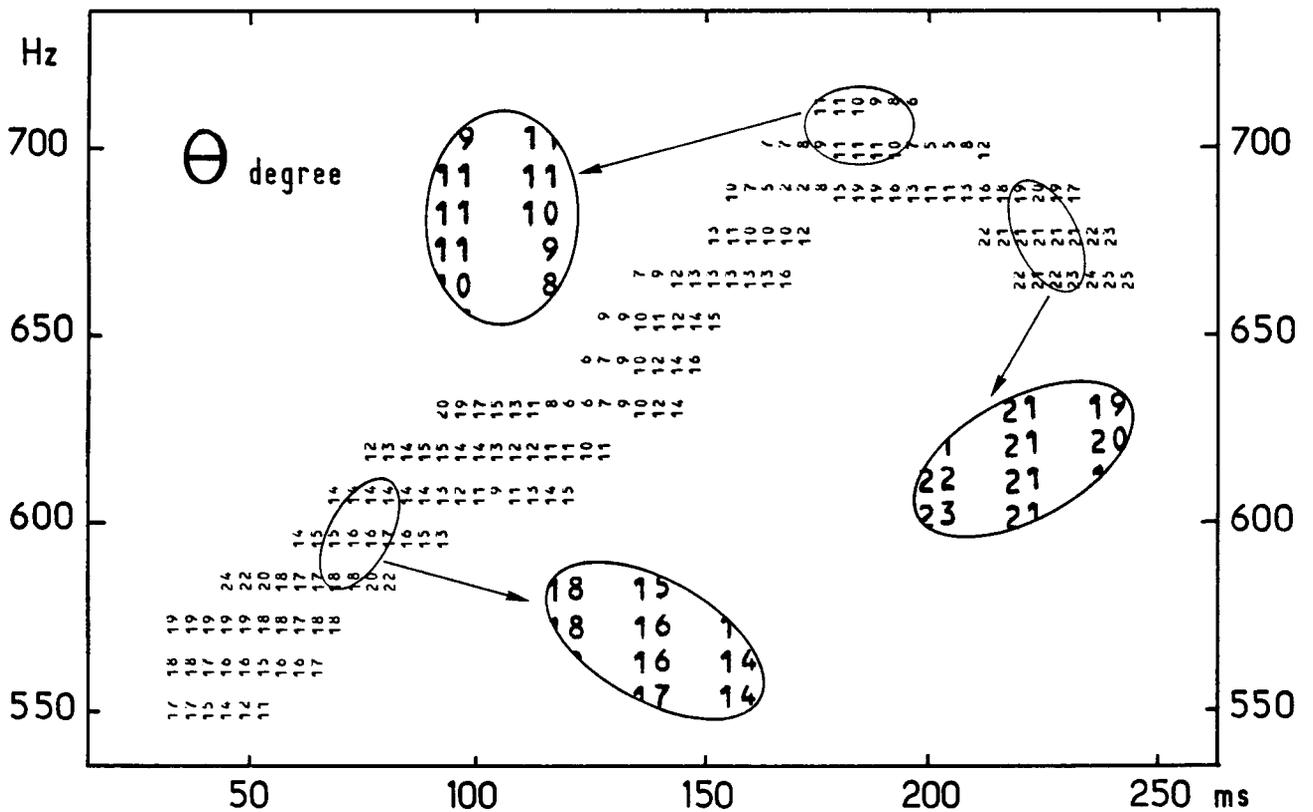
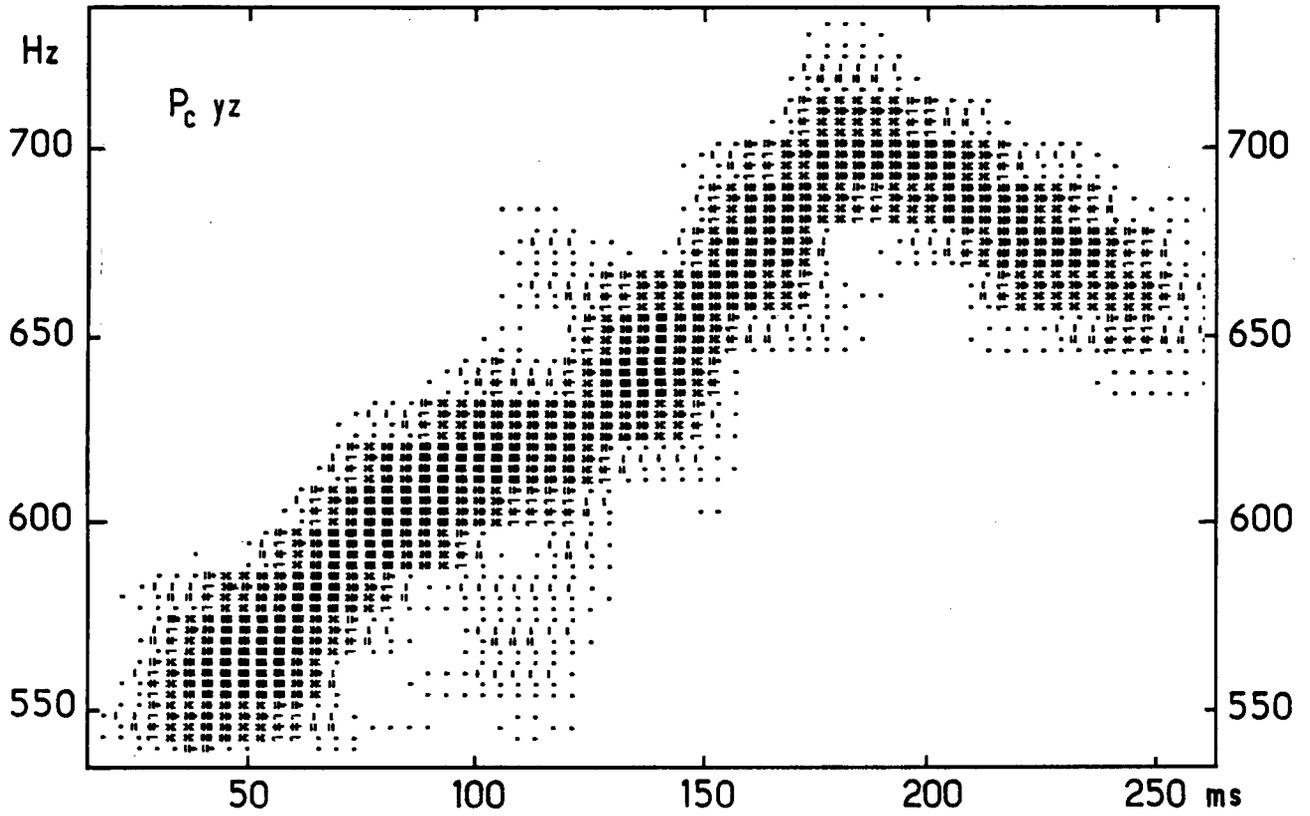
Fig. II-5

FIGURE II-6

TRAITEMENT DU SIGNAL

Restitution de la direction de normale d'onde d'un signal variant dans le temps. Par la considération des puissances circulaires de signe opposé calculées dans trois plans orthogonaux, on peut reconstituer la direction du vecteur d'onde (ici, par rapport à un repère géomagnétique). Au cours de cet élément de coeur de l'aube, enregistré à bord du satellite OGO 5, l'angle  $\theta$ , bien que variable, reste faible, indiquant une propagation quasi longitudinale et un mécanisme de génération en des points différents de la ligne de force pour les différentes fréquences. Le panneau supérieur représente, en grisé, la puissance circulaire positive à travers le plan xy des antennes (réf. 122).

08.15.1968 L.T. 00.56 L = 7.14  $\lambda_m = 0.4$  degree



07h 43mn 20s U.T.

Fig. II-6

FIGURE II-7

TRAITEMENT DU SIGNAL

Etude de différentes méthodes d'analyse permettant de restituer la puissance spectrale d'un signal dont à la fois l'amplitude et la fréquence varient au cours du temps. Le signal original simulé numériquement est représenté à gauche. La réponse obtenue par différentes méthodes et pour différentes largeurs du filtre équivalent est représentée à droite. Seule la méthode modifiée de la fenêtre glissante (MMWM) permet de restituer correctement le signal quelle que soit la largeur du filtre utilisé (réf. 45).

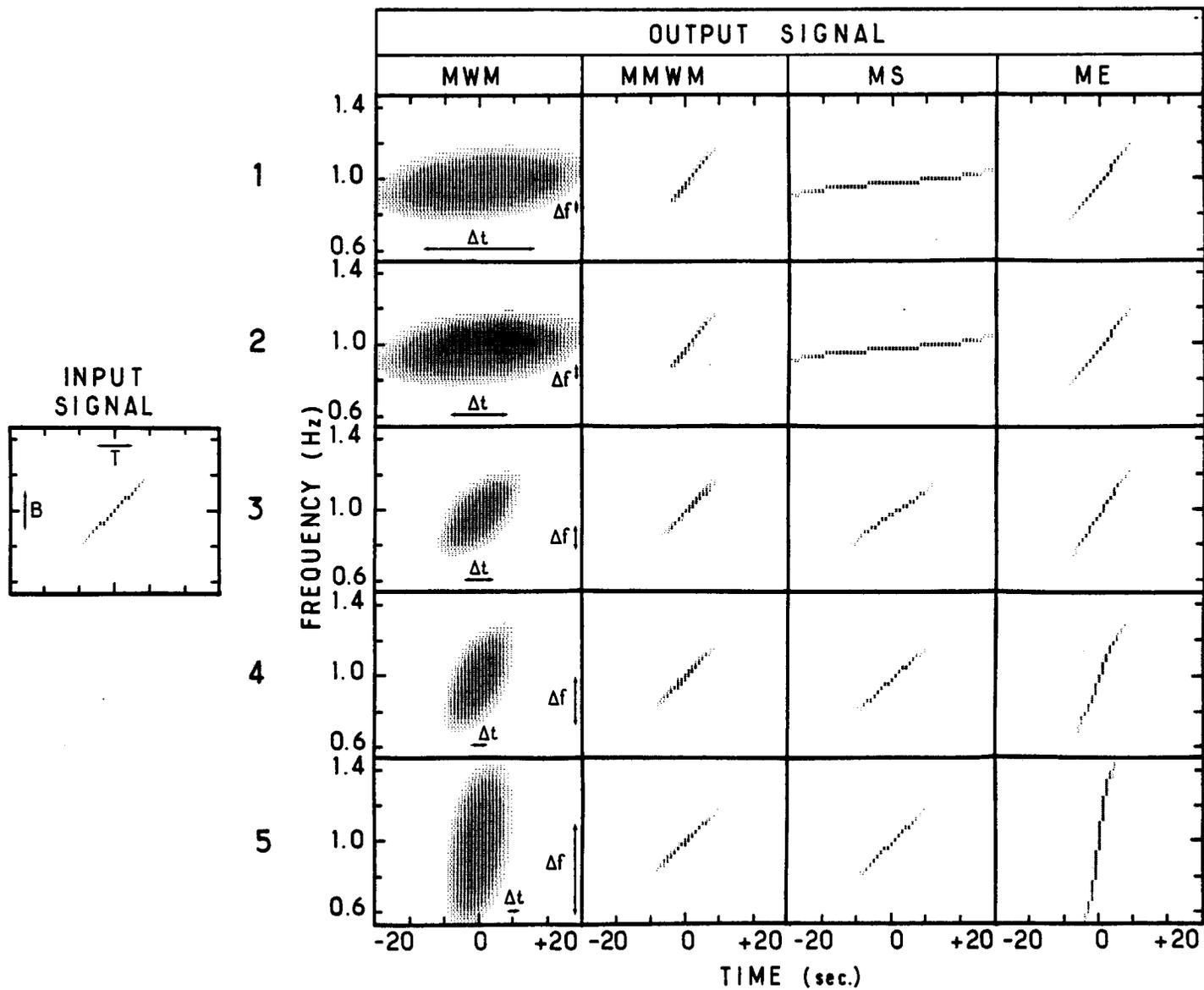


Fig. II-7

FIGURE II-8

TRAITEMENT DU SIGNAL

Fausse structures pouvant apparaître dans l'étude d'un signal à plusieurs composantes (d'amplitude constante). Le signal original est représenté dans la partie supérieure, la réponse du système d'analyse dans la partie inférieure. A gauche, la séparation apparente en fréquence des différents éléments (40 Hz) est bien supérieure à la séparation vraie. A droite, il apparaît de fausses structures couchées qui n'existent pas dans le signal original (réf. 114, 115).

Fig. II-8

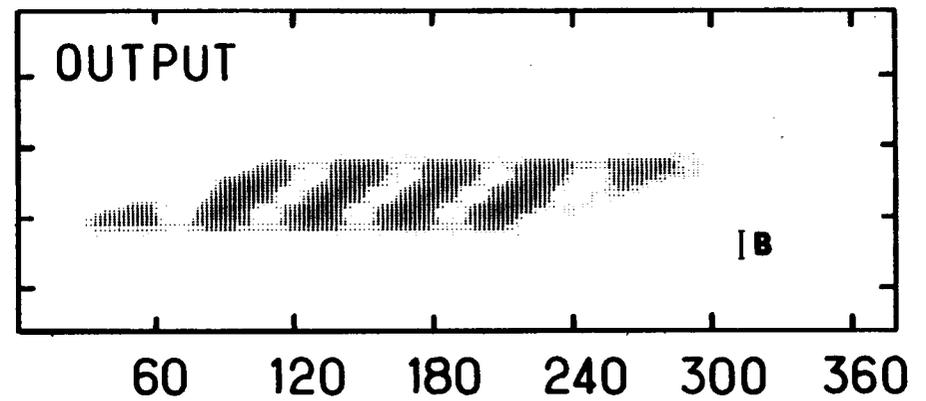
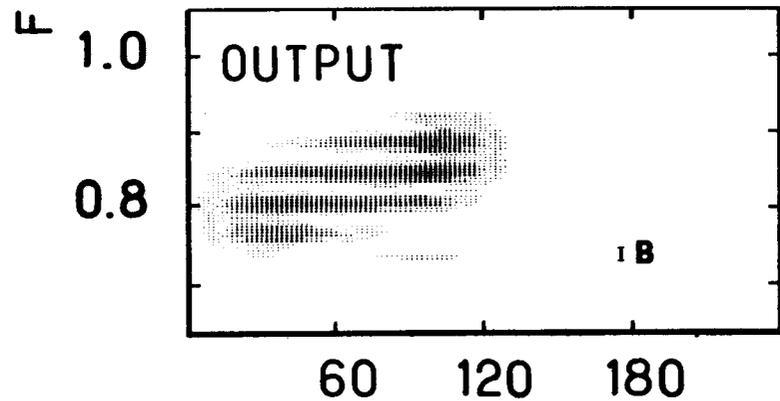
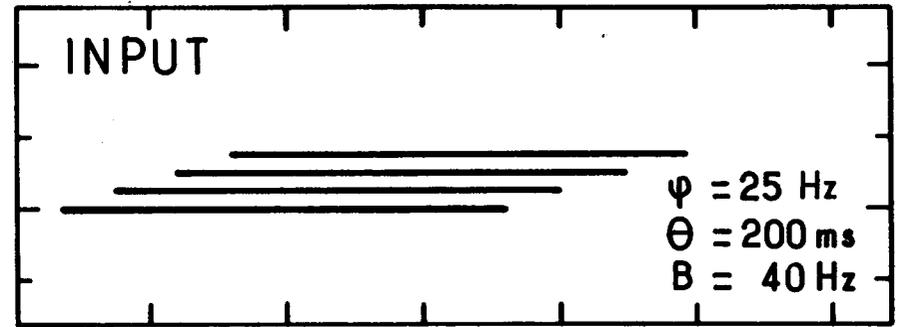
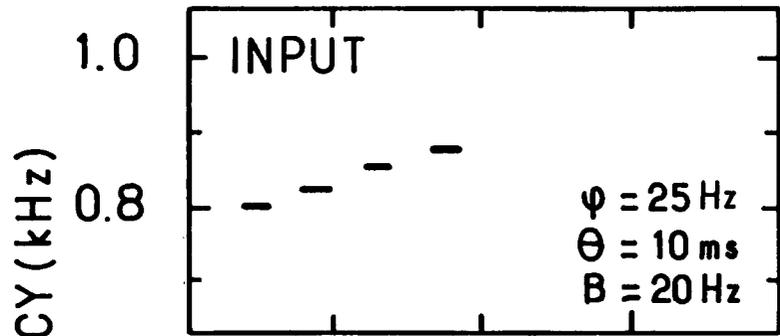


FIGURE II-9

ETUDES THEORIQUES

Piégeage de particules dans une onde monochromatique de forte amplitude. La vitesse résonante  $V_r$  des particules qui peuvent interagir avec l'onde monochromatique varie avec la distance le long de la ligne de force et est minimale à l'équateur. Les particules qui rencontrent cette onde sont piégées par celles-ci à des distances d'autant plus grandes que l'intensité de l'onde est plus forte. Ces particules disparaissent alors de la fonction de distribution initiale à l'équateur. Il y a génération d'une zone calme dans le spectre de turbulence (pour les ondes qui pouvaient résonner avec les particules dont la vitesse parallèle à l'équateur est comprise entre  $V_R$  et  $V_1$ ). Au sortir de l'onde, les particules se regroupent en un faisceau, qui peut être lui-même la cause de nouvelles émissions, dites "déclenchées" (réf. 49, 108).

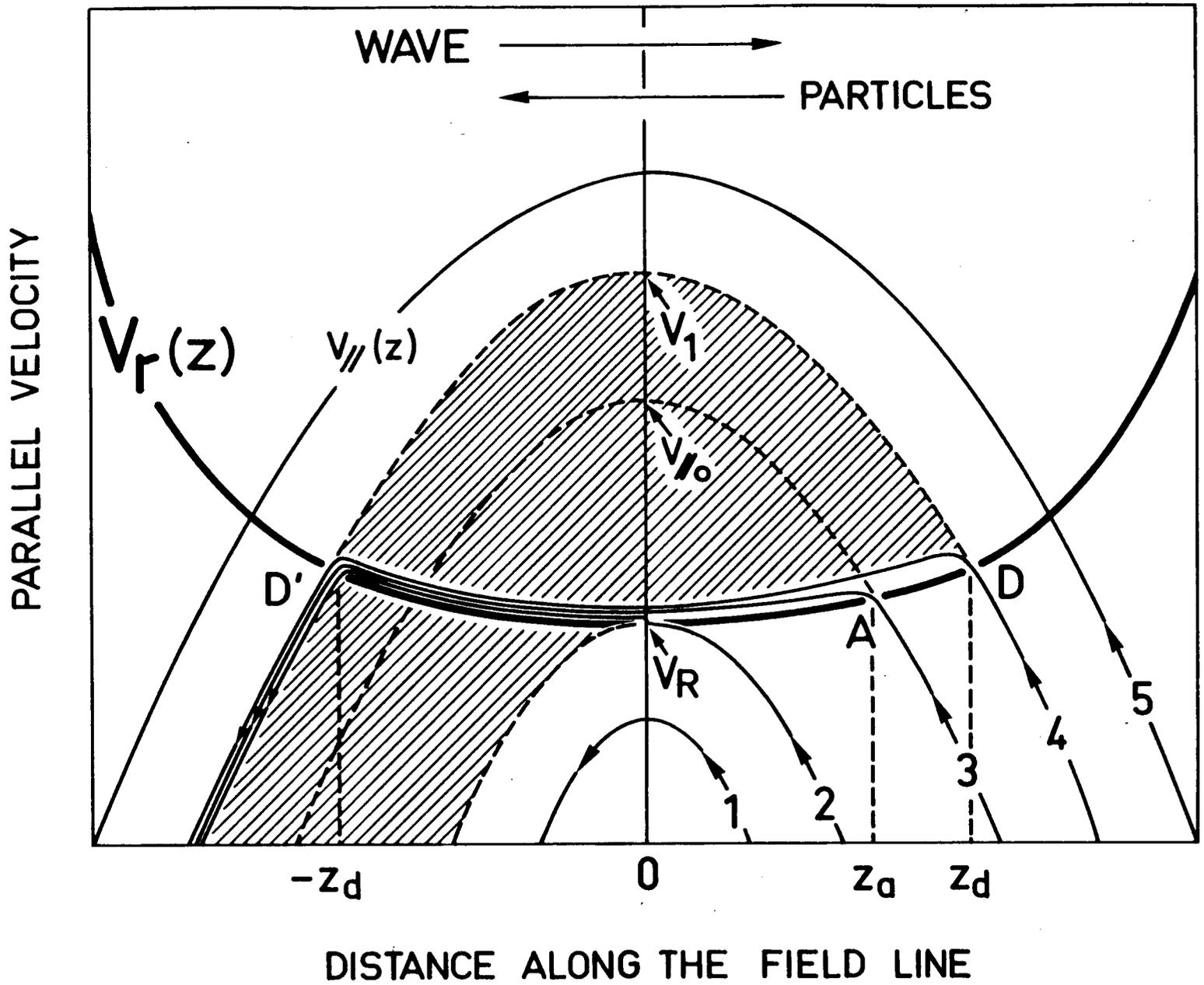


Fig. II-9

FIGURE II-10

IONOGRAMME TYPIQUE DES DONNEES

SONDEUR GEOS 1

On voit ici, pour chaque palier de fréquence du sondeur, l'évolution temporelle du signal reçu, le noircissement représentant son amplitude. Le sondeur balaie en 256 paliers la gamme 0 - 75 kHz tandis que le palier dure 86 ms. L'émission a lieu environ 20 ms après le début du palier.

Lorsque le sondeur est actif (vue du haut) on voit apparaître les signaux de résonance excités par l'émetteur, dont l'amplitude décroît ensuite. La vue du bas représente les mêmes signaux lorsque l'émetteur n'est pas utilisé, ce qui permet d'éliminer les parasites toujours présents.

Les données représentées ici ont été enregistrées le 15 juin 1977 à 16 h 02 TU, lorsque le satellite était à haute altitude du côté jour. Les résonances peuvent être séparées en plusieurs familles :

- les résonances aux harmoniques de la gyrofréquence  $nf_{ce}$ , présentes dans toute la gamme de fréquence observée. Ici la gyrofréquence est de 3,3 kHz et l'on voit tous les harmoniques jusqu'au 23ème.
- les résonances aux fréquences " $f_{Qn}$ " qui apparaissent lorsque la fréquence est supérieure à la fréquence de plasma (ici à partir de 26 kHz) entre chaque harmonique de la gyrofréquence, se rapprochant de plus en plus de l'harmonique inférieur lorsque l'ordre d'harmonicité augmente. Elles correspondent à des ondes en propagation perpendiculaire au champ magnétique, dont un exemple était exceptionnellement observé dans l'ionosphère. C'est une découverte majeure due au sondeur de GEOS que l'observation très fréquente de séries de ces résonances, dont on espère tirer une évaluation du champ électrique magnétosphérique.
- enfin la résonance de plasma  $f_{pe}$  est, lorsqu'on monte en fréquence, la première observée qui ne soit pas un harmonique de la gyrofréquence. Ici elle est à 25,97 kHz indiquant une densité de 8 électrons par centimètre cube.

