



**HAL**  
open science

## Rapport d'activité CRPE pour l'année 1979

- 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 1979. Note Technique n°84. 1980. hal-02192086

**HAL Id: hal-02192086**

**<https://hal-lara.archives-ouvertes.fr/hal-02192086v1>**

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.

182  
CENTRE NATIONAL D'ETUDES  
DES TELECOMMUNICATIONS

CENTRE NATIONAL DE LA  
RECHERCHE SCIENTIFIQUE

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

(40)  
**CRPE**

**NOTE TECHNIQUE**  
**CRPE / 84**

RAPPORT D'ACTIVITE CRPE  
POUR L'ANNEE 1979



B

CENTRE NATIONAL D'ETUDES  
DES TELECOMMUNICATIONS  
Centre PARIS B

CENTRE NATIONAL DE LA  
RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
Secteur TOAE

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

NOTE TECHNIQUE CRPE/84

**RAPPORT D'ACTIVITE CRPE  
POUR L'ANNEE 1979**

**RPE**

Echelon Issy

3 avenue de la République

92131 ISSY-LES-MOULINEAUX

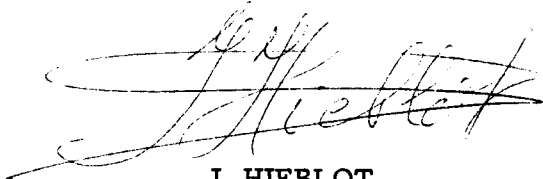
---

**RPE**

Echelon Orléans

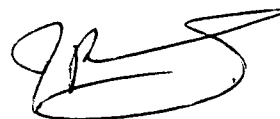
45045 ORLEANS CEDEX

Le Directeur



J. HIEBLOT

Le Directeur Adjoint



I. REVAH

Juin 1980

## TABLE DES MATIERES

<b>I. INTRODUCTION</b>	<b>1</b>
<b>II. TROPOSPHERE ET CONDITIONS LIMITES AU SOL</b>	<b>5</b>
II.1 ECHANGES SOL/ATMOSPHERE ET COUCHE LIMITE DE SURFACE	5
II.2 DYNAMIQUE DE LA COUCHE LIMITE ATMOSPHERIQUE	6
II.2.1 La couche limite hivernale	6
II.2.2 La couche limite convective	6
II.3 DYNAMIQUE DE LA CONVECTION NUAGEUSE ET DES PRECIPITATIONS	7
II.3.1 Etude dynamique d'un écoulement convectif	8
II.3.2 Etude de la granulométrie des hydrométéores précipitants	8
II.3.3 Ecoulement de l'air dans des systèmes frontaux	9
<b>III. PROPAGATION DES ONDES ELECTROMAGNETIQUES DANS L'ATMOSPHERE TERRESTRE</b>	<b>11</b>
III.1 OBJECTIFS	11
III.2 PRINCIPAUX RESULTATS OBTENUS	11
III.2.1 Propagation en air clair	11
III.2.2 Propagation en présence d'hydrométéores	12
III.3 COLLABORATIONS	13
<b>IV. ETUDE DE LA MOYENNE ATMOSPHERE DYNAMIQUE ET COMPOSITION</b>	<b>17</b>
IV.1 DYNAMIQUE	17
IV.1.1 Ondes planétaires et circulation générale	17
IV.1.2 Marées atmosphériques	17