Le même type de signaux est observé jusqu'à des densités inférieures à  $1 \text{ cm}^{-3}$ , fournissant ainsi un puissant moyen de diagnostic du milieu.

POSITION GEOGRAPHIQUE DU SATELLITE

LATITUDE 14.12 DEG

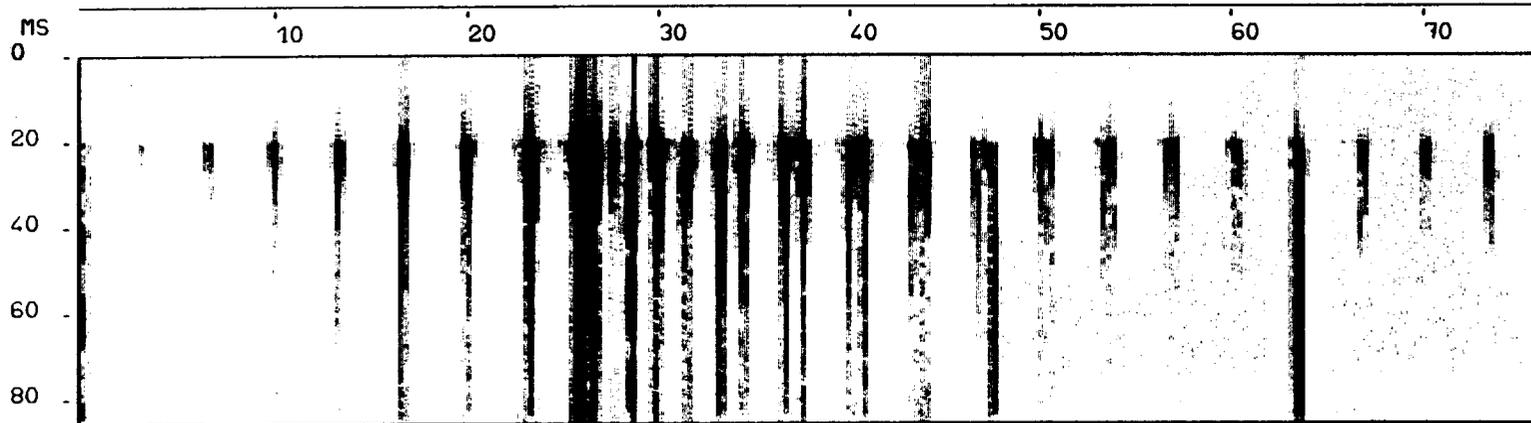
LONGITUDE 23.20 DEG

DISTANCE 6.49 R

IONOGRAMME

EY

Fig. II-10



KHZ

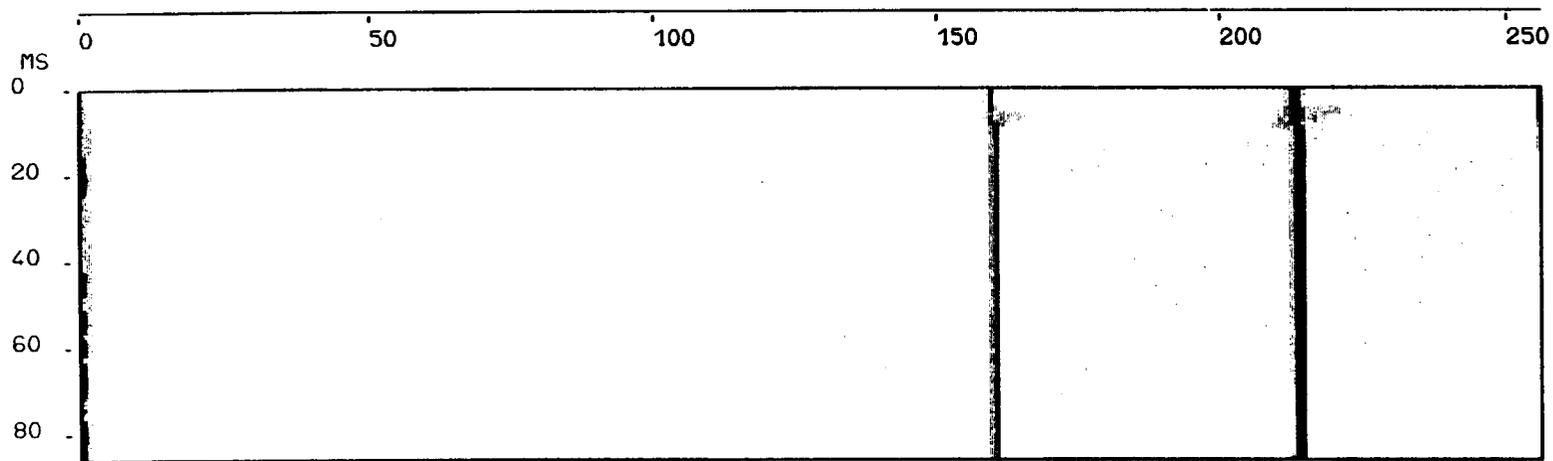
ACTIF

HSF DEBUT 3092983313

PALIER DEBUT 110

NIV MAX .2100E+04

NIV MOY .5662E+01



PALIER

PASSIF

HSF DEBUT 3092983041

PALIER DEBUT 126

NIV MAX .6645E+02

NIV MOY .6374E+00

FIGURE II-11

COMPARAISON DES DETERMINATIONS DE DENSITE  
ELECTRONIQUE DE DIFFERENTES EXPERIENCES

Les densités électroniques obtenues en utilisant différentes techniques à bord de GEOS 1 sont tracées en fonction du temps le long d'une orbite. Ces différentes expériences sont :

- 303 spectromètre de masse ionique,
- 302 analyseurs électrostatiques d'électrons et de protons,
- 300 antenne électrique à boules utilisée en sonde de Langmuir,
- 304 sonde quadripolaire,
- 301 sondeur à relaxation.

Les différences entre ces résultats sont importantes, surtout entre les expériences mesurant directement les particules et les autres.

Les expériences actives voient la plasmopause nettement plus loin que les expériences particules (il y a environ une demi-heure de différence entre les gradients).

Les expériences actives indiquent une densité nettement plus forte, la différence pouvant atteindre un facteur 20.

Ces divergences viennent probablement de ce que le potentiel flottant du satellite par rapport au plasma déforme la fonction de distribution des particules atteignant les détecteurs, empêchant même certaines d'entre elles de parvenir au véhicule. Il est également possible que la distribution des particules soit fortement anisotrope : les détecteurs n'observant que dans une direction, les valeurs de densité qui en sont déduites par intégration dans tout l'espace en supposant la distribution isotrope en seraient faussées.

Remarquons enfin que la sonde de Langmuir qui surveille continuellement la densité électronique ne fournit pas une mesure absolue : elle a été préalablement étalonnées grâce aux expériences actives.

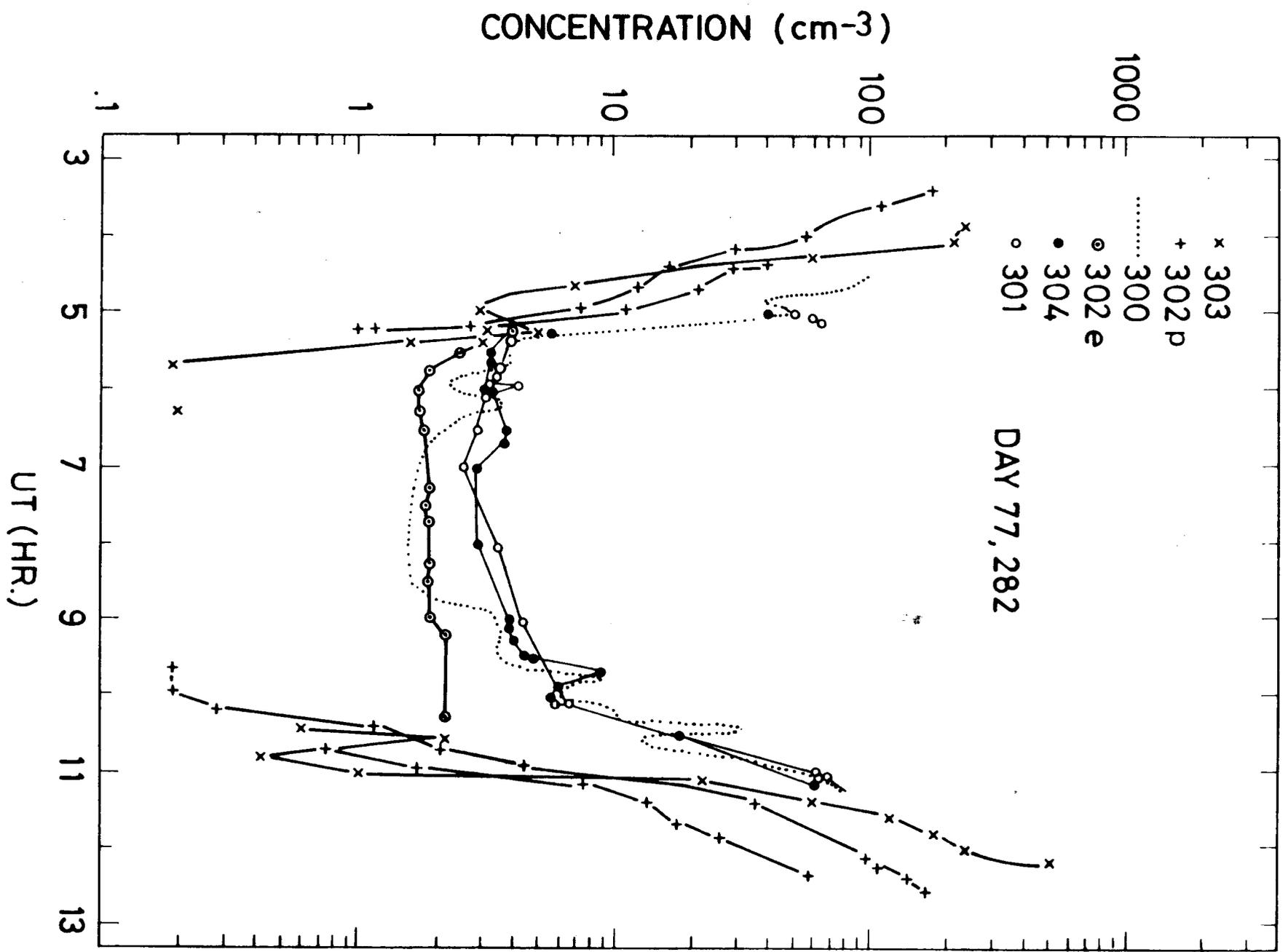


Fig. II-11

FIGURE II-12

INSENSIBILITE DES MESURES DE DENSITE  
DU SONDEUR AUX PHOTOELECTRONS

Cette figure représente, en fonction du temps, la densité fournie par le sondeur en fonction du temps lorsque le satellite passe de l'ombre au soleil à 21 h 10 mn 30 s. On voit que, dans la limite des erreurs de mesure, les photoélectrons n'ont aucune influence sur la détermination de la densité.

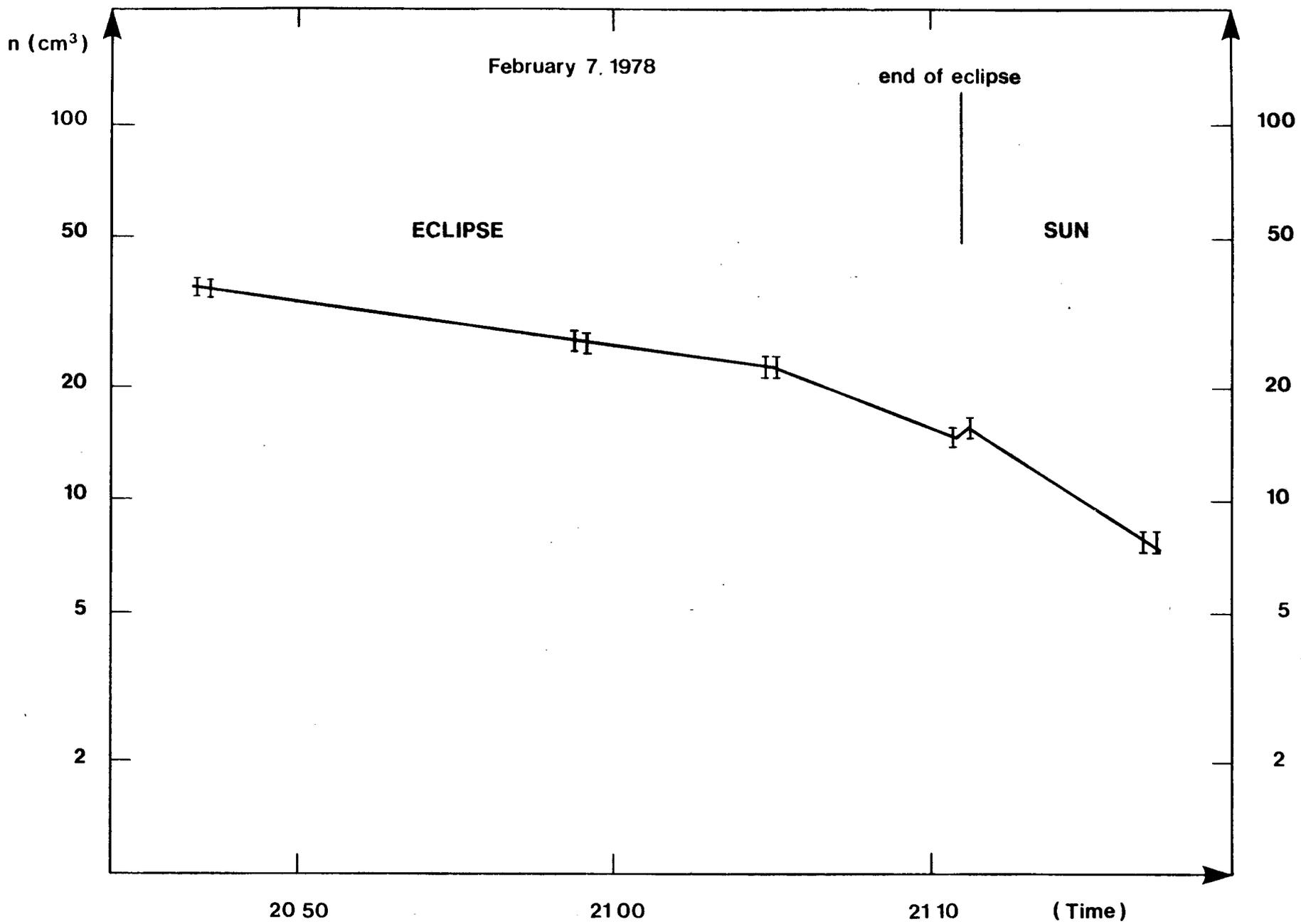


Fig. II-12

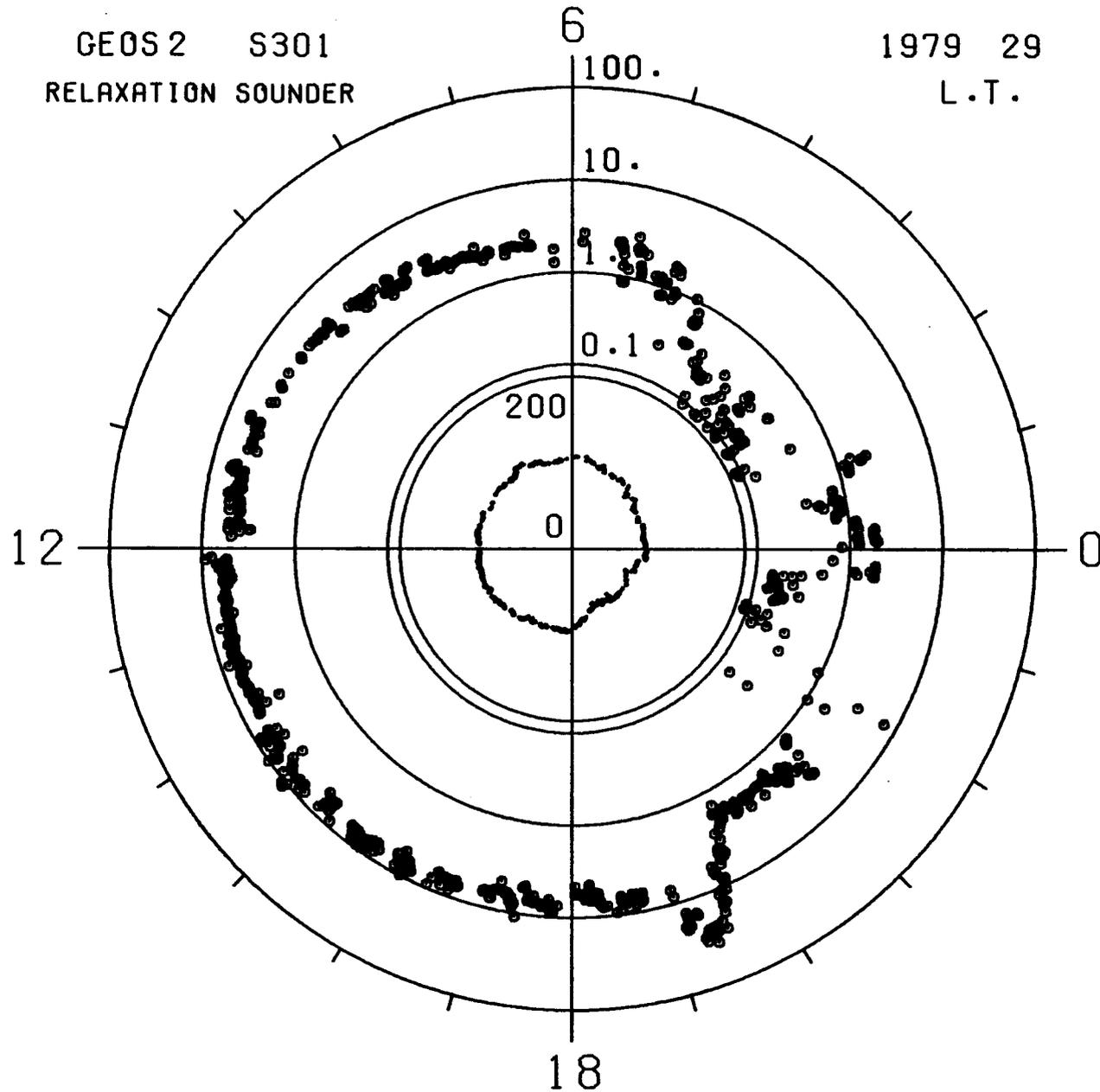
FIGURE II-13

Mesures de la densité électronique (échelle logarithmique de 0.1 à 100 électrons/cm<sup>3</sup>) et du champ magnétique (échelle linéaire de 0 à 200 gammas) dans la magnétosphère à l'orbite géostationnaire. Les mesures, portées en coordonnées polaires en fonction du temps local, sont issues de l'observation des phénomènes de résonances de plasma provoquées par l'expérience de sondage à relaxation au voisinage des fréquences caractéristiques du plasma magnétosphérique ( $f_{pe}$ ,  $nf_{ce}$ ,  $f_{uh}$  et  $f_{Qn}$ ) : la résonance à  $f_{pe}$  fournit la densité électronique  $N_e$ , et les résonances à  $nf_{ce}$  fournissent le champ magnétique  $B_0$ .

On remarque la dissymétrie entre les densités matinales et vespérales, avec une courte proéminence de type "bulge plasmasphérique" vers 19 heures locales. Les densités très basses obtenues du côté nuit sont caractéristiques. La position géographique du satellite ( $\sim 36^\circ$  de longitude Est) place la ligne de partage entre les mesures pratiquées au même endroit à 24 heures de distance vers 2 h 30 en Temps Local.

GEOS 2 S301  
RELAXATION SOUNDER

1979 29  
L.T.



MAGNETIC FIELD 0-200 GAMMA ELECTRON DENSITY 0.1-100 CM-3

Fig. II-13

FIGURE II-14

Mesures à haute résolution de la densité électronique magnétosphérique par observation des résonances à la fréquence plasma  $f_{pe}$  au cours d'une séquence de poursuite automatique par le calculateur au sol : la durée de la séquence présentée est de 25 secondes. La plus haute résolution disponible est utilisée ici (1 mesure toutes les 86 millisecondes) : elle est obtenue par un sondage à fréquence fixe (balayage réduit à 1 palier de sondage). Des fluctuations de densité de très petite échelle apparaissent, qui ont une amplitude relative typique de 1 % sur une échelle de temps de quelques secondes. La variation du niveau des signaux de résonance à la moitié de la période de spin ( $\sim 6$  secondes) (tracé inférieur) permet d'étudier la directivité du champ électrique reçu.

GEOS1 S301 24.1. 1978 5.9R  
DAY 24 UT 4.22. 9. 93 LT 5.50

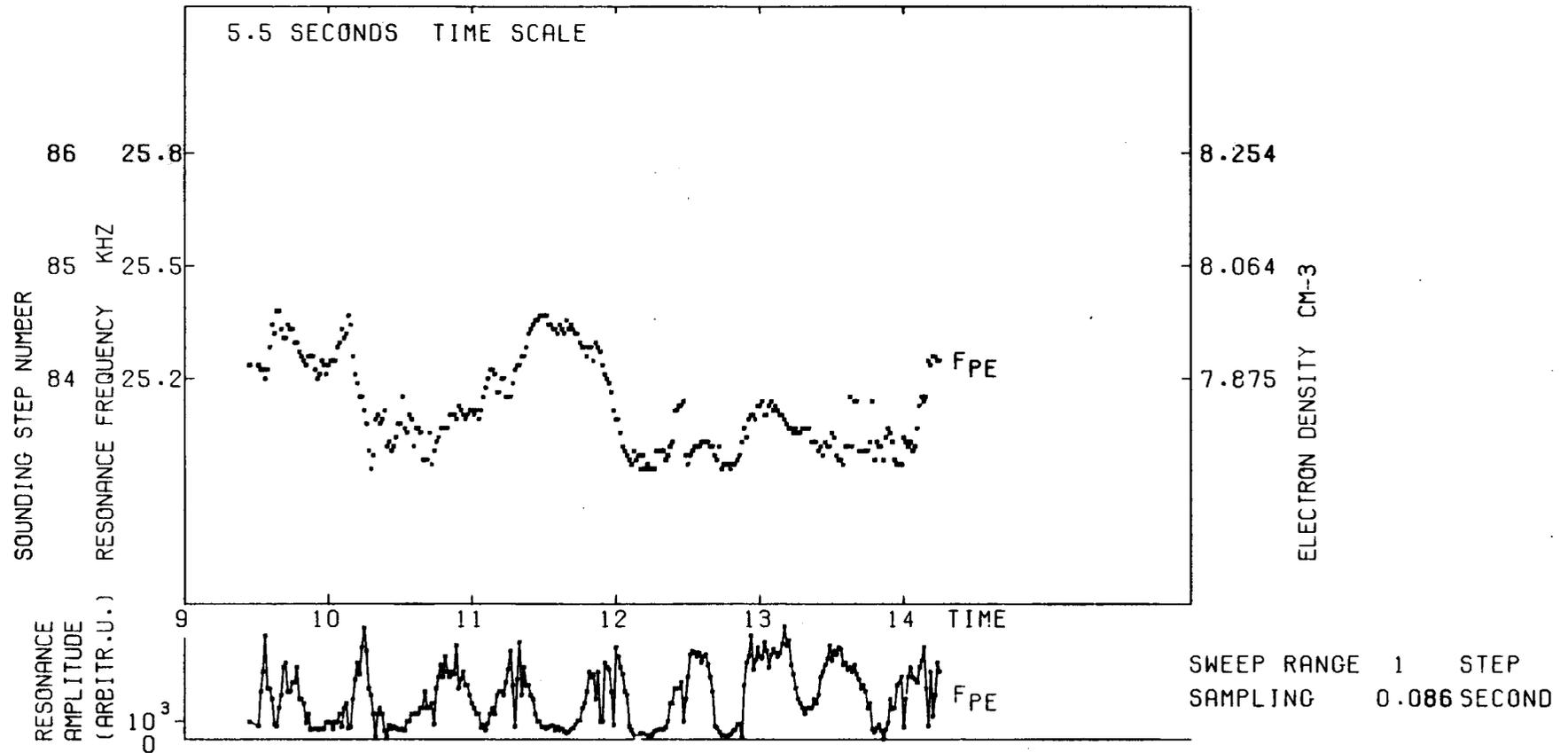


Fig. II-14

FIGURE II-15

Mesure de la directivité spatiale du niveau de la résonance à  $f_{Q3}$ . Au cours d'une séquence de poursuite automatique pilotée par le calculateur, un sondage à fréquence fixe est réalisé sur la résonance  $f_{Q3}$ . Comme il n'y a pas de fluctuation de densité à ce moment là ( $f_{Q3}$  pratiquement constant), le seul paramètre variable est l'orientation de l'antenne par rapport au champ magnétique terrestre. Cela permet d'observer les variations de l'excitabilité de la résonance en fonction du temps (tracé inférieur) donc en fonction de l'angle d'orientation de l'antenne réceptrice en coordonnées polaires (à droite). E et S indiquent la projection des directions de la Terre et du Soleil dans le plan de rotation de l'antenne. Cette mesure fournit directement l'orientation du vecteur d'onde  $\vec{k}$  de propagation de la résonance concernée. Connaissant la longueur de l'antenne, on déduit également la longueur d'onde, donc l'intensité du vecteur  $\vec{k}$ , elle-même reliée à la température électronique du plasma magnétosphérique.



FIGURE II-16

PASSAGE DE CHOC VU PAR L'EXPERIENCE "DENSITE ELECTRONIQUE"  
A BORD DU SATELLITE ISEE

Cette figure représente trois heures de données, de 9 h à 12 h TU, enregistrées à bord du satellite ISEE le 6 novembre 1977. Le satellite, qui s'éloignait de la terre, a traversé l'onde de choc à 9 h 43 pour entrer dans le vent solaire.

Les deux vues du bas montrent des spectrogrammes dynamiques du sondeur : la fréquence de travail du sondeur est portée verticalement, entre 0 et 50 kHz, en fonction du temps, le noircissement représentant l'amplitude des ondes reçues. Les deux vues ont une dynamique différente, celle du bas montrant les signaux faibles tandis que les signaux forts apparaissent sur la vue du haut. Les petits traits qui apparaissent au-dessus du spectrogramme supérieur représentent les périodes d'activité du sondeur : la résonance de plasma apparaît simultanément comme un point noir sur le spectrogramme, par exemple à 11 h 46 elle est sur le palier 70 c'est-à-dire à 28 kHz.

Enfin dans le cadre situé au-dessus des spectrogrammes, le trait fort représente le module du champ magnétique mesuré à bord.

A 9 h 43 le satellite sort de la magnétogaine. Le bruit naturel change brusquement, passant d'un fort bruit basse fréquence à un bruit impulsif situé au-dessus de la fréquence de plasma. Simultanément, la fréquence de plasma qui était située près de la limite supérieure du sondeur (49 kHz à 9 h 13 ; 45 kHz à 9 h 29) baisse pour atteindre environ 30 kHz, tandis que le module du champ magnétique passe de 20 à 6  $\gamma$ . C'est un exemple de choc perpendiculaire.

Fig. II-16

ΔT PAS / FILTRE

- 1 = 32 MS
- 2 = 125 MS
- 3 = 0.5 S
- 4 = MOM
- 5 = 3.2 KHZ

FPE PROPA (KHZ)  
 FLUCTUATION (KHZ)  
 FCE (KHZ)  
 LOGARITH

MAX  
 65.0 DB

ATT 0 DB  
 CTE CAG 8.000  
 HAUTE CADENCE

B = 0. ; 0.  
 L = 0. ; 0.  
 TLM = 9.50 ; 9.51  
 ^<sub>M</sub> = 30.6 ; 35.3  
 TLE = 8.0 ; 8.3

MIN  
 8.0 DB

JOUR NUMERO 310  
 77/11/ 6

R = 15.7 ; 17.9  
 X = 7.4 ; 9.4  
 Y = -12.6 ; -8.9  
 Z = 5.9 ; 12.4  
 S = 439 ; 372 KM

DONNEES BRUTES

HEURE TU  
 TM ANA

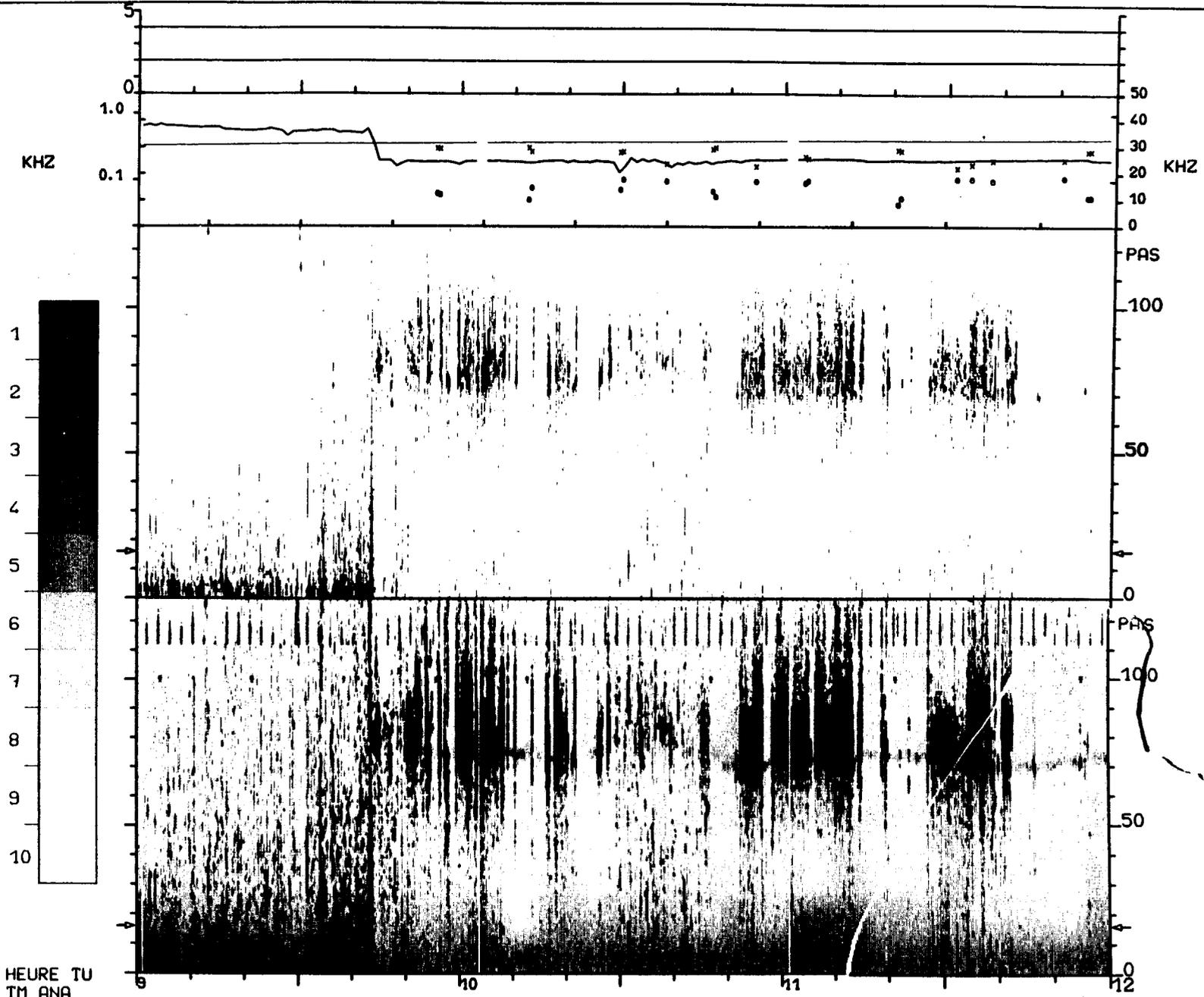


FIGURE II-17

PROFIL DE DENSITE

Cette figure représente un profil de densité mesuré à bord du satellite GEOS 1 le long de son orbite, en fonction du paramètre de Mc Ilwain L (ceci est peu différent de la distance géocentrique du satellite exprimée en rayons terrestres). Le temps local est également indiqué en-dessous.

Le satellite traverse une plasmopause abrupte à  $L = 5,6$  le matin, des fluctuations de densité importantes étant observées sur le bord interne de la plasmasphère (il est impossible de dire si ces variations sont spatiales ou temporelles).

La densité à l'apogée ( $L = 8,5$ ) reste relativement élevée,  $3 \text{ cm}^{-3}$  : il était jusqu'à présent communément admis d'après les mesures de particules in situ qu'elle était inférieure à  $0,1 \text{ cm}^{-3}$ .

La rentrée du satellite dans la plasmasphère l'après-midi est beaucoup plus progressive, le gradient s'étalant sur deux rayons terrestres.

L'agitation magnétique durant cette période était modérée ( $K_p \sim 2$ ) et ce profil est typique de nos observations dans ces conditions et à ces heures locales. La position de la plasmopause que nous déterminons côté jour est plus lointaine que les résultats des observations antérieures comparables. Ceci peut être dû à une différence dans la notion de plasmopause, définie d'après des expériences utilisant des techniques différentes.

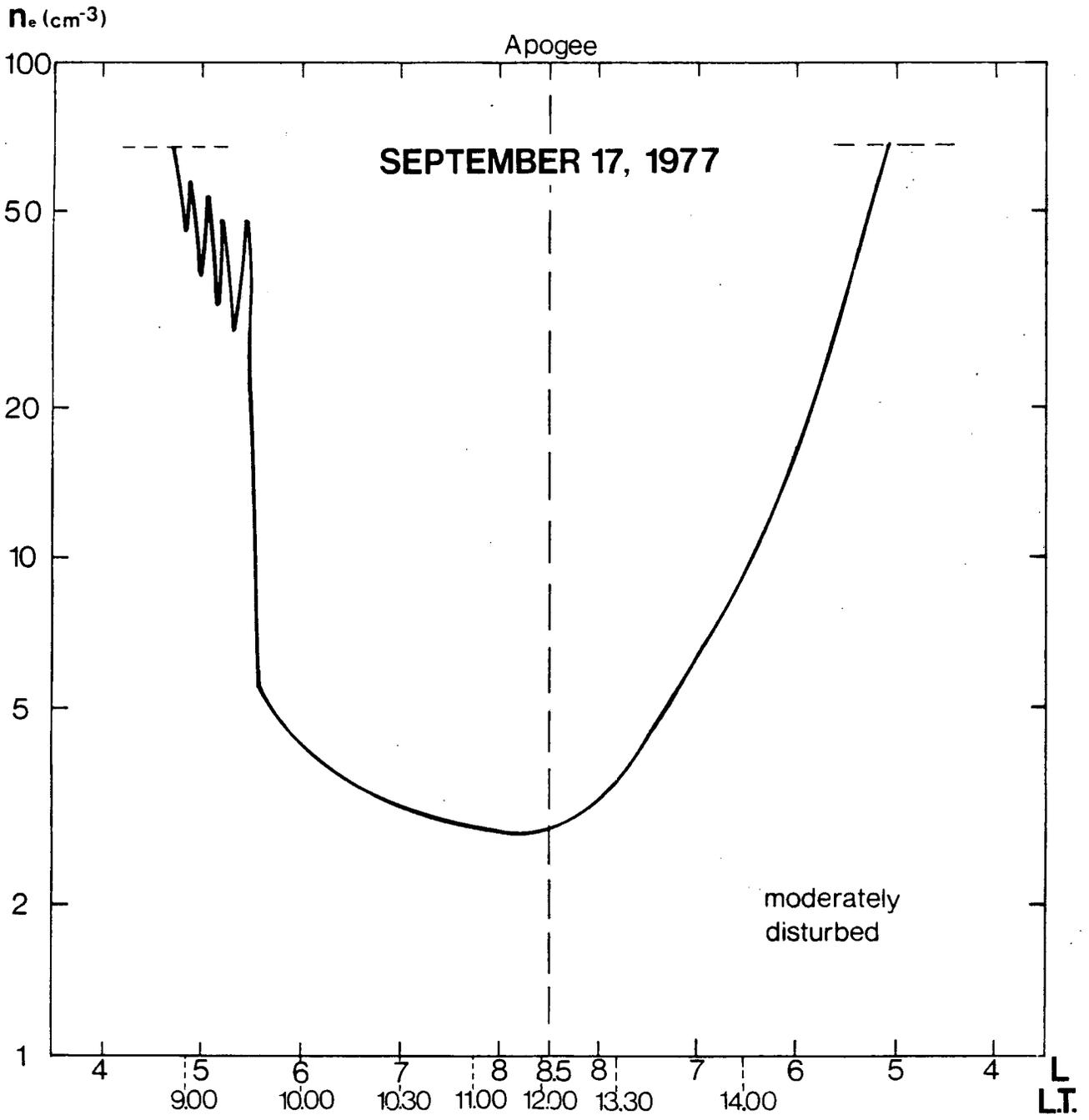


Fig. II-17

FIGURE II-18

Cette figure représente en fonction du temps l'élévation d'une couche d'inversion. Les croix représentent l'altitude de l'inversion déterminée par radiosondage, les triangles par sondages acoustiques. A partir de 9 h 30 les pointillés représentent cette altitude mesurée par radiosondage, alors que le sodar n'observe plus celle-ci devenue trop haute. Des profils de flux de chaleur  $\left( \frac{\sigma}{w} \times 10^3 \right)$  quantité proportionnelle au flux de chaleur) et centrés au milieu des intervalles de mesure ont été tracés : l'extrapolation vers le haut jusqu'à zéro et vers le bas jusqu'au sol donnent respectivement l'altitude où le flux s'annulerait s'il n'y avait pas d'effet d'entraînement, et le flux de chaleur au sol. Remarquons que le matin l'altitude où le flux s'annulerait est voisine de  $Z_I$ , même lorsque le sodar n'observe plus  $Z_I$ . Une comparaison entre les évaluations des flux de chaleur dans la couche de surface par notre méthode et des mesures in situ donne des résultats fort comparables.

# VOVES JULY 2, 1977

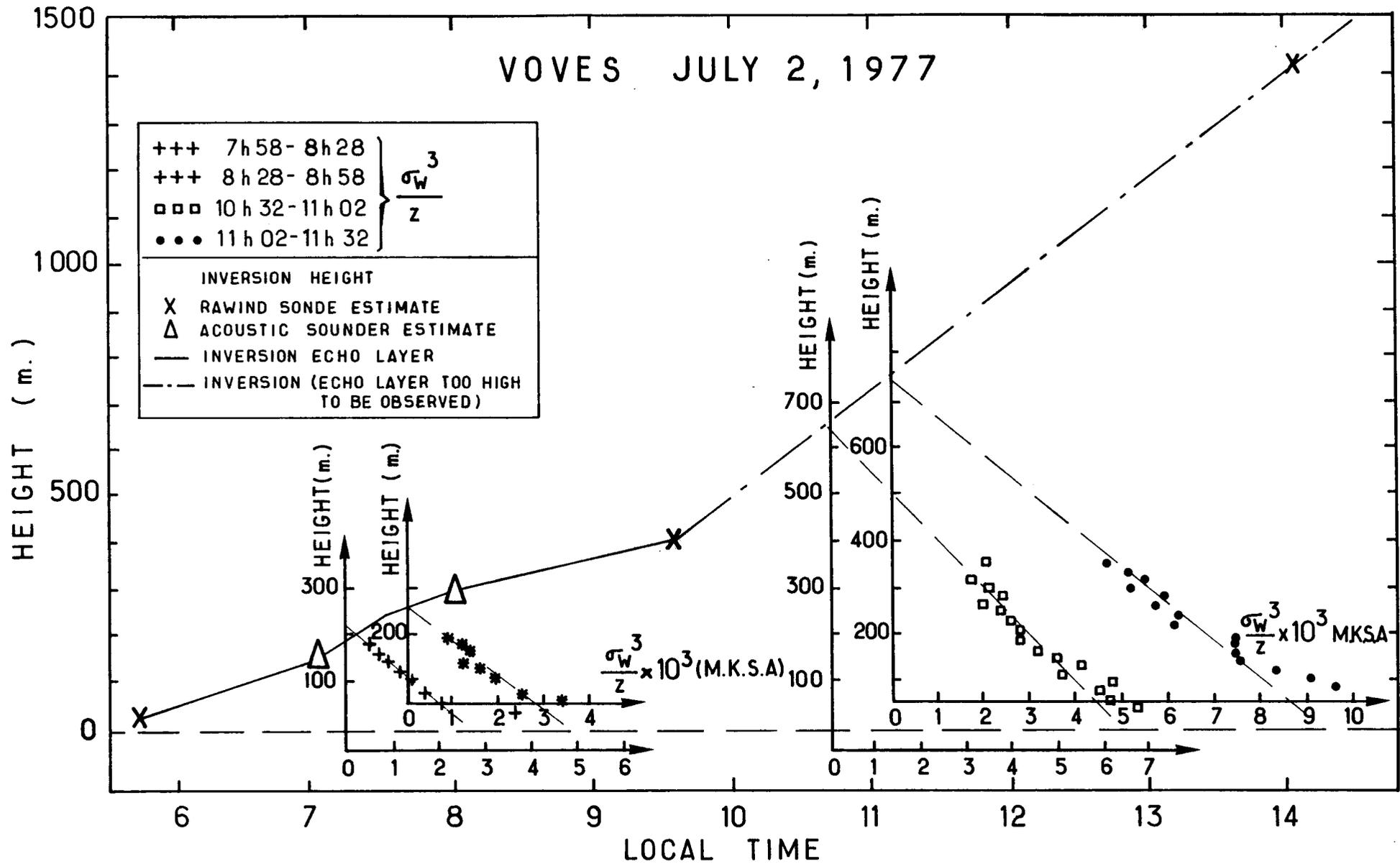


Fig. II-18

III. DEPARTEMENT PHYSICO-CHIMIE DE L'ENVIRONNEMENT

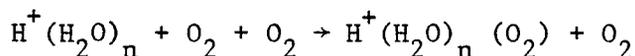
III.1. PHYSICO-CHIMIE DES ATMOSPHERES

III.1.1. Formation des ions agrégats mésosphériques

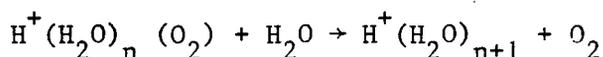
Le but de ces travaux est d'étudier en laboratoire les mécanismes et la cinétique des réactions chimiques qui, dans la mésosphère, transforment les ions primaires  $\text{NO}^+$ ,  $\text{O}_2^+$  et  $\text{O}_2^-$  en ions observés  $\text{H}^+(\text{H}_2\text{O})_n$  et  $\text{NO}_3^-(\text{H}_2\text{O})_n$ . Le dispositif utilisé est constitué d'un réacteur à écoulement supersonique qui permet de refroidir les gaz jusqu'à des températures mésosphériques. L'analyse est faite par un spectromètre de masse.

Le premier objectif de nos travaux était d'améliorer les caractéristiques de dynamique des gaz de l'écoulement supersonique. Nous avons mis au point une tuyère convergente-divergente avec un profil produisant un écoulement supersonique satisfaisant pour nos recherches cinétiques. Le profil de la section convergente (subsonique) est très critique pour la génération d'un écoulement supersonique régulier. Par contre, le profil de la section divergente (supersonique) est beaucoup moins important à cause de la couche limite qui se forme sous nos conditions de travail : une simple section conique donne de bons résultats.

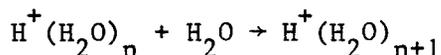
L'amélioration des caractéristiques de l'écoulement supersonique permet maintenant d'obtenir des données cinétiques en fonction de la température (130-160 K) et de la pression (0,4-0,8 Torr). Le désavantage de cette technique est qu'on ne peut pas varier la pression sans une légère variation de la température. Ceci nécessite de multiples expériences où on varie tantôt la pression, tantôt la température. Ce travail est en cours pour les réactions de croissance des agrégats  $\text{H}^+(\text{H}_2\text{O})_n$  en utilisant  $\text{O}_2$  comme gaz vecteur :

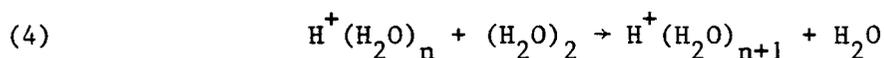
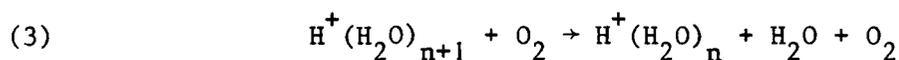


(1)



(2)





Le premier processus est limité aux petits agrégats ( $n < 5$ ), et devient plus important à basse température. La deuxième réaction est une voie plus directe d'hydratation : il est surprenant qu'elle paraisse être de deuxième ordre (indépendant de la pression). Egalement surprenante est l'importance de la réaction de décomposition collisionnelle (3), surtout pour les agrégats dont  $n > 5$ . Puisque cette réaction s'accélère quand on monte la pression ou la température, tandis que la réaction (2) est presque indépendante de ces paramètres, la cinétique de la réaction globale ralentit à pression ou température plus élevée.

En augmentant la concentration de  $\text{H}_2\text{O}$  dans l'expérience, on induit la formation de dimères  $(\text{H}_2\text{O})_2$ , et la réaction (4) commence à jouer un rôle important dans la croissance des ions  $\text{H}^+(\text{H}_2\text{O})_n$ . L'interprétation cinétique des données exige la connaissance de la concentration des dimères. Un appareil d'analyse de la concentration d'espèces neutres dans l'écoulement supersonique est devenu disponible l'année passée, et démarrera courant 1979.

Ce programme se poursuit en collaboration avec le Laboratoire de Chimie Physique de l'Université d'Oxford.