IV.1.3 Ondes de gravité	17
IV.1.4 Turbulence	19
IV.2 COMPOSITION	19
V. CHIMIE ATMOSPHERIQUE ET ASTROCHIMIE	25
VI. ELECTRODYNAMIQUE DE L'ATMOSPHERE IONISEE	27
VI.1 LA DYNAMO IONOSPHERIQUE : VARIATIONS REGULIERES EN BASSES ET MOYENNES LATITUDES	29
VI.1.1 Champ électrique en région F	29
VI.1.2 Champ électrique et fréquences de collision en région E	31
VI.1.3 Courants électriques en région E	31
VI.1.4 Conductivités ionosphériques	31
VI.1.5 Dynamique de l'ionosphère équatoriale	33
VI.2 LA DYNAMO VENT SOLAIRE/MAGNETOSPHERE	33
VI.2.1 Etudes théoriques sur la convection magnétosphérique	33
VI.2.2 Etude expérimentale de la convection en zone aurorale	35
VI.2.3 Convection magnétosphérique au voisinage de la plasmopause	37
VI.2.4 Effets de la convection magnétosphérique en moyennes latitudes	41
VII. RAYONNEMENT ELECTROMAGNETIQUE TERRESTRE	43
VII.1 ECHANGES ENTRE L'IONOSPHERE ET LA MAGNETOSPHERE	46
VII.2 FLUX OU COURANTS ALIGNES	49
VII.3 TURBULENCE ASSOCIEE AUX FRONTIERES MAGNETOSPHERIQUES	51
VII.4 RECHERCHES SUR LES SIGNAUX D'ORIGINE ARTIFICIELLE (POLLUTION ET COMPATIBILITE ELECTROMAGNETIQUES)	53
VII.5 PROGRES EN MATIERE D'ANALYSE DES CHAMPS D'ONDES	55

VII.5.1	Mise en routine des méthodes d'analyse de la polarisation	55
VII.5.2	Détermination de la direction des normales d'ondes	55
VII.5.3	Etude des propriétés des signaux à structure variable dans le temps	57
<b>VIII.</b>	<b>RESONANCE DES PLASMAS</b>	<b>59</b>
VIII.1	MAGNETOSPHERE	63
VIII.2	COUPLAGE IONOSPHERE-MAGNETOSPHERE	64
VIII.2.1	Expérience "PORCUPINE"	64
VIII.2.2	Caractérisation du plasma ionosphérique et des champs électrostatiques à bord du satellite ARCAD 3	65
VIII.2.3	Expérience "SUBSTORM GEOS"	73
VIII.3	METROLOGIE DES PLASMAS SPATIAUX	73
VIII.4	TRAITEMENT DU SIGNAL	75
VIII.4.1	Précision de la mesure des paramètres d'un plasma	75
VIII.4.2	Reconnaissance automatique des résonances de l'expérience sondeur ISEE A	76
VIII.5	PHYSIQUE DES RESONANCES	77
VIII.5.1	Ondes électrostatiques dans un magnétoplasma Maxwellien	77
VIII.5.2	Etude des ondes cyclotron harmoniques électroniques électrostatiques	77
VIII.5.3	Interprétation des signaux résonants aux $f_{qn}$ observés par les sondeurs à relaxation embarqués sur GEOS 1 et 2	78
VIII.5.4	Résonance oblique basse	79
<b>IX.</b>	<b>PHYSIQUE THEORIQUE ET MODELISATION</b>	<b>81</b>
IX.1	PHYSIQUE DES PLASMAS	81
IX.1.1	Simulation sur ordinateurs des plasmas fortement corrélés	81
IX.1.2	Confinement magnétique d'un écoulement de plasma	82
IX.1.3	Champs parallèles, simulation numérique des doubles couches	82

IX.2	THEORIE DES GROUPES ET PHYSIQUE NON-LINEAIRE	84
IX.2.1	Oscillateur anharmonique	84
IX.2.2	Equation de la chaleur non-linéaire	84
IX.2.3	Analyse des Equations de Vlasov Einstein en Géométrie Sphérique	85
IX.2.4	Oscillateur Harmonique Quantique Multidimensionnel avec Fréquences Dépendantes du Temps	85
IX.2.5	Equation de Schroedinger : Puits de Potentiel dont la longueur varie avec le temps	86
IX.3	STRUCTURE ET SIMULATION DES AUTOCOMMUTATEURS - RESEAUX DE CONNEXION	86
X.	<b>EXPERIENCES ACTIVES</b>	89
X.1	EXPERIENCE PICPAB (Phenomena Induced by charged Particle Beams)	89
X.2	INTERACTION PARAMETRIQUE PAR RADAR	94
X.3	EXPERIENCE BA-GEOS	94
X.4	INJECTION D'ONDES TBF A PARTIR DU SOL ET DETECTION A BORD DE GEOS	95
X.5	THEORIE DE L'ABSORPTION INDUITE PAR LE PASSAGE D'UNE ONDE MONOCHROMATIQUE DE FORTE AMPLITUDE DANS LA MAGNETO- SPHERE	95
X.6	ETUDE DES ACCELERATEURS D'IONS	95
XI.	<b>ASTRONOMIE DES CORPS METEORIQUES</b>	97
XII.	<b>ETUDES DIVERSES - QUELQUES REALISATIONS TECHNIQUES</b>	99
XII.1	CHARGE UTILE DE SATELLITE DE TELECOMMUNICATIONS	99
XII.2	CARACTERISATION DES SURFACES PAR MICROSCOPIE AUGER ET MICROSCOPIE ELECTRONIQUE A MIROIR	99
XII.3	COMPRESSION DE DONNEES	100
	<b>BIBLIOGRAPHIE</b>	107 à 131