### III.1.2. Formation de molécules interstellaires complexes

Le modèle le plus plausible pour la formation des molécules interstellaires repose sur les interactions entre ions et molécules. Le but de nos travaux est d'étudier des réactions entre ions et espèces neutres, choisies pour leur intérêt astrochimique. Le dispositif employé (TDSM = tube à dérive couplé à deux spectromètres de masse) injecte des ions sélectionnés par un premier spectromètre de masse dans un tube à dérive pour y réagir avec un gaz neutre choisi. Les ions injectés dans le tube à dérive et ceux produits par réaction chimique sont ensuite analysés par un deuxième spectromètre de masse.

Afin de vérifier le comportement de l'appareil, nous avons étudié les réactions de  $\text{Ar}^+$  avec  $\text{N}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{NO}$  et  $\text{CO}_2$ . L'étude de la cinétique de ces réactions a été réalisée en fonction de l'énergie cinétique de  $\text{Ar}^+$ , ce qui facilite l'extrapolation vers de plus basses températures (57). Le premier but de cette expérience est d'étudier les réactions des ions  $\text{CH}_n^+$  ( $0 < n < 5$ ). Afin de pouvoir interpréter les données cinétiques, il faut connaître les mobilités et les coefficients de diffusion longitudinale de ces ions. Ces paramètres déterminent, en effet, le temps de résidence des ions dans le tube à dérive et donc leur temps de réaction. Ces mesures ont été faites avec une très haute précision (136), et maintenant nous pouvons entamer l'étude cinétique des réactions entre les ions  $\text{CH}_n^+$  et  $\text{NH}_3$ .

Ce programme se poursuit avec la collaboration du Laboratoire de Chimionisation de l'U.E.R. des Sciences Fondamentales et Appliquées de l'Université d'Orléans ainsi que du Centre de Recherches sur la Chimie de la Combustion et des Hautes Températures du C.N.R.S.

### III.1.3. Composition de l'atmosphère de Vénus

La connaissance de la composition de l'atmosphère de Vénus et de ses variations spatio-temporelles fournirait des éléments de réponse à un grand nombre de questions scientifiques. Bien que la spectrométrie de masse soit une technique d'analyse pouvant fournir une grande quantité d'informations, il est apparu courant 1978 que la chromatographie en phase gazeuse serait plus adaptée comme dispositif d'analyse sur une station aérostatique flottant dans l'atmosphère de Vénus. Nous avons commencé à étudier la faisabilité de la construction d'un chromatographe en phase gazeuse, embarquable vers Vénus. Ce programme se fait en coopération avec l'Ecole Polytechnique.

### III.2. CARACTERISATION DES SURFACES

Les activités de l'équipe "Surfaces" se sont poursuivies dans les 2 directions définies dans le précédent rapport (Note Technique 53, p. 38). Les études fondamentales menées sous la direction du Professeur BARDOLLE par Monsieur PHU SU UY concernent l'oxydation des 3 faces (100), (110) et (111) du cuivre en fonction de la température (entre 20 et 500° C). Il s'agit de corrélérer des informations fournies par les différentes méthodes utilisées sur les 3 faces montées dans le même enceinte.

- La Spectroscopie d'Electrons Auger permet de suivre la croissance des couches d'oxyde et d'oxygène adsorbées à la surface,
- La Diffraction d'Electrons Lents permet de déterminer la structure cristallographique de ces couches,
- La Microscopie Electronique à Miroir permet de mesurer soit les variations du potentiel de surface, soit celles du coefficient de reflexion des électrons de très basse énergie (quelques eV).

Cette dernière technique est utilisée en étroite collaboration avec le Laboratoire de Microscopie Electronique du Dr. GUITTARD à l'INSA de Lyon.

Un autre aspect des études fondamentales effectuées par l'équipe concerne la spectroscopie Auger à très bas courant (type LMS) où quelques expériences sur les dégats d'irradiation ont été faites en collaboration avec M. LE GRESSUS du CEN SACLAY.

Le 2ème volet des travaux effectués par J.B. BIGNOLAS concerne diverses études plus ponctuelles dans lesquelles le CRPE apporte une assistance technique à la résolution de problèmes pratiques présentés par des organismes extérieurs. On peut citer à ce titre les travaux suivants :

- Analyse superficielle de contacts électriques en Ag/Cu de relais téléphoniques pour le CNET de Lannion.
- Analyse superficielle d'échantillons d'As Ga irradiés par des protons de plusieurs MeV pour le Cyclotron du CNRS Orléans.

- Mesure des variations du potentiel de surface sur des plaquettes de Silicium utilisées dans des photopiles pour l'INSA de Lyon.

Par ailleurs, Monsieur BIGNOLAS a également commencé l'étude de l'oxydation d'alliages Nb - Ti qui, sous la direction du Professeur BARDOLLE, constituera sa thèse de 3ème Cycle.

### III.3. METROLOGIE DES PLASMAS SPATIAUX

#### ETUDES EXPERIMENTALES

##### III.3.1. Expériences en plasma de laboratoire

Les expériences entreprises cette année en plasma de laboratoire par R. POTTELETTE et J.M. ILLIANO ont été menées dans l'optique de l'interprétation des données expérimentales devant être fournies par l'expérience Porc-épic. A cet égard, il s'avérait nécessaire d'étudier la réponse d'une sonde quadripolaire, placée perpendiculairement au champ magnétique, dans le but d'obtenir une mesure de la température et de la densité électroniques. Pour ce faire, nous avons mis au point un programme d'intégration numérique permettant d'obtenir l'impédance de transfert d'une telle sonde, en fonction de la fréquence d'excitation, dans le cas où le plasma est supposé Maxwellien.

Nous nous sommes limités à des valeurs typiques des paramètres des plasmas auroraux, qui sont telles que généralement la fréquence de plasma  $f_p$  et la gyrofréquence électronique  $f_b$  obéissent à l'inégalité suivante :  $f_p < 3 f_b$ . A partir des données numériques de ce programme, il est apparu que les ondes électrostatiques (ondes cyclotroniques électroniques) se propageant entre  $f_b$  et  $2 f_b$ , produisent des structures interférentielles dans la courbe de réponse de l'impédance de transfert qui sont très sensibles à la température électronique.

La figure 1 représente la comparaison entre les réponses expérimentale (courbe en trait plein) et théorique (courbe en tirets) d'une sonde quadripolaire, placée perpendiculairement au champ magnétique, lorsque  $2 f_b < f_p$ . La température électronique a été calculée de manière à faire coïncider au mieux possible les fréquences d'anti-résonances présentes au-dessous de  $2 f_b$ . On trouve  $T_e = 920^\circ\text{K}$  alors que la mesure avec une sonde de Langmuir donne  $T_e = 950^\circ\text{K}$ .

Par ailleurs, une expérience relative à l'excitation de la résonance oblique basse dans un magnétoplasma, a confirmé que cette dernière était très sensible au mouvement d'ensemble des électrons le long du champ magnétique, et a fait l'objet d'une publication (118).

### III.3.2. Expériences en fusées "Porc-épic"

La première phase du programme "Porc-épic" a comporté deux tirs de fusées Ariès à partir de la base de lancement ESRANGE, à Kiruna en Suède. Le premier, qui a eu lieu le 30 Mars 1976, s'est soldé par un échec technique dû à une défaillance du propulseur. En revanche, le second, effectué le 20 Mars 1977, a été réussi (Cf. NT/CRPE/53).

L'interprétation des données provenant de l'expérience du C.R.P.E. a commencé en 1977 et s'est poursuivie pendant l'année 1978. Rappelons que l'objectif principal de cette expérience était de mesurer, dans l'ionosphère aurorale, le courant d'électrons thermiques le long du champ magnétique. D'après la théorie qui fournit le principe de la mesure, ce courant doit donner lieu à un déplacement non-réciproque de la fréquence de la résonance oblique basse observée au moyen d'une sonde quadripolaire. Or, l'analyse des données a bien mis en évidence un tel effet, mais il était plus important que ne le prévoyait la théorie, et d'autre part il dépendait de l'angle de rotation de la pointe de la fusée autour de son axe. Il semble donc s'agir d'un effet perturbateur, qui simule et masque l'effet recherché. C'est pourquoi il est important pour nous de l'identifier. Ces études sont l'objet des travaux de thèse d'Etat de J. THIEL.

En 1977, nous avons émis l'hypothèse qu'il s'agissait d'une non-réciprocité intrinsèque du plasma, due à l'existence d'une faible composante magnétique du champ des ondes nominalement électrostatiques se propageant près de la résonance. La théorie correspondante a été développée au premier semestre 1978, mais elle a démontré que ce type de non-réciprocité est trop faible pour expliquer l'effet observé.

Par la suite, nous nous sommes rendus compte que l'effet en question pourrait être dû à la perturbation, par la pointe de la fusée, des électrons suprathermiques présents dans le plasma ambiant. Cette hypothèse rend qualitativement compte de la façon dont l'effet dépend de l'angle de rotation de la pointe : il nous reste toutefois à vérifier qu'elle permet d'expliquer l'amplitude de l'effet.

Quoi qu'il en soit, en appliquant aux observations certaines considérations de symétrie assez générales et indépendantes de l'hypothèse ci-dessus, on voit comment modifier l'expérience pour réduire l'effet perturbateur. Les changements nécessaires concernent d'une part la géométrie du capteur, et d'autre part l'orientation de la pointe de la fusée, dont l'axe doit être parallèle au champ magnétique terrestre.

L'étude des données issues de la première phase du programme a également suggéré des améliorations possibles de la partie haute fréquence de l'expérience. Là aussi, il convient de changer la géométrie du capteur, pour rendre les données plus faciles à interpréter. D'autre part, les deux antennes du capteur doivent être capables d'émettre ou de recevoir alternativement ; jointe à d'importantes modifications de l'électronique, cette disposition augmenterait la sensibilité de l'instrument pour l'observation passive du bruit h.f. naturel.

Toutes ces diverses modifications ont été effectuées en 1978, lors des préparatifs de la seconde phase du programme "Porc-épic", phase qui devait comporter deux autres tirs de fusées Aries à Kiruna en Septembre-October 1978. Cette campagne a effectivement eu lieu, mais il n'a pas été possible de tirer en raison du mauvais temps et d'une activité magnétique insuffisante. Par conséquent, les responsables ouest-allemands du programme ont prévu une nouvelle campagne en Mars-Avril 1979.

### III.3.3. Expériences en fusées Substorm-GEOS

Ces expériences font partie du programme national suédois de recherches spatiales. Leur objectif général est l'étude de la physique des sous-orages, particulièrement en ce qui concerne les processus d'accélération des particules aurorales. L'expérience du C.R.P.E. a pour but de mettre en évidence l'éventuelle résistivité anormale du plasma, phénomène qui est censé être à l'origine des champs électriques alignés avec le champ magnétique terrestre qu'ont signalé certains expérimentateurs. L'instrument embarquable est une sonde à 8 électrodes, fonctionnant à une fréquence de l'ordre de 300 Hz. Son principe est celui des sondes quadripolaires. L'emploi de 8 électrodes au lieu de 4 la rend insensible aux champs d'ondes électromagnétiques EBF présents dans le milieu. Cet instrument a été entièrement réalisé par sous-traitance en industrie, sous la responsabilité de P. DECREAU. Il doit être embarqué sur trois fusées Black Brant VC, qui seront en outre équipées chacune d'une panoplie d'instruments divers, pour mesurer les propriétés

des champs électrique et magnétique, du plasma et des particules énergétiques. Des mesures analogues doivent être effectuées simultanément par le satellite GEOS, situé dans le plan équatorial près de la ligne de force qui passe par le champ de tir.

La campagne de tir était initialement prévue à Kiruna (Suède) en Janvier-Février 1978. Toutefois, par suite du demi-échec du lancement du satellite GEOS-1, les autorités suédoises ont décidé de la repousser d'un an, en attendant la mise sur orbite géostationnaire du satellite GEOS-2. Celle-ci ayant été pleinement réussie, la campagne a été définitivement programmée pour Janvier-Février 1979 ; l'intégration des instruments dans les pointes des fusées s'est faite au mois de Novembre 1978.

#### III.3.4. Participation au programme GEOS

C'est au cours de l'année 1978 qu'à véritablement commencé l'analyse des données GEOS. L'essentiel du travail a été toutefois un travail d'approche dans la mesure où les données complètes ne nous sont pas encore parvenues.

Dans un premier temps on a commencé par effectuer quelques études morphologiques sur l'occurrence des divers types d'émissions observés sur GEOS-1. Ces travaux ont été repris dans deux articles généraux rédigés dans le cadre de l'expérience S-300 (21) (129).

Nous avons simultanément vérifié, à partir des données "Survey", la fiabilité de notre méthode de reconnaissance automatique des ondes de type "choeur" et des ondes de type "souffle". Cette méthode, basée sur l'analyse des fonctions de cohérence de deux des 6 composantes du champ, a donné lieu à une publication.

Avant de pouvoir effectuer une analyse plus fine des données, nous avons dû effectuer (pour nous et pour l'ensemble des expérimentateurs S-300 intéressés par la détermination des normales d'ondes) un travail technologique important, en particulier pour remonter des mesures effectuées sur les 6 antennes du satellite aux valeurs physiques des 6 composantes du champ.

Ce travail préparatoire se termine actuellement et nous avons pu produire les premières fonctions de distribution des ondes observées par GEOS-1 (voir figure 2).

L'analyse des données GEOS est effectuée par F. LEFEUVRE et M. PARROT. Elle sous-tend les études théoriques sur les fonctions de distribution des ondes dont il est fait état plus loin.

### ETUDES THEORIQUES

#### III.3.5. Spectre croisé

Les travaux théoriques menés sur ce sujet visent à accéder aux différents paramètres du plasma, tels que densité, température, fonction de distribution électronique, à partir de l'analyse du bruit naturel reçu sur une ou plusieurs antennes plongées dans ce plasma.

De fait, dans un plasma en équilibre thermique, le théorème de Nyquist permet de relier de façon simple la densité spectrale de la tension reçue par une antenne à la partie réelle de son impédance. Or l'expression de celle-ci peut être calculée à partir de la fonction de distribution électronique et dépend donc de la densité  $N_e$  et de la température  $T_e$ . Il suffit de connaître alors le spectre du signal détecté par l'antenne, pour en déduire la valeur de ces deux paramètres.

Malheureusement des difficultés apparaissent au moment de la mesure : le signal recherché se trouve mêlé inévitablement à du bruit. Le problème consiste donc à extraire ce signal du bruit. Pour cela, il faut évaluer le temps d'enregistrement du phénomène, temps directement lié à la précision désirée sur les résultats.

Une application au cas d'un plasma chaud isotrope a été entreprise par F. BAUSSET. Le temps d'intégration est évalué en suivant une méthode développée par M. PETIT.

Cette étude en cours constitue en fait le prolongement des travaux effectués par D. ODERO, et fera l'objet d'un plus large développement.

Lorsqu'on dispose de deux antennes plongées dans le plasma, on peut calculer le spectre croisé du bruit naturel recueilli sur chacune de ces antennes. Cette technique expérimentale a fait l'objet d'un article de

synthèse dans le cas où le plasma est considéré comme isotrope (127). Une application spatiale est prévue cette année dans le cadre du programme Porc-épic. Pour interpréter correctement les données expérimentales, il a donc fallu étendre le calcul théorique au cas d'un magnétoplasma chaud.

### III.3.6. Sonde quadripolaire EBF

La théorie de cette sonde, instrument à l'aide duquel on doit mettre en évidence, si elle existe, la résistivité anormale du plasma ionosphérique en zone aurorale, a été poursuivie en tenant compte des mouvements thermiques des particules du plasma. Dans le cas d'un plasma stable, c'est à dire en absence de turbulence, les résultats montrent des différences importantes avec le cas plasma froid. Ainsi pour des dimensions de la sonde utilisée dans l'expérience Substorm-GEOS, l'impédance de transfert est multipliée par un facteur de l'ordre de 15 à 20 pour des valeurs du rapport des températures électronique et ionique  $T_e/T_i$  variant de 1 à 1,5. Cette différence est due à l'excitation, en plasma chaud, d'ondes acoustiques ioniques. Ce résultat est important pour deux raisons :

- La première tient à ce que la vitesse de phase de ces ondes est typiquement, avec les valeurs de  $T_e$  et  $T_i$  observées en zone aurorale, du même ordre de grandeur que les vitesses atteintes par les fusées. L'effet du mouvement relatif sonde/plasma peut donc être important.
- La seconde est que le facteur d'augmentation de l'impédance de la sonde est comparable à l'augmentation auquel on s'attend en plasma froid lorsqu'on tient compte des collisions électrons-ions, censées traduire la turbulence du plasma, responsable de la résistivité anormale si elle existe. Il importe donc de connaître l'importance de l'effet dû à cette turbulence en théorie plasma chaud et de le comparer à celui engendré par l'excitation de ces ondes acoustiques ioniques. C'est ce à quoi nous nous employons actuellement.

Cette étude fait partie des travaux de thèse d'Etat de  
M. MALINGRE.

### III.3.7. Fonction de distribution des ondes

Dans l'étude des champs d'ondes électromagnétiques, on a substitué, dans les années passées, le modèle "champ d'ondes aléatoires" au modèle "onde plane" qui était précédemment utilisé mais trop simpliste. En effet, au lieu de considérer le champ étudié comme généré par une onde plane, caractérisée par une direction de normale d'onde unique, on le considère comme créé, à une fréquence donnée, par une infinité d'ondes planes élémentaires de directions de propagation différentes.

A la suite des travaux de F. LEFEUVRE concernant l'analyse des données OGO V qui montraient la présence de plusieurs familles d'ondes, chacune étant assez peu dispersée en direction, il est apparu intéressant de considérer un modèle de fonction de distribution à deux directions de propagation privilégiées. Cette approche simple et peu coûteuse en temps de calcul permet, soit de localiser deux familles présentes et distinctes, soit de représenter grossièrement l'étalement en direction de propagation dans le cas où une seule famille est présente.

Ce modèle à deux directions a été comparé au modèle du champ d'ondes aléatoires, traité par la méthode du maximum d'entropie, sur des données correspondant à un souffle obtenu par le satellite GEOS-1.

On voit, sur la figure 2, que les deux modèles indiquent la présence de deux familles d'ondes se propageant simultanément dans des directions différentes. Les rapports entre les énergies des pics principaux et secondaires sont, dans les deux cas, de l'ordre de 3,5.

Les méthodes d'estimation, utilisées dans l'étude des deux modèles, étant essentiellement différentes, on ne peut pas encore établir de façon très nette lequel des deux modèles est le plus vraisemblable. Il reste que l'accord est relativement bon et que, pour des résultats comparables, le modèle à deux ondes planes est beaucoup moins coûteux en temps de calcul que le modèle à ondes aléatoires.

Cette étude est un prolongement de la thèse de F. LEFEUVRE et fait partie des travaux de thèse 3ème cycle de L.J. BUCHALET.

### III.3.8. Confinement magnétique d'un écoulement de plasma

Cette étude théorique est la suite de celle entreprise en 1977 par L.R.O. STOREY et L. CAIRO concernant la microstructure de la magnétopause. Nos travaux pendant l'année 1978 ont été basés sur une analogie que nous avons pu constater entre la manière dont le champ magnétique terrestre exclut de la magnétosphère le plasma du vent solaire, et certaines méthodes envisagées pour le confinement magnétique de plasmas chauds aux fins de la fusion thermonucléaire contrôlée. Il s'agit des méthodes à champs multipolaires. Celles-ci présentent les avantages d'une stabilité macroscopique parfaite, ainsi que d'une utilisation très efficace du champ magnétique, mais par contre elles souffrent d'un taux de fuites prohibitif. Pour pallier ce défaut, J.L. TUCK a suggéré en 1963 d'imposer au plasma un mouvement d'ensemble, à une vitesse supersonique, dans une direction parallèle au plan de la couche limite qui le sépare du champ magnétique. Plus exactement, la direction de l'écoulement doit être parallèle à la composante de ce champ créée par des sources à l'extérieur du plasma, de façon à ce que le mouvement d'ensemble des ions leur permette de franchir les failles autour des points neutres magnétiques, au lieu d'y pénétrer et ainsi de s'échapper du plasma. Toutefois, cette suggestion se heurtait jusqu'à récemment à un obstacle apparemment insurmontable : la démonstration formelle, publiée en 1967 par E.N. PARKER, de l'impossibilité pour la couche limite d'exister en équilibre lorsque l'écoulement est supersonique. Or, cette démonstration a été infirmée par nos travaux pendant l'année 1977, et il s'ensuit que les méthodes de confinement de plasmas mentionnées plus haut pourraient éventuellement être pratiques. Pour s'en assurer, il faut étudier d'abord la structure de la couche limite à l'état d'équilibre, puis sa stabilité microscopique. Accessoirement, entre maints autres problèmes, il faut faire le bilan des forces que tendent à ralentir l'écoulement, et concevoir un moyen pour l'entretenir.

L'étude de la structure de la couche limite a été entreprise en 1978 à l'aide de la théorie cinétique simplifiée de S.Y. SU et U.O. SONNERUP. Les principales hypothèses simplificatrices consistent à ne tenir compte, dans le plasma uniforme, que de la composante des vitesses thermiques des particules perpendiculaire au plan de la couche, et à supposer qu'à l'intérieur de la couche toute charge d'espace est neutralisée par des électrons froids piégés sur les lignes de force magnétiques. Les équations de base ainsi obtenues ne peuvent être résolues que numériquement.

Jusqu'à présent, l'étude s'est limitée à une famille de solutions caractérisée par le fait qu'en l'absence de l'écoulement le seul courant électrique dans la couche limite est celui qui expulse le champ magnétique créé par des sources externes. On constate qu'au fur et à mesure que la vitesse d'écoulement dépasse la vitesse thermique des ions, l'épaisseur de la couche décroît en-dessous de sa valeur initiale, qui est de l'ordre du rayon de giration ionique. Finalement, lorsque la vitesse d'écoulement dépasse la vitesse thermique des électrons, l'épaisseur tend vers une valeur limite de l'ordre du rayon de giration électronique. En ce moment, nous abordons l'étude d'autres familles de solutions où il existe, en l'absence d'écoulement, un courant dans la couche limite parallèle au champ crée par les sources externes.

### III.4. DETECTION DES PHENOMENES PHYSIQUES DU PLASMA POLAIRE

#### III.4.1. Etude des instabilités de la couche E polaire

On a poursuivi le traitement des données de l'expérience IPOCAMP 2 réalisée en 1977 en collaboration avec C. RENARD de l'I.U.T. de Bourges, à l'Ile de Heyss (URSS) (cf : Rapport d'Activité 1976-1977). Pour mémoire, rappelons que le but poursuivi en ce qui concerne le C.R.P.E. était d'une part de tester le comportement des sondes du type ISOPROBE qui seront installées à bord du satellite ARCAD 3 (cf : III.3.2.) et d'autre part d'étudier in situ les instabilités de la couche E polaire (zone proche de la "polar cusp"). La transformation des données brutes en grandeurs physiques : densité électronique, champ électrique perpendiculaire au champ magnétique et vitesse de dérive perpendiculaire, a été faite par J. PIGNARD. Les deux moyens de diagnostic utilisés, sonde double sphère et sondes ISOPROBE, nous ont permis de déterminer, le premier l'amplitude et la direction de la vitesse de dérive du plasma perpendiculaire au champ magnétique et le second la direction. Les résultats de ces deux méthodes expérimentales totalement différentes sont en bon accord. Ces deux derniers paramètres sont mesurés indépendamment par la méthode double-sphère et par la double sonde ISOPROBE et sont en parfait accord d'une part entre les deux méthodes expérimentales et d'autre part avec le modèle de conductivité déduit des mesures de densité. Le dernier paramètre, en cours d'élaboration, est la composante de dérive parallèle au champ magnétique obtenu par les doubles sondes ISOPROBE. Afin de calibrer la mesure on a réalisé des expériences en caisson à plasma, en imposant une vitesse de dérive variable de 0 à environ 10 km/s. L'analyse préliminaire des données obtenues en vol montre l'existence d'une vitesse parallèle dans le repère lié à la fusée, s'annulant à la culmination, mais curieusement toujours dirigée dans le même sens. Une telle anomalie qui présente une certaine analogie avec celle constatée par J.J. BERTHELIER et F. MOZER et avec une méthode de mesure différente (double sphère) n'a pas trouvé d'explication satisfaisante jusqu'à maintenant.