## L INTRODUCTION

Le CRPE est un laboratoire commun au CNET et au CNRS, aussi son évolution récente l'a amené à couvrir une proportion plus grande des disciplines où ses deux organismes tuteurs ont des intérêts communs.

La diversité des tâches du laboratoire apparaîtra particulièrement à la lecture des chapitres II, III, IX et XII de ce rapport d'activité ; il me paraît opportun de signaler plus particulièrement ces tâches qui, à la différence des autres, ne relèvent pas de la géophysique externe et, du point de vue du Comité National de la Recherche Scientifique, ne dépendent pas de la section 7 (Astronomie et Environnement Planétaire).

Ce sont :

- L'étude de la troposphère et des conditions limites au sol que J. TESTUD traite au chapitre II et qui s'est, depuis plusieurs années, bien implantée au CRPE et relève de la section 16.
- La propagation des ondes électromagnétiques dans l'atmosphère terrestre que traite également J. TESTUD au chapitre III et qui fait l'objet de moyens nouveaux au CRPE venant, tant d'autres équipes du laboratoire que d'horizons divers du CNET lors de sa récente réorganisation. Ces objectifs dépendent, au CNRS, du secteur des Sciences physiques pour l'ingénieur et relèvent des sections 2 ou 3 du Comité National qui devra statuer à cet égard.
- La structure et la simulation des autocommutateurs et les réseaux de connexion que M. FEIX traite dans la troisième partie du chapitre IX, c'est une reconversion partielle de son équipe que la Section 2 du Comité National a récemment entérinée.
- La caractérisation des surfaces qui relève de la section 3 du Comité National, les études de charges utiles de satellites et de compression de données que décrit M. AUGER au chapitre XII et qui répondent à des besoins précis du CNET.



Est-ce à dire que cette diversité risque de faire "éclater" le CRPE, je ne le crois pas : les techniques utilisées (traitement du signal, modélisation, gestion de données) unissent étroitement les équipes tandis que le rôle que doit remplir le CRPE entre le CNET et le CNRS est bien compris des chercheurs.

L'évolution qui a eu lieu ces dernières années aboutit à un équilibre de la jeune composante physique de l'atmosphère et propagation, elle a élargi l'horizon des équipes techniques jusque là limitées aux grands programmes de la géophysique externe, laissant des moissons abondantes de données aux magnétosphériciens.

Ce mouvement se poursuivra : le lancement d'ARCAD 3 en 1981 libèrera un potentiel technique et procurera une nouvelle abondance de données aux spécialistes de l'ionosphère et de la magnétosphère. Ultérieurement, de nouveaux programmes internationaux se dessinant, nous nous y engagerons de manière modérée, pour garder le contact avec les techniques de pointe développées à l'étranger et surtout pour poursuivre les études de géophysique externe qui ont valu au CRPE sa réputation internationale.

Dans quelques mois les essais d'EISCAT débiteront, c'est pour une période d'une dizaine d'années, l'annonce d'un flux constant de données sur les zones de hautes latitudes où se porte désormais l'intérêt de beaucoup de géophysiciens.

Il m'est agréable de constater que dans ce contexte, somme toute favorable aux plus anciennes disciplines du CRPE, des chercheurs et des techniciens ont su diversifier le laboratoire, comme je le signalais au début de ce propos, vers des objectifs sous-tendant une politique de recherche pour les télécommunications.

Je remercie ceux qui ont rédigé ce rapport et qui n'ont pas été cités plus haut : MM. BEGHIN, BERTIN, BLANC, BURKE, DELCOURT, FEIX, GENDRIN et POTTELETTE et bien entendu tous ceux, administratifs, techniciens et chercheurs qui ont produit les résultats relatés ci-après.

J. HIEBLOT

## II. TROPOSPHERE ET CONDITIONS LIMITES AU SOL

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

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

Ce domaine n'a été abordé que très récemment au CRPE. L'objectif est l'application de méthodes de télédétection à l'étude de l'interaction sol/couche de surface atmosphérique. On s'intéresse en particulier à la mise au point d'une méthode de détermination du flux au sol de chaleur latente à échelle régionale qui s'appuie sur la télédétection de l'humidité du sol par des mesures en hyperfréquence active et radiométrie infrarouge. La première qualification expérimentale de la méthode sera fournie par des mesures sur le site couche limite de Voves, l'appareillage étant suspendu au sommet d'un mât. L'équipement sera ultérieurement embarqué sur avion, et pourra fournir dès lors des mesures de flux à l'échelle régionale. On envisage à plus long terme une expérience embarquée sur satellite.

Parallèlement le groupe s'est occupé de problèmes de traitement de données de télédétection, et en particulier de données obtenues par un radar à ouverture synthétique (S.A.R.). Un résultat significatif a consisté en la découverte d'un algorithme permettant le calcul direct de la transformée de Fourier à 2 dimensions de l'image radar, à partir des données brutes fournies par le satellite (Voir § XI.3).

## II.2 DYNAMIQUE DE LA COUCHE LIMITE ATMOSPHERIQUE

L'activité du CRPE dans ce domaine repose sur des moyens techniques éprouvés : les sondeurs acoustiques à effet Doppler (ou sodar Doppler), opérationnels depuis 1974. L'exploitation scientifique de ces appareils est le fait d'une équipe de 6 chercheurs qui a déjà acquis et publié de nombreux résultats sur la physique de la C.L.A., et dont la compétence dans le domaine est internationalement reconnue.

En 1979 les contributions scientifiques les plus marquantes ont concerné :

### II.2.1 La couche limite hivernale

La couche limite hivernale donne l'opportunité d'étudier des couches non convectives dans lesquelles la turbulence est produite par instabilité dynamique. Au cours d'une expérience conduite en 79, plusieurs systèmes d'ondes ont été observés dans les basses couches et la contribution d'un mât instrumenté doit permettre d'entreprendre assez précisément l'étude de la "formation" des ondes associées aux niveaux critiques : problème fondamental en dynamique de l'atmosphère et qui s'applique aussi bien aux ondes de résonance à grande échelle. Remarquons qu'en hiver les inversions sont de bas niveau, si bien que le mât de 100 mètres permet d'associer aux mesures des paramètres ondulatoires, des critères d'instabilité dynamique ayant un sens réel contrairement aux autres saisons pour lesquelles les altitudes d'inversion sont beaucoup trop élevées pour que l'on puisse mesurer correctement les paramètres de stabilité.

Les conditions de brouillards fréquents ont donné des éléments pour pouvoir tester la réponse de l'atmosphère au rayonnement, en particulier une constatation intéressante a été effectuée : lors du passage brouillard-air clair, les structures convectives organisées se forment dans des intervalles de temps courts (inférieurs à cinq minutes). Ce phénomène avait déjà été étudié de façon fragmentaire à l'étranger lors d'éclipses totales de soleil (245).

### II.2.2 La couche limite convective (159, 333, 227)

Deux aspects spécifiques ont été examinés :

- la mise en évidence du flux de chaleur élémentaire transporté par un thermique en utilisant les mesures de vitesse verticale sodar (541). C'est l'objet d'une thèse de 3ème cycle dans laquelle on a utilisé pour la circonstance la technique de l'échantillonnage conditionnel (245, 246, 247).
- la production d'ondes par intrusion convective dans la couche d'inversion. Ce phénomène est intéressant dans la mesure où il traduit un échappement d'énergie au sommet de la C.L.A.. On a pu montrer que l'excitation d'ondes par les mouvements convectifs s'effectuait non pas à l'échelle de thermiques individuels, mais à celles de structures convectives organisées à échelle supérieure (ou "grosses structures" (119)).