#### III.4.2. Etude de la dynamique et du couplage magnétosphère-ionosphère à bord du satellite ARCAD 3

Le satellite franco-soviétique ARCAD 3 sera lancé en 1980, sur une orbite quasi polaire avec un apogée de 2000 km et un périégée de 400 km. Dès l'origine du projet le C.R.P.E. a proposé l'expérience ISOPROBE pour

mesurer la densité et la température électroniques, les fluctuations associées aux instabilités et la vitesse d'écoulement parallèle au champ magnétique. Le type de sonde utilisé bénéficiera de toutes les études méthodologiques poursuivies au laboratoire sur les sondes à impédance mutuelle et qui ont fait l'objet d'essais sur fusées-sondes (CISASPE, IPOCAMP 1 et 2 et PORCUPINE). Conjointement aux autres mesures françaises et soviétiques, nous aurons pour la première fois accès à des paramètres qui n'ont jamais été mesurés simultanément et avec assez de précision. Ceci permettra d'aborder dans des conditions satisfaisantes des questions telles que : quel est le type d'instabilité déjà observé dans la région F des basses latitudes et quelle en est la source ? Dans quelle proportion le plasma thermique contribue-t-il aux courants alignés, par rapport aux électrons de plus haute énergie ? Ces courants alignés sont-ils associés à des instabilités (et de quel type) qui conduisent à une conductivité anormale, laquelle peut donc supporter un champ électrique parallèle ? etc...

On a réalisé en 1978 le modèle de qualification qui sera intégré sur la maquette quasi-complète du satellite en 1979. Tous les tests fonctionnels de ce modèle ont débuté fin 1978 et se poursuivent de façon satisfaisante. La responsabilité scientifique de cette expérience est assurée par C. BEGHIN, secondé par R. DEBRIE. La responsabilité technique est assurée par J.F. KARCZEWSKI et son groupe technique. La préparation du dépouillement est coordonnée par C. DELANNOY en liaison étroite avec l'équipe C.N.E.S.

En plus de l'expérience ISOPROBE, le C.R.P.E. se partage avec le L.G.E. et une équipe de l'IZMIRAN, la responsabilité des mesures d'ondes TBF sur cinq composantes, expérience qui, au fur et à mesure de l'avancement du projet s'est vue transférée de plus en plus sous la responsabilité française. L'exploitation de ces données bénéficiera des travaux sur la détermination des normales d'ondes réalisés par L.R.O. STOREY et F. LEFEUVRE. Ce dernier a participé à la préparation du dépouillement de l'expérience.

### III.4.3. Etude du plasma thermique dans la magnétosphère à bord du satellite GEOS

L'expérience S 304 qui est une sonde quadripolaire pour la mesure de densité et de température électroniques donne d'excellents résultats, tout d'abord sur le plan géophysique mais également pour l'étude des ondes électrostatiques qu'il est difficile d'observer en plasma de laboratoire (20) (19).

Sur le plan géophysique, les mesures de densité et de température dans la zone 4 à 7 rayons terrestres par la méthode de l'impédance mutuelle sont beaucoup plus précises que par les méthodes utilisées jusqu'alors (compteurs d'ions ou d'électrons, ou mesure du "cut-off" à la fréquence plasma) (24) et (25). La température mesurée est celle d'un modèle de plasma supposé maxwellien dans un premier temps ; ceci revient à assimiler la vraie distribution à une maxwellienne (celle qui contribue essentiellement dans nos mesures) plus une queue de distribution, correspondant aux particules piégées ou accélérées (donc non en équilibre) dont la contribution est négligeable dans nos mesures tant que la densité de cette population est très faible devant la partie thermalisée. Ensuite le modèle est affiné (plasma en dérive et anisotropie due au champ magnétique). Les températures mesurées lorsque le premier modèle est confirmé sont remarquablement plus basses que ne laissaient entendre les mesures précédentes surtout dans le secteur diurne (10000 - 20000°K). Les résultats permettent d'aborder l'étude de la zone de transition plasma-sphère-magnétosphère et les phénomènes dynamiques associés à cette région. La responsabilité de l'analyse et l'interprétation de ces mesures sont confiées à P.M.E. DECREAU (assistante à l'Université d'Orléans), et parallèlement C. BEGHIN, M. HAMELIN et R. DEBRIE ont entrepris l'étude du comportement théorique de la sonde dans les différents modèles mentionnés ci-dessus (voir également III.4.6.).

#### III.4.4. Etude de faisabilité d'expérience de mesure de champ électrique parallèle par injection de particules chargées

Un des objectifs à long terme du programme PICPAB est la possibilité de mesurer le champ électrique parallèle aligné avec le champ magnétique en injectant des particules chargées le long de ce champ et en mesurant le temps d'aller et retour de ces particules en fonction de leur énergie initiale. Parallèlement au développement technique de cette expérience, l'étude théorique concernant cette mesure a été poursuivie et en particulier en 1978, l'étude de la faisabilité d'une méthode permettant la mesure du champ électrique au voisinage d'un engin spatial. Cette méthode permet de résoudre le difficile problème du rendez-vous entre les particules injectées et l'engin spatial. En contrepartie, la description du champ ne peut être effectuée que sur des distances de quelques kilomètres depuis l'engin. Cette méthode semble très bien adaptée à la description à la fois des structures du potentiel associées à la résistivité anormale (faible valeur du champ électrique minimum mesurable  $\sim 1 \text{ mV/m}$ ) ou à celles associées à des chocs électrostatiques (faible réalisation spatiale  $\sim 100 \text{ m}$ ). Des calculs théoriques et/ou des expériences sont cependant nécessaires pour prouver définitivement la faisabilité de cette méthode. Ceci pourrait être en partie réalisé par l'expérience PICPAB 2. Une communication a été faite sur ce sujet par PIRRE et coll. au dernier congrès de l'EGS à Strasbourg (444). Une publication sera soumise prochainement aux **Annales de Géophysique**:

#### III.4.5. Les échos à la fréquence hybride basse

Les échos de très basse fréquence (TBF) excités par le sondeur ionosphérique du satellite canadien ISIS 2 sont comparables aux échos de haute fréquence (HF) qui donnent les bien connues "flèches de résonance" sur les ionogrammes des sondeurs en contrehaut. L'interprétation des échos TBF en termes de propagation en milieu faiblement inhomogène ayant du être rejetée, nous avons calculé la réponse du plasma à une impulsion de courant. Le résultat de ce calcul permet une approche du mécanisme des échos. Nous montrons que l'antenne du satellite excite une zone perturbée en expansion relativement lente. Devenue réceptrice, cette antenne quitte plus ou moins rapidement la zone excitée suivant l'attitude du satellite et ceci permet d'expliquer la durée des signaux expérimentaux sans toutefois que l'on puisse en déduire d'information précise sur les températures ioniques.

Le principal obstacle à une interprétation précise du phénomène a été dans la grande longueur des antennes. Rappelons que les échos TBF du satellite ISIS 2 étaient tout à fait imprévus et que dans le cas d'une expérience ultérieure il serait souhaitable d'utiliser des électrodes de faibles dimensions (assimilables à des points dans la théorie). L'ensemble de ces travaux a été présenté dans la thèse d'Etat de M. HAMELIN (307) et dans une publication (116) à paraître en 1979.

#### III.4.6. Les ondes cyclotroniques en laboratoire et dans la magnétosphère

Est présentée ici la contribution de R. DEBRIE et M. HAMELIN dans ce domaine.

L'étude théorique et expérimentale des ondes cyclotroniques qui ont suscité un fort regain d'intérêt après la réception des données du satellite GEOS est un point de convergence de plusieurs travaux menés au sein de notre équipe et dans le reste du laboratoire.

La présence de raies séparées par la fréquence gyromagnétique des protons dans les spectres des signaux reçus par le satellite ISIS 2 avait conduit à étudier les ondes cyclotroniques ioniques : c'est en cherchant à s'écarter de la propagation rigoureusement perpendiculaire que M. HAMELIN a établi des approximations analytiques simples de l'équation de dispersion en plasma maxwellien, valables aussi bien dans le domaine des ondes cyclotroniques ioniques qu'électroniques. Le fait principal est que lorsque l'on considère la propagation quasi-perpendiculaire, les caractéristiques de la propagation peuvent être fondamentalement différentes que celles déduites de la propagation rigoureusement perpendiculaire. En particulier, au maxima en fréquence  $f_{qn}$  des modes de Bernstein, on montre que la vitesse de groupe a une direction privilégiée. En fonction du rapport  $f_p/f_H$  entre la fréquence plasma et la gyrofréquence ainsi que de l'intervalle entre harmoniques de  $f_H$  considéré, cette direction peut prendre toutes les valeurs entre la parallèle et la perpendiculaire au champ magnétique. La méthode et les résultats généraux ont été publiés dans la thèse d'Etat de M. HAMELIN (307) et l'étude plus particulière de la direction des vitesses de groupe aux fréquences  $f_{qn}$  a été présentée à l'assemblée générale de l'U.R.S.I. (430).

Aux courtes distances, R. DEBRIE a mis en évidence dans ses expériences sondes quadripolaires H.F. (CISASPE, IPOCAMP 1, Laboratoire) que l'excitation de ces modes cyclotroniques se traduit par des battements dans les courbes de réponse en fréquence au voisinage des harmoniques de la gyrofréquence électronique. Pour des fréquences intermédiaires où la longueur d'onde cyclotronique est comparable aux distances interélectrodes, nous obtenons des interférences constructives ( $F_q$ ) ou destructives ( $\simeq (n + \frac{1}{2}) f_H$ ). Afin de mieux comprendre ce mécanisme, on a étudié le coefficient d'excitation de ces ondes dans toutes les directions par rapport au champ magnétique statique. Cette étude permet de déterminer les zones de fréquence où les modes cyclotroniques masquent l'effet des modes du type Landau, et inversement. Il apparaît qu'il est nécessaire d'étudier l'influence de l'anisotropie de température ou de l'effet d'une vitesse de dérive du plasma sur les niveaux d'excitation des ondes électrostatiques. Les premiers résultats de R. DEBRIE montrent qu'une anisotropie de température peut favoriser l'excitation des modes cyclotroniques par rapport aux modes de Landau.

Nos études ont trouvé une application immédiate lors de la réception des données du satellite GEOS où les résonances aux fréquences  $f_{qn}$  apparaissent de façon spectaculaire, ceci tant dans la mesure de l'impédance mutuelle (expérience S 304) que dans l'expérience de sondage à relaxation (S 300). Cette étude nous a amené à participer avec P.M.E. DECREAU et C. BEGHIN à l'analyse des résultats de l'expérience S 304 sur les résonances aux fréquences  $f_{qn}$  en comparaison avec la théorie. Ce travail se trouve inclus dans la publication (20).

Une autre collaboration avec H de FERAUDY a permis d'effectuer une première approche du mécanisme des échos du sondeur à relaxation (expérience S 300, cf. §§ II.2.1.4.). L'approximation analytique de l'équation de dispersion au voisinage des fréquences  $f_{qn}$  en propagation quasi-perpendiculaire s'est trouvée l'outil adapté à cette étude, permettant de résoudre simplement le problème inverse qui est la détermination des caractéristiques de l'onde ayant parcouru une certaine distance dans une direction donnée et en un temps donné. L'analyse des données expérimentales suivant cette méthode permet de déduire précisément la fréquence plasma et d'estimer la composante de la dérive le long de la trajectoire du satellite. Ce travail a été présenté à l'Assemblée Générale de l'U.R.S.I. (426).

Parallèlement, nous avons recherché une confirmation directe des caractéristiques de la propagation des ondes aux fréquences  $f_{qn}$  grâce à une expérience effectuée dans le caisson à plasma du C.R.P.E. : nous avons pu mettre ainsi en évidence un rayonnement dans une direction quasi-parallèle au champ magnétique confirmant dans ce cas nos prédictions théoriques. Les résultats de cette expérience effectuée avec J.P. LEBRETON ont fait l'objet d'une publication (37).

Actuellement, nous préparons avec la participation de B. LEMBEGE une publication de synthèse des résultats que nous avons obtenus récemment dans le domaine des ondes cyclotroniques en plasma maxwellien. En particulier, les ondes aux fréquences  $f_{qn}$  se prêtent à une étude systématique et leurs caractéristiques peuvent être présentées sous forme d'abaques. De même, nous y étudions une autre famille de fréquences caractéristiques  $f_{cyl}$  pour laquelle la surface des indices est localement cylindrique au voisinage de la propagation perpendiculaire. Ces résultats pourraient présenter un certain intérêt dans l'étude des émissions que l'on observe fréquemment dans l'intervalle entre deux harmoniques de  $f_H$  dans la magnétosphère.

Notre effort de recherche se poursuit actuellement dans l'étude de l'effet de l'anisotropie de température et de la dérive. Les ondes cyclotroniques s'avèrent en effet prometteuses pour mesurer ces paramètres qui intéressent particulièrement le géophysicien. Dans ce travail, les expériences en plasma de laboratoire nous sont d'une grande aide en permettant de confirmer (ou d'infirmer) rapidement la validité des hypothèses théoriques. Nos travaux sont menés en collaboration étroite avec les expérimentateurs de GEOS qui ont ravivé l'enthousiasme pour ces études.

### III.5. ETUDES EN PLASMA DE LABORATOIRE

#### III.5.1. Travaux scientifiques généraux : étude expérimentale des effets de dérive sur les ondes de Landau en plasma maxwellien quasi-homogène (J.P. LEBRETON, D. HENRY)

Dans un plasma non magnétisé, et pour une large gamme de fréquence plasma (3 à 15 MHz) la dispersion des ondes électrostatiques a été étudiée pour des vitesses de dérive du plasma inférieures à 0.3 fois la vitesse thermique électronique, typiquement égale à 200 km/s. La méthode originale d'acquisition des données, basée sur l'acquisition en temps réel par ordinateur d'une matrice d'amplitude du potentiel en fonction de la distance et de la fréquence a permis d'étudier de façon simultanée les effets de la vitesse de dérive sur la géométrie de transfert d'une sonde dipolaire.

Les résultats obtenus en propagation, confirment les résultats des travaux théoriques de MOURGUES et al. Par rapport au cas sans dérive, le nombre d'onde  $k_r$  et l'amortissement  $k_i$  diminuent du côté aval, alors qu'ils augmentent du côté amont. Cette dissymétrie croît en fonction de la dérive. Les résultats obtenus à partir de l'étude de la courbe de transfert de la sonde dipolaire, prometteuse du point de vue qualitatif, seront repris par G. MOURGUES et E. FIJALKOW au vu des résultats obtenus par la poursuite du travail théorique d'E. MICHEL.

Quand cette phase numérique sera achevée, nous serons à même d'analyser nos résultats et de déduire la vitesse de dérive du plasma par la mesure de l'effet Doppler sur les anti-résonances de la courbe de transfert de la sonde dipolaire. Il sera alors possible d'étendre la méthode à la sonde à impédance mutuelle, pour le diagnostic des effets de dérive dans un plasma spatial, moyen de diagnostic utilisable à bord de GEOS et d'ARCAD III.

Il faut enfin souligner que nous avons mis en évidence un désaccord systématique et pour l'instant inexpliqué (avec ou sans dérive) entre la position de la fréquence de résonance de la sonde dipolaire et celle de la coupure du diagramme de dispersion. Sans effet de dérive, ces deux fréquences sont supposées être très voisines de la fréquence plasma. Nos recherches s'orientent aussi sur l'identification d'un mode détecté juste en-dessous de la coupure du diagramme de dispersion.

Ces travaux ont fait l'objet de la thèse de 3ème cycle de  
J.P. LEBRETON.

### III.5.2. Participation au programme PICPAB

#### III.5.2.1. Source d'ions (Y. ARNAL, R. CHEZLEMAS, D. HENRY, L. POMATHIOD)

L'année a été consacrée à la mise au point du prototype du modèle de vol (Document de Travail CRPE/1040). Chaque sous-ensemble : source, circuit de gaz et électronique d'asservissement et de contrôle, a été testé (essais en vibration, en température, essais fonctionnels).

L'instrument délivre un faisceau d'ions hydrogène pulsé de 3 mA d'intensité à 7,5 KV ; la dispersion en énergie est de 200 V et la divergence angulaire de 3°. L'asservissement du flux de gaz dans la source, réalisé à l'aide d'une vanne piézo-électrique adaptée pour la circonstance, permet de fournir un faisceau reproductible à chaque impulsion, (toutes choses étant égales par ailleurs).

#### III.5.2.2. Sonde de Langmuir asservie au potentiel plasma (J.L. MICHAU)

L'étude de la maquette a permis de définir et construire la sonde (élément capteur) qui a subi avec succès les différents tests. L'étude de l'asservissement s'est poursuivie pour essayer de respecter le cahier des charges, la difficulté est essentiellement due à la combinaison de trois paramètres : temps de réponse, excursion en tension, dynamique.

#### III.5.3. Plasma de simulation (Y. ARNAL)

Le dépouillement des expériences spatiales déjà réalisées (HIPOCAMP, GEOS 1 et 2, PORCUPINE), la préparation des expériences nouvelles (PORCUPINE, ARCAD, PICPAB) ont entraîné une baisse de l'activité de physique expérimentale menée dans le caisson de simulation d'Orléans.

Dans le cadre du projet ARCAD 3, une seconde campagne de simulation d'un plasma ionosphérique en présence de la maquette du satellite a été réalisée dans le caisson de 300 m<sup>3</sup> de la SOPEMEA à Toulouse (Document de Travail CRPE/1041).

III.5.4. Etudes prospectives, expériences spatiales coopératives avec  
l'Université d'Utah - U.S.A. (D. HENRY)

Courant 78, le CRPE-PCE a été contacté par le Professeur BANKS de l'Université d'Utah (U.S.A.) pour participer, par la livraison d'une source d'ions à un cycle d'expériences utilisant des faisceaux de particules chargées, expériences embarquées sur les prochains vols de la navette spatiale. Parmi les divers objectifs scientifiques, nous pouvons citer : l'étude des processus de neutralisation, la mesure du potentiel de l'engin spatial, ainsi que l'utilisation d'un long câble de 10 km relié à un ballon conducteur comme antenne TBF et UBF de très forte puissance etc... Une proposition commune d'expériences a été conjointement déposée auprès du CNES et de la NASA.

### III.6. ETUDES THEORIQUES DES PLASMAS

#### REMARQUES GENERALES

L'année 1978 a été marquée par les évolutions suivantes :

- Les travaux sur les méthodes algébro-numériques sont maintenant principalement poursuivis par les mathématiciens de l'Université.
- L'utilisation de la théorie des groupes en physique non linéaire et la simulation numérique des plasmas fortement corrélés continuent à constituer les deux pôles centraux de l'activité du groupe théorique.
- Comme nous l'avions laissé prévoir l'an dernier, nous avons, pour répondre à une demande du C.N.E.T., débuté des études portant sur la structure des réseaux de commutation.

#### III.6.1. Antennes en milieu ionisé (G. MOURGUES, E. FIJALKOW, M.R. FEIX)

Nous avons terminé pour des excitations mono et bipolaires l'étude de la structure du rayonnement électrostatique d'une antenne située dans un plasma de dérive. En particulier, on a noté que pour des vitesses de dérive très supérieures à la vitesse thermique des électrons, un rayonnement important était dirigé dans la direction aval mais que l'on pouvait également noter des lobes secondaires. Ce travail clôt provisoirement les études théoriques sur les plasmas de dérive. Une publication est en cours.

#### III.6.2. Méthodes algébro-numérique : Les Pas de Géants (J. BOUJOT, A. PHAN, M.R. FEIX)

La justification de la méthode a été obtenue. Pour cela on a pu démontrer la convergence des séries en  $\epsilon$  pour des paramètres en  $\epsilon$  suffisamment petits mais finis (contrairement aux séries asymptotiques).

La mise en oeuvre de la méthode pour la résolution de systèmes différentiels couplés a été poursuivie sur deux exemples :

- Le modèle de KHABAKOV utilisé en théorie du solide et qui satisfait aux équations suivantes

$$\ddot{x} + x = 2\varepsilon x y$$

$$\ddot{y} + 3y = \varepsilon(x^2 - 3y^2)$$

Pour  $\varepsilon = .1$  (c'est à dire dans un cas où les calculs sont assez lourds car devant être poussés au 3ème ordre), la gain de temps sur une méthode de Runge Kutta est d'au moins un facteur 10.

- Le problème de N (en particulier N = 3) oscillateurs couplés, le système étant décrit par l'Hamiltonien

$$H = \sum_{j=1}^N \frac{1}{2} (\dot{x}_j^2 + \omega_j^2 x_j^2) + \varepsilon x_1 \dots x_N$$

Cet Hamiltonien est utilisé dans certains travaux soviétiques pour modéliser des interactions entre trois ondes dans le plasma.

On a, en particulier, étudié les échanges cycliques d'énergie entre les 3 oscillateurs. On a montré que si  $\varepsilon$  était suffisamment petit le système obéissait aux relations de Manley Rowe qu'il faut interpréter dans le sens suivant. Si  $\Delta E_1$ ,  $\Delta E_2$  et  $\Delta E_3$  sont les variations de l'énergie (par rapport à l'état initial) des 3 oscillateurs et si  $\omega_1 = \omega_2 + \omega_3$ , on a  $-\Delta E_1/\omega_1 = \Delta E_2/\omega_2 = \Delta E_3/\omega_3$ , relation vérifiée à tout instant. De plus les périodes des cycles ont été étudiées et on a pu montrer qu'elles variaient en  $\varepsilon^{-1}$ .

Les calculs formels (utilisant FORMAC) sont en cours pour le cas  $N \neq 3$ .

Une publication (66) est résultée de cette étude. Une deuxième est en cours de publication.

### III.6.3. Simulation sur ordinateurs de plasmas fortement corrélés

(M. NAVET, E. BONOMI, E. JAMIN, M.R. FEIX)

Une première étude a porté sur les effets de bords (répartition de la densité) pour un plasma unidimensionnel à une composante. On compare les résultats de 3 méthodes.