C'est le problème de la couche limite hétérogène qui sera abordé au cours des prochaines années. L'équipe "couche limite" s'en est donné les moyens techniques en commandant au département "Techniques Sol" (T.E.S.) la réalisation d'un deuxième sodar triple Doppler d'une part, et d'un micro-sodar destiné à l'exploration de la couche de surface d'autre part. Par ailleurs elle a acquis l'expérience de l'utilisation des radars Doppler "Ronsard" pour observer en air clair (au moyen de traceurs artificiels) le champ des vitesses tridimensionnelles associé aux "grosses structures" convectives de la C.L.A. (données de la campagne Landes 79 associant Sodar et Radars Ronsard).

A terme le potentiel expérimental du CRPE devrait permettre de conduire une expérience pour étudier la C.L.A. à méso-échelle associant un réseau de sodars, les radars Ronsard, le micro-sodar, et les mesures de flux à l'échelle régionale citées en II.1.

Dès septembre prochain une expérience ayant pour thème la couche limite hétérogène aura lieu sur le site de Voves. Elle associera, entre autres, le réseau de Sodars du C.R.P.E., un sondeur simplifié, et les premières mesures de radiométrie infrarouge/hyperfréquence active effectuées par télédétection.

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

Pour aborder ce thème d'étude, le CRPE dispose d'un système de deux radars météorologiques Doppler (le système "Ronsard") de performances comparables aux meilleurs systèmes développés aux Etats-Unis. Le système est opérationnel depuis

fin 1977. S'agissant d'un appareillage lourd et complexe, sa maintenance, son exploitation opérationnelle, le traitement de ses données, ne peuvent être résolus, qu'au terme d'une étroite collaboration entre les équipes scientifique (7 personnes) technique (5 personnes) et mini-informatique (3 personnes) concernées. Le travail de ces équipes au cours des années 78 et 79 a abouti à la mise au point d'une part d'une méthodologie de maniement opérationnel (145, 146, 321, 322, 323, 324), et d'autre part, d'une méthodologie de traitement de données. Ceci a impliqué, de la part des équipes technique et scientifique, la réalisation de modifications techniques (par exemple modification de machines numériques câblées), et la correction ou la refonte de système informatique qui assure la gestion en temps réel du système. Parallèlement, un effort très important a été consenti par l'équipe scientifique qui a su mettre en oeuvre des techniques numériques inédites et est parvenu à une maîtrise parfaite du traitement de données.

Bien que les tâches de mise au point de la méthodologie du traitement de données aient été très prenantes, l'équipe scientifique a pu cependant obtenir un certain nombre de résultats en physique des nuages.

### II.3.1 Etude dynamique d'un écoulement convectif

On a effectué une étude détaillée de la structure tridimensionnelle du champ de vitesses à l'intérieur d'une cellule convective se développant dans un écoulement présentant un fort cisaillement. Une méthode d'analyse du champ de vitesses a été mise au point, qui permet de diagnostiquer l'importance respective des forces de pression, de flottabilité et de charge en eau dans la définition de l'écoulement convectif. L'interaction mouvement convectif vertical/cisaillement de vent horizontal a été clairement mise en évidence comme mécanisme de production des gradients de pression horizontaux à l'intérieur de la cellule (535).

### II.3.2. Etude de la granulométrie des hydrométéores précipitants

On a développé une méthodologie d'utilisation des radars Doppler en tir vertical permettant d'atteindre une mesure de la granulométrie des hydrométéores précipitants et de la vitesse verticale de l'air au zénith du radar. Le travail a en particulier permis de proposer une approche originale dans le cas où l'on peut admettre que la distribution dimensionnelle des particules précipitantes est de forme exponentielle. Des résultats ont été obtenus dans deux stations météorologiques différentes

(précipitation stratiforme à l'avant d'un front chaud et convection isolée). Ils ont pu être interprétés en liaison avec les structures thermodynamiques et hygrométriques du milieu qui régissent les mécanismes de croissance des précipitations. Cette étude a également permis d'établir un ensemble de relations liant la réflectivité radar et les paramètres globaux (taux précipitant, teneur en eau précipitante) et/ou les paramètres caractérisant la forme des distributions. La variabilité généralement observée dans ce type de relations a pu être expliquée par une argumentation théorique appropriée (519).