- La simulation dynamique où l'ordinateur suit le mouvement des N particules (avec relance de la dynamique dans l'espace des phases grâce à l'introduction des grilles de chaleur, voir rapport de 1977).
- Un calcul théorique reprenant celui de Kunz mais en ne laissant qu'un mur s'en aller à l'infini de manière à conserver les effets de bords. On obtient ainsi une série qui est d'autant plus convergente que nD (nombre de particules dans la longueur de Debye) est plus petit.
- Un calcul numérique qui, utilisant la nature unidimensionnelle du problème, effectue l'intégration dans le grand espace des phases. On a trouvé que nous pouvons intégrer dans l'espace de configurations correspondant à 8 particules pour des valeurs de nD allant jusqu'à .8 (le calcul s'alourdit considérablement avec le nombre de particules et la valeur de nD). Pour ce cas limite il se trouve que l'effet du bord ne dépasse pas les 4 premières particules ce qui justifie les approximations faites dans les schémas deux et trois.

Les trois méthodes ont donné un accord remarquable.

Un deuxième travail complète le précédent en s'attachant à définir précisément le concept de pression. En effet, plusieurs définitions sont possibles qui dans le cas du plasma à une composante ne donnent pas toujours le même résultat. Ceci est dû notamment au fait que les échanges d'énergie et de moment avec le fonds continu neutralisant ne sont pas pris en considération et lorsque des formules comme celle du viriel et celle de la pression thermodynamique  $p = - \partial F / \partial V$  sont appliquées, amènent pour cette dernière (la pression) des valeurs négatives dont le sens physique est contestable.

Une prise en compte plus détaillée des échanges d'énergie et de quantité de mouvement permet de réconcilier tous les concepts de pression, en particulier,

- celui de pression cinétique obtenue en calculant la moyenne de la quantité de mouvement échangée avec le mur,
- celui obtenu à partir du théorème du viriel où nous montrons qu'il faut distinguer l'énergie potentielle due à l'interaction particule bain et à l'interaction particule-particule, ces deux énergies figurant dans la formule du viriel avec des coefficients différents,
- celui obtenu à partir de la formule  $P = n_0 k T$  où  $n_0$  est tout simplement la densité sur le mur avec  $n_0 \neq n$  densité de la partie centrale du gaz.

Nous nous orientons actuellement vers la généralisation de ces études vers les systèmes non neutres.

Une publication (31) est résultée de ces travaux, une deuxième est en cours et une troisième est en préparation.

#### III.6.4. Physique non linéaire - Théorie des groupes

##### III.6.4.1. Groupes de transformation et dynamique stellaire

(A. MUNIER, J.R. BURGAN, M.R. FEIX)

Les méthodes développées lors des deux dernières années ont été utilisées pour étudier le problème de l'expansion d'un gaz gravitationnel. En appliquant la technique de réduction du nombre de variables indépendantes deux fois, on est parvenu à obtenir une expansion self similaire d'un tel système avec une densité uniforme à l'intérieur d'une sphère. La variation de densité dans le temps est en  $t^{-2}$ . Les solutions self similaires ainsi obtenues s'articulent autour d'une "solution squelette" où les fonctions de toutes les particules varient dans le temps en  $(1 + \frac{t}{T})^{2/3}$ , la constante  $T$  étant liée à la fréquence de Jean's à l'instant initial  $\Omega$  par la relation  $\Omega^2 T^2 = 2/3$ . Il est remarquable que cette expansion est la plus lente possible compatible avec un mouvement self similaire pour une densité initiale donnée.

Actuellement nous tentons de reprendre ces calculs dans le cadre de la théorie de la relativité générale. Deux publications (15) et (35) sont résultées de ces travaux, une autre est en cours.

III.6.4.2. Groupes de transformation et dynamique des faisceaux  
et des plasmas (géométrie unidimensionnelle plane)  
(M.P. MOREAU, E. FIJALKOW, M.R. FEIX)

Nous utilisons les mêmes méthodes que précédemment. Des solutions self similaires existent, correspondant pour un faisceau à l'expansion d'une population dont la densité uniforme dans un domaine donné décroît avec le temps en  $t^{-2}$ . On trouve également une solution "squelette" pour laquelle les positions de toutes les particules varient dans le temps comme  $(1 + \frac{t}{T})^2$ , la constante T étant liée à la fréquence plasma du faisceau par la relation  $\Omega^2 T^2 = 2$ . Cette solution "squelette" correspond à l'expansion la plus rapide compatible avec un mouvement self-similaire toujours à densité initiale constante ( $\Omega$  est la fréquence plasma correspondant à cette densité). Ces résultats ont été publiés en (14).

III.6.4.3. Lois de similitude et performances des machines à  
fusion (J.R. BURGAN, A. MUNIER, J. GUTIERREZ, M.R. FEIX)

L'utilisation des groupes self similaires permet de calculer pour un modèle mathématique de plasma donné, les invariants du problème et donc de dégager les lois de similitude régissant l'évolution d'un plasma. On peut ainsi montrer

- qu'il n'existe malheureusement pas de lois de similitude pour le problème le plus général d'un plasma classique si l'on considère l'ensemble des équations de Maxwell (que la dynamique soit relativiste ou non),
- qu'il existe une loi à un paramètre arbitraire pour le système Maxwell-Vlasov (que l'on peut même considérer en dynamique relativiste) ; ce sont alors les phénomènes individuels (collisions par exemple) qui ne sont pas respectés dans la similitude,

- qu'il existe une autre loi à un paramètre pour le problème à N corps électrostatique non relativiste (ce sont alors les phénomènes électromagnétiques qui ne sont pas correctement pris en ligne de compte),
- qu'un autre groupe à un paramètre peut être envisagé conservant les effets individuels et certains effets magnétiques mais supprimant une stricte neutralité et supprimant le terme de courant de déplacement.

Un point intéressant est l'utilisation de ces trois régimes de similitude où nous faisons rentrer autant de physique que cela est possible (puisque nous n'avons à notre disposition qu'un seul paramètre) pour prévoir une amélioration possible des performances des machines à fusion. Les trois régimes cités indiquent tous un grand intérêt à travailler avec des machines plus petites mais présentant des champs magnétiques plus intenses. Ces résultats ont donné lieu à une communication à l'Ecole d'Eté Internationale sur la Physique Non Linéaire à JACA (Espagne) en Juin 1978 qui sont en cours de publication.

#### III.6.5. Structure et simulation des autocommutateurs (E. BONOMI, M.R. FELIX)

Il s'agissait d'étudier l'influence des structures et des stratégies possibles d'acheminement des appels sur un autocommutateur en laissant pour le moment de côté l'aspect commande temporelle du problème. En particulier, on voulait étudier le gain en matériel (nombre d'étages, tailles des matrices) rendu possible en commutation temporelle par l'emploi d'une stratégie de réarrangement des appels en cours. Enfin, on se proposait de tester les résultats et les idées en procédant à des simulations sur ordinateur et en mesurant les taux de pertes.

Un des fils conducteurs de l'étude a été l'utilisation de la théorie de l'information qui joue pour ces systèmes le rôle de la mécanique statistique pour les systèmes physiques et qui présente avec cette dernière de grandes analogies formelles.

Les résultats obtenus cette année ont consisté principalement en une synthèse des nombreux résultats obtenus ces dernières années. Nous avons pu apporter également quelques résultats nouveaux supplémentaires.

Un premier résultat concerne la capacité commutatrice d'une matrice  $N \times N$ . Quant à sa "complexité", il est raisonnable de considérer qu'elle varie comme  $N^2$  le nombre de relais, pour les commutateurs spatiaux (ce qui implique un rendement en  $\log N/N$  qui favorise les matrices d'assez petites tailles et les commutateurs à grand nombre d'étages). Par contre, cette hypothèse n'est plus valable en commutation temporelle et la taille optimum des matrices de base est certainement beaucoup plus grande. On pourra alors en profiter soit pour réduire les tailles des autocommutateurs (en gardant le même nombre d'abonnés), soit pour construire des autocommutateurs de plus grande capacité.

Nous avons ensuite étudié l'influence des stratégies possibles. Un choix de hasard parmi tous les chemins possibles dans un autocommutateur donnant un certain taux de blocage (pour un trafic donné), ce taux peut être amélioré en choisissant une stratégie optimum. En particulier, si l'on considère le classique réseau de CLOS à 3 étages, on peut réduire le nombre des matrices de l'étage central en n'utilisant une matrice vide de ce étage que si l'on y est forcé (stratégie de l'utilisation au maximum des matrices déjà chargées).

Enfin, le déplacement d'appels en cours pour permettre l'acheminement de nouveaux appels est envisageable en commutation électronique. Encore faut-il que la recherche de nouveaux chemins dans un autocommutateur à grand nombre d'étages n'affecte pas trop d'appels et puisse être effectuée rapidement. Deux techniques sont alors possibles.

- On stocke les appels arrivés dans un certain intervalle de temps et à la fin de cet intervalle on procède à l'attribution globale des chemins. On peut mettre en oeuvre un algorithme extrêmement rapide, notamment lorsque chaque étage est formé d'un nombre  $2^t$  de matrices. On montre alors que le nombre d'opérations élémentaires pour traiter  $N$  appels, varie en  $N \log_2 N$ . Cette stratégie peut se concevoir pour un système à fort trafic ( $> .6$  Erlang/ligne ou abonné).

- Dans le cas où le réarrangement est rare et n'entraîne pas d'effet de cascade, nous proposons un algorithme de permutation rapide qui d'une manière heuristique minimise le nombre de réarrangements.

Ces calculs et ces algorithmes ont été introduits dans des programmes de simulation portant sur une population de 128 à 1024 abonnés. On a, sur ces simulations, vérifié certaines lois d'échelles, en particulier le concept d'extensivité qui permet de travailler avec un plus petit nombre d'abonnés qu'en réalité, à condition de changer les dimensions des matrices centrales.

Nous préparons actuellement un article de synthèse sur ces problèmes. Certaines questions restent en suspens, notamment la structure optimale des réseaux de concentration pour lesquels on est loin du minimum théorique prévu par la théorie de SHANNON. Cependant, c'est sur la théorie de la commutation par paquet que nous pensons orienter notre effort en 1979.

FIGURE III-1

Courbes de réponse en fréquence d'une sonde quadripolaire HF à configuration carrée, orientée avec son plan perpendiculaire au champ magnétique : courbe expérimentale en trait plein ; courbe théorique en tirets, calculée pour une gyrofréquence électronique de 1.79 MHz, une fréquence plasma de 3.70 MHz, et une température électronique de 920 K. Le côté de la sonde mesurait 17 cm et le rayon des sphères 1,5 cm.

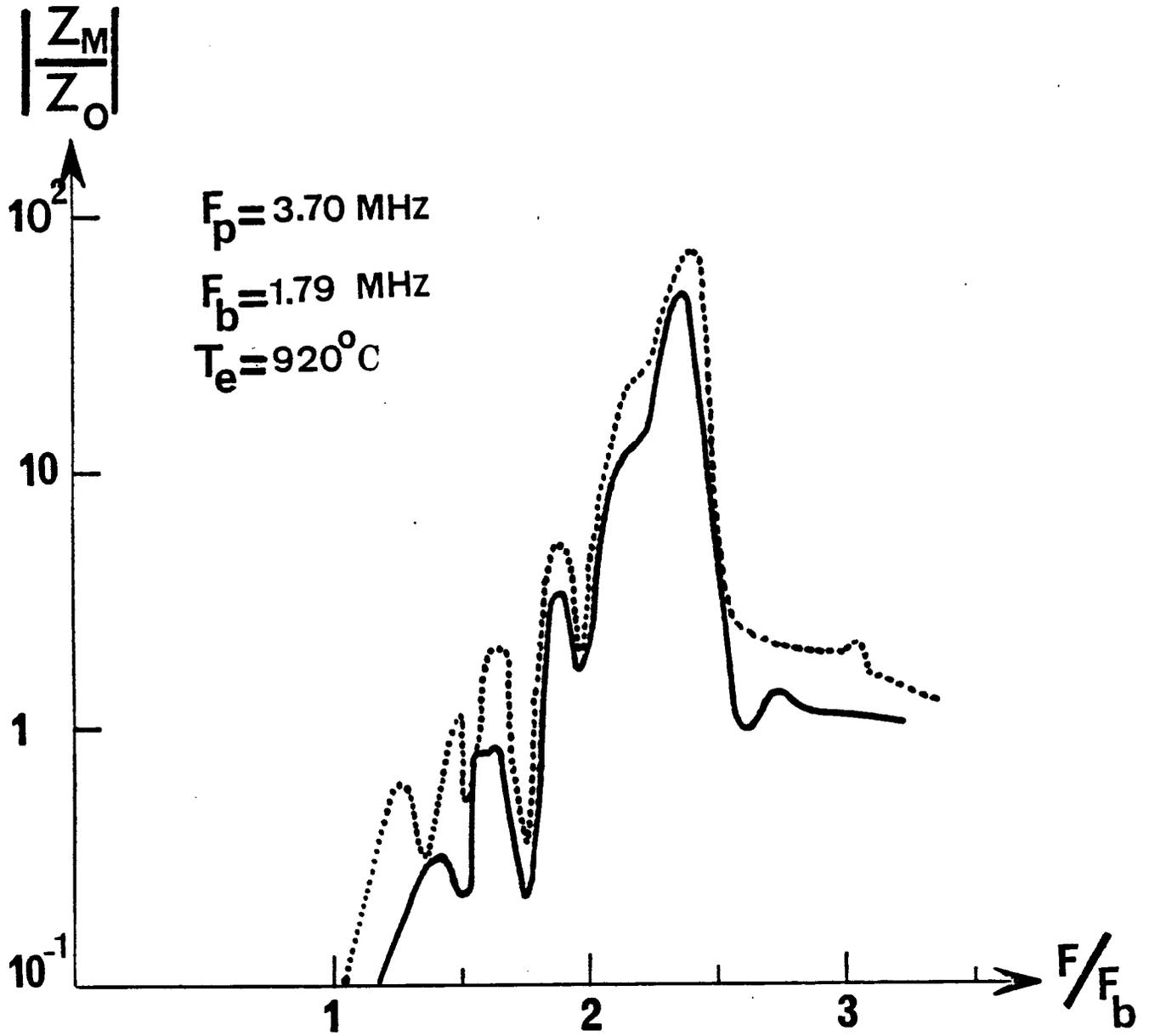
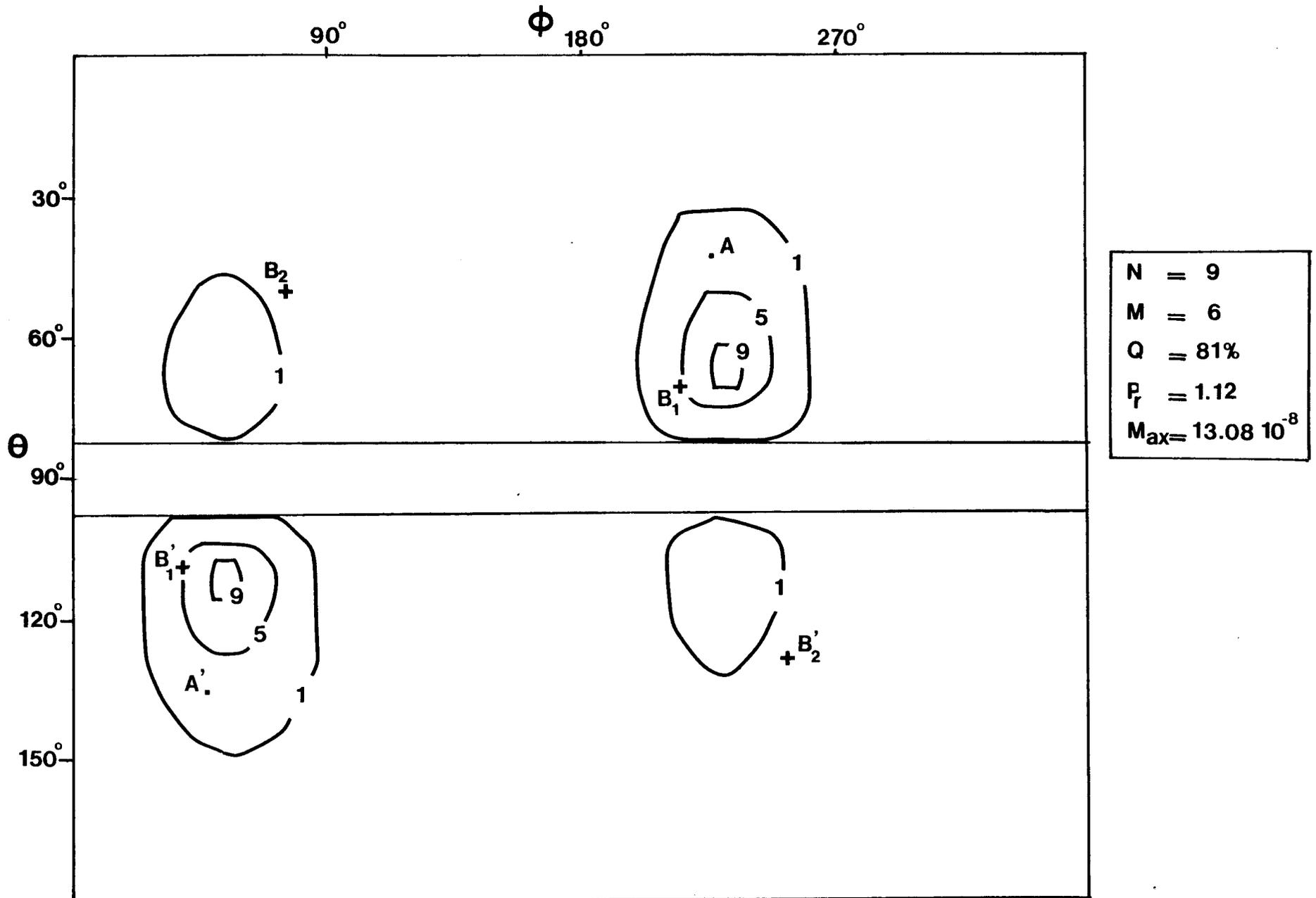


Fig. III-1

FIGURE III-2

Fonction de distribution des ondes d'un souffle TBF observé le 20 Juin 1977 sur le satellite GEOS 1. La variable  $\theta$  représente l'angle entre la direction de normale d'onde et la direction du champ magnétique terrestre. La variable  $\phi$  est un angle azimutal. La région située autour de  $\theta = \pi/2$  est une zone de non propagation. La solution du maximum d'entropie est donnée sous forme de courbes de niveau. On a également porté en A la solution obtenue, sous l'hypothèse onde plane, par la méthode de J.D. MEANS, et en  $B_1$  et  $B_2$  les deux pics du modèle deux ondes planes. N'ayant effectué cette analyse qu'à partir de la mesure des 3 composantes magnétiques du champ, on ne peut pas distinguer les solutions montantes ( $0 < \theta < \pi/2$ ) des solutions descendantes ( $\pi/2 < \theta < \pi$ ). On voit que le modèle du maximum d'entropie et le modèle à 2 ondes planes indiquent la présence de deux familles d'ondes se propagent simultanément dans des directions différentes. Les rapports entre les énergies des pics principaux et secondaires sont, dans les deux cas, de l'ordre de 3.5.

Fig. III-2



C.R.P.E. : MOYENS GENERAUX DU GROUPEMENT

DIRECTION

- Directeur : J. HIEBLOT
- Secrétaire : J. PERROT
- Directeur-Adjoint : M. PETIT
- Secrétaire : N. ADANE
- Adjointe : G. PILLET

SERVICES ADMINISTRATIFS : D. ROSSIGNOL

Secrétariat :

- M.P. SAVIN

Comptabilité :

- Y. PESCHARD  
- R. BELHACENE

Service du Personnel :

- Y. SUIGNARD

Standard :

- J. DUMUIDS

Gardien et Chauffeurs :

- J.P. BUREAU  
- L. CLAVERO  
- G. RUSSEIL



Liste du Personnel du Département PCE (Orléans) - Chef du Département : C. BEGHIN - 31 décembre 1978

=====

MESURE DES PLASMAS SPATIAUX (PCE B)

- L.R.O. STOREY
- F. Bausset - P. Lotte
- J.B. Bignolas - M. Malingre (St.Maur)
- L.J. Buchalet - Phu Sy Uy
- M. Bujor - R. Pottelette (St.Maur)
- L. Cairo - Y. Tanaka
- F. Lefeuvre - J. Thiel

PHYSICO-CHEMIE DE L'ATMOSPHERE (PCE E)

- R. BURKE
- J. Faguet
- I. Mac Laren
- J. Lespagnol
- R. Thomas

GROUPE TECHNIQUE SATELLITES (PCE H)

- J.F. KARCZEWSKI - P. Fergeau
- B. Duboys - M. Levêque
- P. Fort - J.M. Moreau
- M. Foulon - B. Poirier
- A. Hauser - F.X. Sené

SERVICES GENERAUX (PCE A)

- A. Karczewski
- D. Lhuillier
- C. Marcadet

ETUDE THEORIQUE DES PLASMAS (PCE C)

- M.R. FEIX
- E. Bonomi - M.P. Moraux
- E. Fijalkow - G. Mourgues
- E. Jamin - M. Navet

ETUDE EN PLASMA DE LABORATOIRE (PCE F)

- D. HENRY
- Y. Arnal - P. Frot
- M. Chabassière - J.L. Michau
- R. Chezlemas - J.L. Pomathiod

ETUDE ET MECANIQUE (PCE I)

- J. BRUGIERE
- P. Badets - J. Lebihan
- A. Bonnet - P. Macchi
- M. Dion - G. Maille

PERSONNEL NON RATTACHE A UN GROUPE

- G. Doyen (Garchy)
- M. Langerman (St. Maur)

DETECTION DES PHENOMENES PHYSIQUES  
DU PLASMA POLAIRE (PCE D)

- C. BEGHIN
- R. Debré - J. Pignard
- Pierrette Décréau - M. Pirre
- M. Hamelin - C. Renard

GROUPE TECHNIQUE FUSEES (PCE G)

- J.M. ILLIANO
- P. Décréau
- R. Massif
- G. Pesnel
- Y. Ruin

TRAITEMENT DU SIGNAL (PCE J)

- P. GILLE - M. Parrot
- C. Delannoy - T.K. Phan
- A. Gisselbrecht - J.C. Toussaint
- C. Koppreiter

CONSEILLERS SCIENTIFIQUES  
EXTERNES AU C.N.E.T.

- R. Boswell
- R. Wayne

BIBLIOGRAPHIE

REVUES ET OUVRAGES COLLECTIFS

- (1) ALCAYDE D., BAUER P., HEDIN A., SALAH J.E., Compatibility of seasonal variations in mid-latitude thermospheric models at solar maximum and low geomagnetic activity, J. Geophys. Res., 83 (A3), 1141-1144, 1978.
- (2) ALTMAN C. and E. FIJALKOW, Propagation of Pcl micropulsations in horizontal ionospheric ducts, in Space Research XVIII, pp. 305-308, Pergamon, 1978.
- (3) ASHOUR-ABDALLA M., KENNEL C.F., Nonconvective and convective electron cyclotron harmonic instabilities, J. Geophys. Res., 83 (A4), 1531-1543, 1978.
- (4) BARASSIN J., BARASSIN A. et R. THOMAS, Astrochimie, l'Actualité chimique, sept., 17-22, 1978.
- (5) BERNARD R., Incoherent scatter results for coordinated special intervals at St Santin (France), J. Atmos. Terr. Phys., 40 (8), 933-939, 1978.
- (6) BERNARD R., MASSEBEUF M. et al., Large scale dynamics observed during the western Europe anomaly campaign 1975/76 from wind, temperature and absorption observations, Space Research XVIII, pp. 133-134, Pergamon Press, 1978.
- (7) BERTEL L., TESTUD J., VIDAL-MADJAR D., Evaluation of the vertical flux of energy into the thermosphere from medium scale gravity waves generated by the jet stream, J. Atmos. Terr. Phys., 40 (6), 691-696, 1978.

- (8) BERTHELIER J.J. et M. PIRRE, Ion analyzers for measurement of D.C. electric field and ion temperature, Space Sci. Instr., 4 (2-3), 213-226, 1978.
- (9) BERTIN F., TESTUD J., Jet stream et ondes de gravité : une étude expérimentale, La Météorologie, VI (14), 43-59, 1978.
- (10) BERTIN F., TESTUD J., KERSLEY L., REES P.R., The meteorological jet stream as a source of medium scale gravity waves in the thermosphere : an experimental study, J. Atmos. Terr. Phys., 40 (10/11), 1161-1183, 1978.
- (11) BLANC M., Midlatitude convection electric fields and their relation to ring current development, Geophys. Res. Lett., 5 (3), 203-206, 1978.
- (12) BLANC M., PETIT M., Un "chat" bien adapté au grand Nord, La Recherche, n° 90, 576-579, 1978.
- (13) BOSWELL R.W., Energetic ions and electromagnetic radiation in auroral regions, Geophys. Res. Lett., 5 (5), 396-398, 1978.
- (14) BURGAN J.R., FEIX M., FIJALKOW E., GUTIERREZ et A. MUNIER, Utilisation des groupes de transformation pour la résolution des équations aux dérivées partielles, in "Contribution to the inverse problems", S. Sabatier Ed., Springer Verlag, 1978.
- (15) BURGAN J.R., GUTIERREZ J., MUNIER A., FIJALKOW E. and M.R. FEIX, Group transformation for phase space fluids, in "Strongly coupled plasmas", pp. 597-642, Plenum Press, 1978.
- (16) BURGAN J.R., GUTIERREZ J., FIJALKOW E., NAVET M. and M.R. FEIX, Self-similar solutions for Vlasov and water-bag models, J. Plasma Phys., 19 (1), 135-146, 1978.

- (17) CAIRO L. et Y. VUILLAUME, Traitement des images de télédétection multispectrale en hydrogéologie, in "Traitement automatisé de l'image", Documentation Française, 1978.
- (18) CHANTEUR G., GENDRIN R., PERRAUT S., High-energy electron drift echoes at the geostationary orbit, J. Atmos. Terr. Phys., 40 (3), 367-371, 1978.
- (19) CHRISTIANSEN P.J., GOUGH M.P., MARTELLI G., BLOCH J.J., CORNILLEAU N., ETCHETO J., GENDRIN R., BEGHIN C., DECREAU P., JONES D., GEOS-1 observations of electrostatic waves, and their relationships with plasma parameters, Space Sci. Rev., 22 (4), 383-400, 1978 (Communication présentée au 13e Symposium "ESLAB", Innsbruck, Autriche, 1978).
- (20) CHRISTIANSEN P.J., GOUGH M.P., MARTELLI G., BLOCH J.J., CORNILLEAU N., ETCHETO J., GENDRIN R., JONES D., BEGHIN C., DECREAU P., GEOS-1 : Identification of natural magnetospheric emissions, Nature, 272 (5655), 682-686, 1978.
- (21) CORNILLEAU-WHRLIN N., GENDRIN R., LEFEUVRE F., PARROT M., GRARD R., JONES D., BAHNSEN A., UNGSTRUP E., GIBBONS W., VLF electromagnetic waves observed onboard GEOS-1, Space Sci. Rev., 22 (4), 371-382, 1978 (Communication présentée au 13e Symposium "ESLAB", Innsbruck, Autriche, 1978).
- (22) CORNILLEAU-WHRLIN N., GENDRIN R., TIXIER M., VLF waves : Conjugated ground-satellite relationships, Space Sci. Rev., 22 (4), 419-432, 1978 (Communication présentée au 13e Symposium "ESLAB", Innsbruck, Autriche, 1978).
- (23) CORNILLEAU-WHRLIN N., GENDRIN R., PEREZ R., Reception of the NKL (Jim Creek) Transmitter onboard GEOS-1, Space Sci. Rev., 22 (4), 443-452, 1978 (Communication présentée au 13e Symposium "ESLAB", Innsbruck, Autriche, 1978).

- (24) DECREAU P.M.E., BEGHIN C. and M. PARROT, Electron density and temperature, as measured by the mutual impedance experiment on board GEOS-1, Space Sci. Rev., 22 (5), 581-595, 1978.
- (25) DECREAU P.M.E., ETCHETO J., KNOTT K., PEDERSEN A., WRENN G.L. and D.T. YOUNG, Multi-experiment determination of plasma density and temperature, Space Sci. Rev., 22 (5), 633-645, 1978.
- (26) DELAHAYE J.Y., LAVERGNAT J., NEY R., KARCZEWSKI J.F. and F. SENE, Waves measurements in the ARAKS experiment, Space Sci. Instr., 4 (2-3), 143-169, 1978.
- (27) DEMARS C., BERTHOMIER et M. GOUSTARD, A few results about the ontogenesis of the "great call" of gibbons (*Hylobates Concolor*), in "Recent Advances in Primatology" -1-, Acad. Press, 827-830, 1978.
- (28) EMERY B.A., Neutral thermospheric winds deduced above Millstone Hill, 1 - Mathematical model, uncertainties, and representative results, J. Geophys. Res., 83 (A 12), 5691-5703, 1978.
- (29) EMERY B.A., Neutral thermospheric winds deduced above Millstone Hill, 2 - Seasonal winds variations, 1970-1971, J. Geophys. Res., 83 (A 12), 5704-5716, 1978.
- (30) ETCHETO J., BLOCH J.J., Plasma density measurements from the GEOS-1 relaxation sounder, Space Sci. Rev., 22 (5), 597-610, 1978.
- (31) FEIX M.R., Computer experiments in one-dimensional plasmas, in "Strongly coupled plasmas", pp. 499-530, Plenum, 1978.
- (32) GENDRIN R., PERRAUT S., FARGETTON H., GLANGEAUD F., LACOUME J.L., ULF waves : Conjugated ground-satellite relationships, Space Sci. Rev., 22 (4), 433-442, 1978 (Communication présentée au 13e Symposium "ESLAB", Innsbruck, Autriche, 1978).

- (33) GIRAUD A., PETIT M., Ionospheric Techniques and Phenomena, Geophysics and Astrophysics Monographs 13, D. Reidel, 1978.
- (34) GLASS M., BERNARD R., FELLOUS J.L., MASSEBEUF M., The French meteor radar facility, J. Atmos. Terr. Phys., 40 (8), 923-931, 1978.
- (35) GROS M., BERTRAND P. and M.R. FEIX, Connection between hydrodynamic, water-bag and Vlasov models, Plasma Phys., 20 (10), 1075-1080, 1978.
- (36) GUTIERREZ J., MUNIER A., BURGAN J.R., FEIX M. and E. FIJALKOW, Non linear transport equations : properties deduced through transformation groups in "Non linear problems in theoretical physics", Springer Verlag, 1978, A.F. RANADA Ed.
- (37) HAMELIN M., DEBRIE R. et J.P. LEBRETON, Prévission théorique et observation du rayonnement des modes de Bernstein en direction oblique au champ magnétique, C.R. Acad. Sci., 286 B (17), 227-230, 1978.
- (38) HAMELIN J., KARCZEWSKI J.F. et F.X. SENE, Sonde de mesure du champ magnétique dû à une décharge orageuse, Ann. Télécomm., 33 (5-6), 198-205, 1978.
- (39) HARVEY C.C., ETCHETO J., JAVEL Y. de, PETIT M., MANNING R., The ISEE Electron density experiment, IEEE Trans. GE-16 (3), 231-238, 1978.
- (40) HIGEL B., Small scale irregularities of electron density in the F-region from  $f_n$  resonances observed by a rocket-borne relaxation sounding experiment, Radio Sci., 13 (5), 901-916, 1978.
- (41) HIGEL B., Small scale structure of magnetospheric electron density through on-line tracking of plasma resonances, Space Sci. Rev., 22 (5), 611-631, 1978.

- (42) KARCZEWSKI J.F. and J.M. MOREAU, Altitude measurement of a rocket with Hall effect magnetometer, Space Sci. Instr., 4 (2-3), 227-237, 1978.
- (43) KLAPISZ C. et A. WEILL, Modèle semi-empirique d'évolution matinale du profil de vent entre le sol et le sommet de l'inversion, J. Rech. Atmos., 12 (2-3), 113-117, 1978.
- (44) KLAPISZ C. et A. WEILL, Wind profile in the morning interpretation of sodar measurements, in "IV<sup>th</sup> Symposium on Meteorological Observations and Instrumentation", pp. 560-563, A.M.S., 1978.
- (45) KODERA K., GENDRIN R., VILLEDARY C. de, Analysis of time-varying signals with small BT values, IEEE Trans., ASSP-26 (1), 64-76, 1978.
- (46) PANTEL R., BUJOR M. and J. BARDOLLE, Study of the formation of absorption layers at metal surfaces using a mirror microscope, Le Vide, (n° spécial Colloque Européen "Surface - Vide - Métal"), pp. 13-19, 1978.
- (47) PERRAUT S., GENDRIN R., VILLEDARY C. de, LAVERGNAT et al., French mobile station for recording geophysic data : Description and initial results of the conjugated campaign in association with GEOS-1, Proceedings ESA SP/135 ("European sounding rockets balloons and related research, with emphasis on experiments at high latitudes"), Ed. B. Battrick et M. Aalvotsen, pp. 97-108, 1978.
- (48) PERRAUT S., GENDRIN R., ROBERT P., ROUX A., VILLEDARY C. de, JONES D., ULF waves observed with magnetic and electric sensors on GEOS-1, Space Sci. Rev., 22 (4), 347-370, 1978 (Communication présentée au 13e Symposium "ESLAB", Innsbruck, Autriche, 1978).

- (49) ROUX A., PELLAT R., A theory of triggered emissions, J. Geophys. Res., 83 (A 4), 1433-1441, 1978.
- (50) SINGH N., Electron distribution function in a plasma with a constant electric field, Plasma Phys., 20 (9), 927-941, 1978.
- (51) SINGH N., Distribution of charge on a wire in a warm plasma, Proc. IEEE, 66 (2), 249-250, 1978.
- (52) SINGH N., A boundary-value problem treatment of an electric dipole in a warm isotropic plasma using the multiple water-bag model, Radio Sci., 13 (4), 625-637, 1978.
- (53) SOLOMON J., PELLAT R., Convection and wave-particle interactions, J. Atmos. Terr. Phys., 40 (3), 373-378, 1978.
- (54) STOREY L.R.O. and J. THIEL, Thermal and field-aligned drift effects near the lower oblique resonance, Phys. Fluids, 21 (12), 2325-2335, 1978.
- (55) TAIEB C., SCIALOM G., KOCKARTS G., A dynamical effect in the ionospheric F1 Layer, Planet. Space Sci., 26 (11), 1007-1016, 1978.
- (56) TESTUD J., Le système Ronsard - Moyen de télédétection des mouvements atmosphériques en air clair et nuageux, dans "Mécanique de l'Atmosphère et Energétique Industrielle".
- (57) THOMAS R., BARASSIN A. and R.R. BURKE, Tube à dérive à introduction sélective par spectromètre de masse (TDSM) pour l'étude cinétique des réactions ion-molécule, Int. J. Mass Spectrom. Ion Phys., 28 (3), 275-284, 1978.

- (58) TROTIGNON J.G. and M.R. FEIX, Non linear steady state structures for inhomogeneous plasma, Radio Science, 12 (6), 1035-1044, 1977.
- (59) VIDAL-MADJAR D., Theoretical study of propagation of short periodic gravity waves within the thermosphere. Application to the plasma line measurement and to a Faraday rotation experiment, J. Atmos. Terr. Phys., 40 (1), 01-12, 1978.
- (60) VIDAL-MADJAR D., Gravity wave detection in the lower thermosphere with the French incoherent scatter facility, J. Atmos. Terr. Phys., 40 (6), 685-689, 1978.
- (61) VIDAL-MADJAR D., BERTIN F. et J. TESTUD, Sur le jet stream de la tropopause en tant que source des ondes de gravité observées dans la thermosphère, Ann. Géophys., 34 (1), 01-07, 1978.
- (62) WEILL A., La couche limite atmosphérique et ses propriétés dispersives, dans "Mécanique de l'Atmosphère et Energétique Industrielle".
- (63) WEILL A., BAUDIN F., GOUTORBE P., VAN GRUNDERBEECK P., LEBERRE P., Turbulence structure in temperature inversions and in convection fields as observed by Doppler SODAR, Boundary-Layer Meteorol., 15 (3), 375-390, 1978.
- (64) WEILL A., EYMARD L., LE QUERE M.E., KLAPISZ C., BAUDIN F. and P. VAN GRUNDERBEECK, Investigation of the planetary boundary layer with an acoustic Doppler sounder, in "IV<sup>th</sup> Symposium on Meteorological Observations and Instrumentation", pp. 415-421, A.M.S., 1978.
- (65) WEILL A., LE QUERE M.E., VAN GRUNDERBEECK P. and J.P. GOUTORBE, Measurement of vertical velocity variance by means of an acoustic sounder, in "IV<sup>th</sup> Symposium on Meteorological Observations and Instrumentation", pp. 459-462, A.M.S., 1978.

- (66) BOUJOT J. et A. PHAM NGOC DINH, Un algorithme numérique pour la résolution d'une équation différentielle non linéaire, C.R. Acad. Sc., 286 A, 1063-166 , 1978.
- (67) OBERLIN M., J. GOMA and M. BUJOR, Work function of heat treated thin carbon films, High Temperatures - High Pressures, 9, 407-414, 1977.
- (68) BOOKER H.G. and F. LEFEUVRE, The relation between ionospheric profiles and ELF propagation in the earth-ionosphere transmission line, J. Atmosph. Terr. Phys., 39, (11-12), 1277-1292, 1977.

REVUES A PARAITRE EN 1979

- (101) ALCAYDE D., FONTANARI J., KOCKARTS G., BERNARD R. et P. BAUER, Temperature, molecular nitrogen concentration and turbulence in the lower thermosphere inferred from incoherent scatter data, Ann. Geophys., 35, à paraître en 1979.
- (102) BLANC M. et P. AMAYENC, Seasonal variation of the ionospheric E x B drifts above St Santin on quiet days, J. Geophys. Res., à paraître en 1979.
- (103) BURGAN J.R., FIJALKOW E. and M.R. FEIX, Dispersion relations for a collisional magneto plasma, J. of Plasma Physics, à paraître en 1979.
- (104) BURGAN J.R., FIJALKOW E., J. GUTIERREZ and M.R. FEIX, Self-similar solution of a gravitational system with varying G, soumis à Astrophysical Journal.
- (105) BURGAN J.R., FEIX M.R., FIJALKOW E., GUTIERREZ J., MUNIER A., Self-similar law for fusion machines, soumis à Nuclear Fusion.
- (106) BONOMI E., JAMIN E., NAVET M. and M.R. FEIX, Wall effects in one-dimensional jellium, Physics letters A, à paraître en 1979.
- (107) CHANG J.S., KODERA K., Theory of mass-discrimination effects in ion extraction from a plasma of wide pressure range, Int. J. Mass Spectr. Ion Phys., 29 (3), 261-267, 1979.
- (108) CORNILLEAU-WEHRLIN N. and R. GENDRIN, Quenching of natural cyclotron instability by large amplitude monochromatic waves propagating in an inhomogeneous medium, Astrophys. Space Sci., à paraître en 1979.
- (109) CORNILLEAU-WEHRLIN N. and R. GENDRIN, VLF transmitter induced quiet bands : a quantitative interpretation, J. Geophys. Res., à paraître en 1979.
- (110) EYMARD L. et A. WEILL, Gravity waves in the atmosphere observed by acoustic Doppler Sodar, soumis à Boundary Layer Meteor.

- (111) FAYNOT J.M. et P. VILA, F-region strata at the magnetic equator, Ann. Geophys., 35, à paraître en 1979.
- (112) GABISON A. et R. GENDRIN, Appareil analogique destiné à la mesure en temps réel de l'amplitude, de la fréquence et de la phase instantanées de signaux variant dans le temps, Ann. Télécomm., à paraître en 1979.
- (113) GENDRIN R. and G. LAURENT, About the chevron structure of some Pc 1 pulsations, Geophys. Res. Lett., à paraître en 1979.
- (114) GENDRIN R. and C. de VILLEDARY, Apparent and real frequency-time structures in magnetospheric emissions, J. Geophys. Res., à paraître en 1979.
- (115) GENDRIN R. and C. de VILLEDARY, Unambiguous determination of fine structures in multicomponent time-varying signals, Ann. Télécomm., à paraître en 1979.
- (116) HAMELIN M., Excitation of LHR electrostatic waves in a warm magnetoplasma by current pulses, Radio Science, à paraître en 1979.
- (117) HARVEY C.C., ETCHETO J. and A. MANGENEY, Early results from the ISEE electron density experiment, Space Sci. Rev., à paraître en 1979.
- (118) ILLIANO J.M. and R. POTTELETTE, Measurement of the collective motion of the electrons deduced from the shift of the lower oblique resonance frequency, Physics Letters A, à paraître en 1979.
- (119) KLAPISZ C. and A. WEILL, Semi-empirical morning wind speed profiles modeled in the planetary boundary layer, J. Appl. Meteo., à paraître en 1979.
- (120) LEFEUVRE F. and C. DELANNOY, Analysis of a random electromagnetic wave field by a maximum entropy method, Ann. Télécomm., à paraître en 1979.

- (121) LEFEUVRE F. and M. PARROT, The use of the coherence function for the automatic recognition of chorus and hiss observed by GEOS-1, J. Atmosph. Terr. Phys., à paraître en 1979.
- (122) LOISIER G., CORNILLEAU-WEHRLIN N. et R. GENDRIN, Détermination des directions de normales d'onde de signaux variant dans le temps. Application aux émissions naturelles TBF détectées à bord de satellites, Ann. Télécomm., à paraître en 1979.
- (123) MASSEBEUF M., BERNARD R., FELLOUS J.L. and M. GLASS, The mean zonal circulation in the meteor zone above Garchy (France) and Kiruna (Sweden), J. Atmos. Terr. Phys., 41, à paraître en 1979.
- (124) MOURGUES G., FIJALKOW E. and M.R. FEIX, Forced oscillations generated by a point antenna in a drifting plasma, I. Cold plasma and water-bag model, (II. Hot plasma and low drift velocity), J. Plasma Phys., à paraître en 1979.
- (125) MUNIER A., FEIX M., FIJALKOW E., BURGAN J.R., GUTIERREZ J., Time dependent solution for a self gravitating star system, Astronomy and Astrophysics, à paraître en 1979.
- (126) PANTEL R., BUJOR M. and J. BARDOLLE, Oxygen absorption on various vicinal faces close to the (0001) basal plane of rhenium, Surface Science, à paraître en 1979.
- (127) POTTELETTE R., Measurement of the cross-spectrum of random linear electrostatic waves in an isotropic maxwellian plasma, Physics of Fluids, à paraître en 1979.
- (128) ROBERT P., KODERA K., PERRAUT S., GENDRIN R. et C. de VILLEDARY, Amplitude et polarisation des ondes UBF détectées à bord du satellite GEOS-1. Méthode d'analyse, problèmes rencontrés et solutions pratiques, Ann. Télécomm., à paraître en 1979.
- (129) S-300 EXPERIMENTERS, Measurements of electric and magnetic wave fields and of cold plasma parameters on board GEOS-1. Preliminary results, Planet. Space Sci., à paraître en 1979.

- (130) STOREY L.R.O. and F. LEFEUVRE, The analysis of 6 component measurements of a random electromagnetic wave field in a magnetoplasma, I. The direct problem, Geophys. J.R. Astr. Soc., 56 (2), 225-269, 1979.
- (131) TESTUD J., BREGER G., AMAYENC P., CHONG M., NUTTEN B. et A. SAUVAGET, A radar Doppler observation of a cold front : tridimensional air circulation, related precipitation system and associated wavelike motions, J. Atmos. Sci., à paraître en 1979.
- (132) VIDAL-MADJAR D., Medium scale gravity waves and their non linear interaction with the means flow : a numerical study, J. Atmos. Terr. Phys., à paraître en 1979.
- (133) WEILL A., KLAPISZ C., STRAUSS B. and F. BAUDIN, Heat flux and structure of temperature fluctuation measurement with an acoustic Doppler sounder, J. Atmos. Sci., à paraître en 1979.
- (134) WEILL A. et C. KLAPISZ, Profils de vent entre le sol et l'inversion, J. Rech. Atmosph., à paraître en 1979.
- (135) PIRRE M., HAMELIN M., SANDERSON T.R. et G.L. WEBB, A method to measure the D.C. electric field in the vicinity of a spacecraft using artificially injected charged particles, Ann. Geophys., à paraître en 1979.
- (136) THOMAS R., BARASSIN J. et A. BARASSIN, Mobilités et coefficients de diffusion longitudinale des ions  $A_r^+$  et  $CH_x^+$  dans l'hélium, Int. J. Mass Spectrom. Ion Phys., à paraître en 1979.
- (137) BONOMI E., FEIX M.R., HEBUTERNE G., Théorie de l'Information, Structure et modélisation d'un réseau de connexion, à paraître dans les Annales des Télécommunications.

DOCUMENTS INTERNES

- (201) ALCAYDE D., BOSQUED J.M., BERTHELIER J.J., BERTIN F., PETITDIDIER M.,  
Eiscat : Troisième séminaire préparatoire CESR, 9 - 10 octobre  
1978, Rapport RCP 414 n° 1 978-2.
- (202) AMAYENC P., CHALON J.P., GILET M., SOMMERIA G., TESTUD J. et al.,  
Avant-projet d'une expérience d'étude de la convection profonde  
tropicale, Rapport COPT, (CRPE - LMD - EERM), 1978.
- (203) ARNAL Y., CHEZLEMAS R., HENRY D., POMATHIOD L., Développement d'une source  
d'ions embarquable sur la navette spatiale, 1er rapport semestriel  
contrat DRET 78/1036, Document de travail CRPE/PCE/1040.
- (204) BERTIN F., BLANC M., VIDAL-MADJAR D., L'exploration de la mésosphère  
et de la stratosphère à l'aide du sondeur à diffusion incohérente  
du CNET. Une étude de faisabilité, Document de Travail  
CRPE/ETE/1038.
- (205) BIGNOLAS J.B., Analyse de surface par spectroscopie Auger, Document  
de Travail CRPE/1030, 78.
- (206) BURGAN J.R., Sur des groupes de transformations en physique mathéma-  
tique. Applications aux fluides de l'espace des phases, et à la  
mécanique quantique, Note Technique CRPE/PCE/51.
- (207) DECREAU P.M.E., The double sphere probe and the quadripole probe,  
in a warm isotropic plasma : experimental results and tentative  
interpretation, Note Technique CRPE/PCE/60.
- (208) DUBOYS B., KARCZEWSKI J.F. et J.M. MOREAU, Satellite ARCAD 3,  
Expérience ISOPROBE, Dossier architecture électrique, Document  
de Travail CRPE/PCE/1019.
- (209) EYMARD L., Ondes de gravité dans la couche limite planétaire : Etude  
expérimentale par sondage acoustique, Note Technique CRPE/ETE/54.

- (210) FERGEAU P., HAUSER A., KARCZEWSKI J.F. et M. LEVEQUE, Ensemble de récepteurs électriques TBF et HF destinés à des mesures EMI dans le cadre du projet ARCAD 3, Document de Travail CRPE/PCE/1028.
- (211) FREMONT S., Etude du circuit de régulation d'un flux de gaz pour la source à ions, Document de Travail CRPE/PCE/1027.
- (212) FUKUYAMA K., Diffusion incohérente d'une onde électromagnétique dans la mésosphère : Une étude théorique, Note Technique CRPE/ETE/58.
- (213) GENDRIN R. (Ed.), Le satellite GEOS, Note Technique CRPE/ETE/55.
- (214) GENDRIN R. (Ed.), BLANC M. (Ed.), Electrodynamique des atmosphères, Note Technique CRPE/ETE/57, issue du colloque de La Londe, Var, 23-26 mai 1977.
- (215) GILET M., AMAT A., AMAYENC P., CAMPISTRON B., LEBERRE P., PASTRE C., TESTUD J., WALDTEUFEL P. (1978), Campagne de mesures "Fronts 77", Compte-rendu des opérations, Note Technique n° 407 de l'EERM, Paris, avril 1978.
- (216) GILLE P., Définition préliminaire d'une station de traitement de télémessure pour l'expérience PICPAB, Document de Travail CRPE/PCE/1023.
- (217) GILLE P., Optimisation d'un programme de restitution du champ magnétique terrestre, Document de Travail CRPE/PCE/1024.
- (218) GILLE P., Projet de nouveaux moyens de dépouillement, Document de Travail CRPE/PCE/1025.
- (219) GILLE P., Définition d'un centre de dépouillement spécialisé, Document de Travail CRPE/PCE/1026.
- (220) GILLE P., Protocole de fonctionnement de l'ORAS (Opérateur Rapide d'Analyse Spectrale) 1ère édition, Document de Travail CRPE/PCE/1033.

- (221) GILLE P., Programme de champ magnétique pour Spacelab, Document de Travail CRPE/PCE/1036.
- (222) GILLE P., Evolution des projets de nouveaux moyens de dépouillement, Document de Travail CRPE/PCE/1037.
- (223) GUIRAUD D., Etude préliminaire d'un microprocesseur de conduite et prétraitement d'expériences, Document de Travail CRPE/PCE/1020.
- (224) GUIRAUD D., Etude d'un microprocesseur de conduite et prétraitement d'expériences, Document de Travail CRPE/PCE/1029.
- (225) HAMELIN M., Contribution à l'étude des ondes électrostatiques et électromagnétiques au voisinage de la fréquence hybride basse dans le plasma ionosphérique, Note Technique CRPE/PCE/61.
- (226) KARCZEWSKI J.F. et F. SENE, Mesure du champ magnétique rayonné par un combiné téléphonique, Document de Travail CRPE/PCE/1022.
- (227) MASSIF R. et PHAN TAN KUE, Appareil de mesure pour sondes à plasma électrodynamiques en mode actif et passif, Note Technique CRPE/PCE/52.
- (228) MEYER A., Expérience Baryum GEOS : Antenne et préamplification magnétique, Document de Travail CRPE/ETE/1031.
- (229) PIRRE M., HAMELIN M., SANDERSON T.R. et G.L. WEBB, A method to measure the parallel electric field in the vicinity of satellite by remote sensing using charged particles, Document de Travail CRPE/PCE/1032.
- (230) POMATHIOD L. et D. HENRY, Etude d'un injecteur d'ions hydrogène embarquable sur satellite, 1er et 2ème rapports trimestriels, Contrat DRET 78/1084, 1978, Documents de Travail, CRPE/PCE/1034 et 1035.

- (231) ROUX A., PELLAT R., Coherent generation of the terrestrial kilometric radiation by non-linear beatings between electrostatic waves, Note Technique CRPE/ETE/56.
- (232) Satellite ARCAD 3, Expérience ISOPROBE, Description générale, Edition n° 3, Document de Travail CRPE/PCE/1021.
- (233) STOREY L.R.O. and L. CAIRO, On the boundary layer between a flowing plasma and a magnetic field, I. The conditions for equilibrium, Note Technique CRPE/PCE/63.
- (234) VIDAL-MADJAR D., Les ondes de gravité de moyenne échelle dans la thermosphère : Etude expérimentale et théorie de leur propagation et de leur production par le jet-stream de la tropopause, Note Technique CRPE/ETE/62.

THESES

- (301) BERNARD R., Etude de la variabilité des marées atmosphériques. Mesures par radar météorique et sondeur à diffusion incohérente, Thèse d'Etat, Paris VI, 15 novembre 1978.
- (302) BIGNOLAS J.B., Analyse de surface par spectroscopie Auger, Rapport de stage DEA, juillet 1978.
- (303) BURGAN J.R., Sur des groupes de transformation en physique mathématique. Application aux fluides de l'espace des phases et à la mécanique quantique, Thèse d'Etat, Orléans, février 1978.
- (304) DECREAU P., Technique des diagnostics de plasma spatiaux au moyen d'une sonde quadripolaire haute fréquence, Mémoire d'Ingénieur D.P.E., Paris, 3 novembre 1978.
- (305) EYMARD L., Ondes de gravité dans la couche limite planétaire : étude expérimentale par sondage acoustique, Thèse de Spécialité, Paris VI, 13 mars 1978.
- (306) GUIRAUD D., Etude d'un microprocesseur de conduite et prétraitement d'expériences, Rapport de stage DEA, juillet 1978.
- (307) HAMELIN M., Contribution à l'étude des ondes électrostatiques et électromagnétiques au voisinage de la fréquence hybride basse dans le plasma ionosphérique, Thèse d'Etat, Orléans, juin 1978.
- (308) LE BRETON J.P., Diagnostic d'un plasma de simulation ionosphérique par étude de la dispersion des ondes électroniques longitudinales, Thèse de 3ème cycle, Orléans, 26 septembre 1978.

- (309) VIDAL-MADJAR D., Les ondes de gravité de moyenne échelle dans la thermosphère : étude expérimentale et théorie de leur propagation et de leur production par le jet stream de la tropopause, Thèse d'Etat, Paris VI, 5 octobre 1978.

COMMUNICATIONS A DES COLLOQUES

- (401) AMAYENC P., CHONG M., HAUSER D., ROUX F., TESTUD J., Premiers résultats des radars Doppler du système Ronsard, Communication présentée au Séminaire "LAPETH-ETH", Zurich, Suisse, 19.07.78.
- (402) AMAYENC P., CHONG M., NUTTEN B., REVAH I., TESTUD J., Etude de la convection nuageuse à l'aide d'un système de deux radars Doppler, Communication présentée au Colloque International sur "Le Radar", Paris, 4 - 8 décembre 1978.
- (403) AMAYENC P., HAUSER D., Granulométrie des précipitations et mouvements verticaux de l'air : Premiers résultats obtenus avec les radars Ronsard et perspective, Communication présentée aux Journées Franco-Africaines de "Physique de l'Atmosphère", Campistrous, France, 12 au 14.09.78.
- (404) BAUER P., EISCAT : A tool for the study of the atmosphere from the stratosphere to the exosphere, Communication présentée à la 19ème Assemblée Générale de l'URSI, Helsinki, Finlande, 1978.
- (405) BAUER P., CERISIER J.C., LAVERGNAT J., The possible use of incoherent scatter facilities for non-linear sounding of the ionosphere, Communication présentée à la 19ème Assemblée Générale de l'URSI, Helsinki, Finlande, 1978.
- (406) BEGHIN C., Review lecture : Space plasma physics, Communication présentée à : Summer School Alpbach/Tyrol, ASSA/ESA, août 1978.

- (407) BEGHIN C., Phenomena induced by charge particle beams injected from SPACELAB, Communication présentée à la 5ème Assemblée "EGS", Strasbourg, France, 25 août 1978.
- (408) BEGHIN C., BOSWELL R.W. and D. HENRY, Production of proton auroras by artificial ion beams, Communication présentée à la 5ème Assemblée "EGS", Strasbourg, France, 29 août - 5 sept. 1978.
- (409) BLANC M., Structure and dynamics of the midlatitude ionosphere, Communication présentée à la 19ème Assemblée Générale de l'URSI, Helsinki, Finlande, 1978.
- (410) BOSWELL R., Investigations in plasma physics, telecommunications, magnetospheric and atmospheric science by means of active experiments in space, Communication présentée à : "Manned Space activities", Summer School Alpbach/Tyrol (Austria), ASSA/ESA, 2 - 11 août 1978.
- (411) BOSWELL R.W., E.M. waves generated by an artificial ion beam in the ionosphere, Communication présentée à la 5ème Assemblée "EGS", Strasbourg, France, 29 août - 5 septembre 1978.
- (412) BOSWELL R.W., CARLSON and D. HENRY, Cyclotron drift instability generated by an artificial ion beam in the ionosphere, Communication présentée à la 5ème Assemblée "EGS", Strasbourg, France, 29 août - 5 septembre 1987.
- (413) CAIRO L. and L.R.O. STOREY, Kinetic theory of the boundary layer between a flowing plasma and a magnetic field, Communication présentée à : "International Symposium on Solar-Terrestrial Physics", Innsbruck (Austria), 29 May - 3 June 1978.

- (414) CHANG J.S., BAILLE P., OGRAM G.L. and R.M. HOBSON, Electron collision frequencies in the Ar, He, Ne gases and their relation to the afterglow plasma, Communication présentée à : "4th Europhysics Sectional Conference on Atomic and Molecular Physics of Ionized Gases", (ESCAMPIG), Essen, 18 - 20 septembre 1978.
- (415) CHRISTIANSEN P.J., GOUGH M.P., CORNILLEAU N., ETCHETO J., GENDRIN R., JONES D., UNGSTRUP E., BORG H., RONMARK K., VIGO J.M., Comparisons between GEOS-1 observations of the electron distribution function and electrostatic emissions above the electron gyro-frequency, Communication présentée au 13ème Symposium "ESLAB", Innsbruck, Autriche, 1978.
- (416) CHRISTIANSEN P., GOUGH P., MARTELLI G., BLOCH J.J., CORNILLEAU N., ETCHETO J., GENDRIN R., BEGHIN C., DECREAU P., JONES D., GEOS-1 observations of electrostatic waves and their relationship with plasmas parameters, Communication présentée à : 13th ESLAB Symposium, Innsbruck (Austria), juin 1978.
- (417) CORNILLEAU N., GENDRIN R., Quenching of natural cyclotron instability by large amplitude monochromatic waves propagating in an inhomogeneous medium, Communication présentée à la 19ème Assemblée Générale de l'URSI, Helsinki, Finlande, 1978.
- (418) CORNILLEAU N., GENDRIN R., LEFEUVRE F., PARROT M., GRARD R., JONES D., BAHNSEN A., UNGSTRUP E. and W. GIBBONS, VLF electromagnetic waves observed on-board GEOS-1, Communication présentée à : 13th ESLAB Symposium, Innsbruck (Austria), 5 - 7 June 1978.
- (419) CORNILLEAU N., LOISIER G., GENDRIN R., Computation of wave normal directions of time varying signal - Applications to VLF waves detected on-board spacecraft, Communication présentée à la 19ème Assemblée Générale de l'URSI, Helsinki, Finlande, 1978.

- (420) DECREAU P.M.E., BEGHIN C. and M. PARROT, Electron density and temperature, as measured by the mutual impedance experiment on-board GEOS-1, Communication présentée à : "13th ESLAB Symposium", Innsbruck, juin 1978.
- (421) DECREAU P.M.E., ETCHETO J., KNOTT K., PEDERSEN A., WRENN G.L. and D.T. YOUNG, Multi-experiment determination of plasma density and temperature, Communication présentée à : "13th ESLAB Symposium", Innsbruck (Austria), juin 1978.
- (422) EMERY B.A., Dynamics and radar-derived atomic oxygen densities, Communication présentée au Symposium S.T.P., Innsbruck, 1978.
- (423) ETCHETO J., HARVEY C.C., Preliminary results of the ISEE electron density experiment for bow shock crossing, Communication présentée à la 5ème Assemblée E.G.S., Strasbourg, France, 1978.
- (424) FEIX M., Loi de similitude dans un plasma par la théorie des groupes. Application aux machines à fusion, Communication présentée au "Séminaire turbulence", Bruxelles (Belgique), 3 juillet 1978.
- (425) FEIX M., Equation de Kortweig de Vries. Solution asymptotique en présence d'un gradient de profil de vitesse initiale, Communication présentée à : "RCP 264. Rencontre interdisciplinaire sur les problèmes inverses", Montpellier, 24 - 26 octobre 1978.
- (426) FERAUDY H. de, HAMELIN M., Analysis and theoretical approach of the  $F_Q$  magnetospheric plasma resonances excited by the GEOS spacecraft relaxation sounder, Communication présentée à la 19ème Assemblée Générale de l'URSI, Helsinki, Finlande, 1978.
- (427) FIJALKOW E., Non linear transport equation properties deduced through transformation groups, Communication présentée à : "IX International seminar on non-linear problems in theoretical physics", Jaca (Espagne), 5 - 10 June 1978.

- (428) GENDRIN R., KODERA K., PERRAUT S., ROBERT P., VILLEDARY C. de,  
Polarization characteristics of ULF waves detected onboard  
GEOS-1 : Problems encountered and practical solutions,  
Communication présentée à la 19ème Assemblée Générale de l'URSI,  
Helsinki, Finlande, 1978.
- (429) GENDRIN R., VILLEDARY C. de, Unambiguous determination of fine struc-  
ture in natural magnetospheric emissions, Communication présentée  
à la 19ème Assemblée Générale de l'URSI, Helsinki, Finlande, 1978.
- (430) HAMELIN M., General propagation characteristics of electrostatic waves  
in a magnetoplasma near the  $F_Q$  frequencies (APL.6), Communication  
présentée à la 19ème Assemblée Générale de l'URSI, Helsinki,  
(Finland), juillet - août 1978.
- (431) HENRY D., Technological problems to be solved for on-board spacecraft  
electron and ion accelerators, Communication présentée à :  
"Manned space activities Summer School", Alpbach/Tyrol (Austria),  
ASSA/ESA, 2 - 11 août 1978.
- (432) HIGEL B., Directivity measurements of the  $f_{pe}$ ,  $nf_{ce}$  and  $f_{qn}$  plasma  
resonances observed by GEOS-1 in the magnetosphere, Communication  
présentée à la 19ème Assemblée Générale de l'URSI, Helsinki,  
Finlande, 1978.
- (433) JENTSCH V., SOLOMON J., Stationary solutions for particle distributions  
in the magnetosphere in the presence of wave particle interactions,  
Communication présentée à la 21ème Assemblée Plénière du COSPAR  
et Symposia Associés, Symposium "Experiments in Interplanetary  
Space and in the Magnetosphere", Innsbruck, Autriche, 1978.
- (434) KLAPISZ C., WEILL A., Wind profile in the morning interpretation of  
SODAR measurement, Communication présentée au "Atmospheric  
Acoustic Workshop", Denver, USA, 1978.

- (435) KODERA K., GENDRIN R., VILLEDARY C. de, Complex representation of a polarized signal : Application to the analysis of ULF waves, Communication présentée à la 19ème Assemblée Générale de l'URSI, Helsinki, Finlande, 1978.
- (436) KODERA K., GENDRIN R., VILLEDARY C. de, Frequency-time analysis of small BT value signals, Communication présentée à la 19ème Assemblée Générale de l'URSI, Helsinki, Finlande, 1978.
- (437) KODERA K., GENDRIN R., VILLEDARY C. de, The modified moving window method : a precise way of determining the frequency-time characteristics of varying signals, Communication présentée à la 19ème Assemblée Générale de l'URSI, Helsinki, Finlande, 1978.
- (438) LEFEUVRE F. and C. DELANNOY, Analysis of a random electromagnetic wave field by a maximum entropy method, Communication présentée à la 19ème Assemblée Générale de l'URSI, Helsinki, (Finland), 31 July - 9 August 1978.
- (439) LEFEUVRE F. and M. PARROT, The use of the coherence function for the automatic recognition of chorus and hiss observed by GEOS, Communication présentée à la 19ème Assemblée Générale de l'URSI, Helsinki (Finland), 31 July - 9 August 1978.
- (440) MÖBIUS E., BOSWELL R.W., PIEL A. and D. HENRY, A spacecraft experiment on the critical ionization velocity, Communication présentée à la 5ème Assemblée "EGS", Strasbourg (France), 29 août - 5 septembre 1978.
- (441) PERRAUT S., GENDRIN R., VILLEDARY C. de et alt., French mobile station for recording geophysical data : Description, Initial results of the conjugated campaign in association with GEOS-1, Communication présentée au Symposium sur "Les recherches européennes effectuées par fusées, sondes, ballons et autres moyens connexes, notamment les expériences aux hautes latitudes", Ajaccio, Corse, 24 au 29.04.78.

- (442) PICON O., SOLOMON J., On the effect of charge exchange on wave-particle interactions, Communication présentée à la 21ème Assemblée Plénière du COSPAR et Symposia Associés, Symposium "Experiments in Interplanetary Space and in the Magnetosphere", Innsbruck, Autriche, 1978.
- (443) PIRRE M., Parallel electric fields in the magnetosphere, Communication présentée à : "Manned space activities, Summer School", Alpbach/Tyrol (Austria), ASSA/ESA, 2 - 11 août 1978.
- (444) PIRRE M., HAMELIN M., SANDERSON T.R. and G.L. WEBB, A method to measure the parallel electric field in the vicinity of a satellite by remote sensing using charged particles, Communication présentée à la 5ème Assemblée "EGS", Strasbourg, France, août 1978.
- (445) ROUX A., PELLAT R., Nonlinear wave-particle interaction in an inhomogeneous medium : An interpretation of VLF triggered emissions, Communication présentée à la 19ème Assemblée Générale de l'URSI, Helsinki, Finlande, 1978.
- (446) ROUX A., PELLAT R., A theory of auroral kilometric radiation, Communication présentée à la 19ème Assemblée Générale de l'URSI, Helsinki, Finlande, 1978
- (447) ROUX A., VILLEDARY C. de, GENDRIN R., Ion cyclotron instability in the presence of  $\text{He}^+$  ions ; A heating process for ring current "heavy" ions, Communication présentée à la 19ème Assemblée Générale de l'URSI, Helsinki, Finlande, 1978.
- (448) S 300 Experimenters, Natural electromagnetic and electrostatic noise observed in space on-board GEOS-1, Communication présentée à la 19ème Assemblée Générale de l'URSI, Helsinki (Finland), juillet - août 1978.

- (449) SIMON D., BUJOR M. and J. BARDOLLE, Contribution to the study of the contamination of telephone relay contacts, Communication présentée à : "Ninth International Conference on electric contact phenomena and the twenty-fourth annual Holm conference on electrical contacts", Chicago (USA), 11 - 15 septembre 1978.
- (450) STOREY L.R.O., The magnetopause : A frontier between space and fusion plasma physics, Communication présentée à : "5th Annual Conference of the Plasma Physics Group of the Institute of Physics", St Andrews, Ecosse, 29 - 30 June 1978.
- (451) STOREY L.R.O., Wave normal directions and wave distribution functions, Communication présentée à la 19ème Assemblée Générale de l'URSI, Hèlsinki (Finland), 31 July - 9 August 1978.
- (452) TESTUD J., Le système RONSARD - Moyen de télédétection des mouvements atmosphériques en air clair et nuageux, Communication présentée au cours du cycle de conférences "Mécanique de l'Atmosphère et Energétique Industrielle", Jouy-en-Josas, France, 1978.
- (453) TESTUD J., CHONG M., ROUX F., Les radars RONSARD pour l'étude des phénomènes convectifs : Premiers résultats et perspectives, Communication présentée aux Journées Franco-Africaines de "Physique de l'Atmosphère", Campistrous, France, 12 au 14.09.78.
- (454) VAN GRUNDERBEECK P., Convective plumes observed in the boundary layer by means of acoustic, Communication présentée au "Atmosphere Acoustic Workshop", Denver, USA, 1978.
- (455) VIDAL-MADJAR D., Medium scale gravity waves and their interaction with the mean atmosphere : a numerical study, Communication présentée au Symposium S.T.P., Innsbruck, 1978.

- (456) VILA P., FAYNOT J.M., DUBOIN M.L., BAUER P., Ionospheric solar eclipse observations at magnetic conjugate sunrise, Communication présentée à la 21ème Assemblée Plénière du COSPAR et Symposia Associés, Symposium "ASHAY workshop", Innsbruck, Autriche, 1978.
- (457) WEILL A., La couche limite atmosphérique et ses propriétés dispersives, Cycle de conférences "Mécanique de l'atmosphère et énergétique industrielle", Jouy-en-Josas, France, 1978.
- (458) WEILL A., EYMARD L., LEQUERE M.E., KLAPISZ C., BAUDIN F. et al., Investigation of the planetary boundary layer with an acoustic Doppler sounder, Communication présentée au "Atmospheric Acoustic Workshop", Denver, USA, 1978.
- (459) WEILL A., STRAUSS B., VAN GRUNDERBEECK P., KLAPISZ C., Convection and similarity in the free convection atmospheric layer, Communication présentée au Colloque "Euromech 106", Grenoble, France, 06.09.78.
- (460) WEILL A., LE QUERE M.E. and P. VAN GRUNDERBEECK, GOUTORBE J.P., Measurement of vertical velocity variance by means of an acoustic sounder : Communication présentée au Symposium on Meteo. Observations, Denver, Colo. 78.
- (461) FELIX M., Groupes auto-semblables et lois de similitude dans les machines à fusion : Communication présentée au Commissariat à l'Energie Atomique, Grenoble, avril 1978.

**CRPE**  
*Centre de Recherches  
en Physique de l'Environnement  
terrestre et planétaire*

*Avenue de la Recherche scientifique  
45045 ORLEANS CEDEX*

**Département PCE**  
*Physique et Chimie  
de l'Environnement*

*Avenue de la Recherche scientifique  
45045 ORLEANS CEDEX*

**Département ETE**  
*Etudes par Télédétection  
de l'Environnement*

*CNET - 38-40 rue du général Leclerc  
92131 ISSY-LES-MOULINEAUX*