### II.3.3. Ecoulement de l'air dans des systèmes frontaux

Des études de l'écoulement de l'air à diverses échelles à l'intérieur d'un front froid (331, 539) et d'un front chaud ont été menées à bien. Elles ont mis en évidence des mouvements de petite échelle ( $L \sim 5$  à 10 km) interprétables comme la manifestation d'instabilités du cisaillement de vitesse horizontale à l'intérieur des zones frontales.

L'activité de l'équipe au cours des deux prochaines années répondra à trois préoccupations.

- Assurer le succès de l'expérience COPT 81 (Expérience d'étude de la convection tropicale en Côte d'Ivoire, menée en collaboration avec le LMD, L'EERM, l'ONERA, le LAMP, l'OPG et l'Université d'Abidjan).
- Ne pas négliger l'étude des systèmes frontaux pour lesquels une grande masse de données a déjà été acquise au cours de campagnes antérieures.
- Evaluer l'impact de mesures radar dans les basses couches en air clair (en utilisant des traceurs artificiels) pour des études de couche limite hétérogène.

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

#### III.1 OBJECTIFS

L'objectif des études entreprises est d'expliquer, à partir de la structure fine des phénomènes physiques qui se manifestent dans la troposphère, les perturbations qui affectent les liaisons radioélectriques fonctionnant en hyperfréquence sur les trajets en visibilité et sur les trajets Terre-Satellite.

Ces phénomènes peuvent être classés en :

- phénomènes se manifestant en air clair (propagation par trajets multiples, focalisation et défocalisation des ondes radioélectriques par réflexion ou réfraction de l'énergie émise).
- phénomènes en présence d'hydrométéores (atténuation et dépolarisation des ondes dues à la pluie, la neige, la grêle, les cristaux de glace à très haute altitude, ...).

Les phénomènes en air clair concernent essentiellement les liaisons terrestres, alors que les perturbations en présence d'hydrométéores affectent les liaisons terrestres et les liaisons obliques.

Les études entreprises associent les mesures effectuées sur des liaisons hertziennes (mesures de champ) uniquement en ce qui concerne les trajets terrestres, mesures de champs, de phases et de polarisations dans le cas des trajets obliques) et les données obtenues à l'aide de sondeurs acoustiques (phénomènes en air clair) et de radars météorologiques (phénomènes en présence d'hydrométéores).

#### III.2 PRINCIPAUX RESULTATS OBTENUS

##### III.2.1 Propagation en air clair

La campagne de novembre et décembre 1978, associant un sodar situé à Voves et les liaisons hertziennes à 4,1 et 6,2 GHz fonctionnant entre Viabon et

Sermaise, a permis de caractériser qualitativement un certain nombre de configurations de la couche d'inversion correspondant à des types donnés de perturbations de la liaison hertzienne.

Cette campagne a montré qu'il était nécessaire de disposer, en plus de l'enregistrement fac-similé, d'un enregistrement magnétique permanent afin de traiter quantitativement les données fournies par le sodar.

Les résultats obtenus feront l'objet d'une communication au Symposium International de la Commission F de l'U.R.S.I. (Lennoxville - 26-30 mai 1980).

La campagne entreprise aux mois de mai et juin 1979 associant un sodar situé à Pontoise et des liaisons hertziennes à 6 et 11 GHz entre Meudon et Bois-de-Molle a permis de mettre au point et de tester en temps réel un système d'acquisition de données sodar fonctionnant en permanence et protégé contre les micro-coupures. L'analyse qualitative des données confirme les observations faites à Voves.

Le programme de traitement quantitatif des données est en cours d'élaboration.

Le même type de mesures a été effectué du 23.07.1979 au 19.09.1979 dans la région des Landes, le sodar étant situé sensiblement au milieu des liaisons hertziennes Guillos-Maillas (48 km) fonctionnant à 4,09, 7, 18 et 11,6 GHz. Des mesures de température, d'humidité et de pression étaient effectuées en permanence au voisinage du sodar à l'aide d'un mât instrumenté de 110 mètres et d'un ballon captif. L'expérience est en cours de dépouillement.

### III.2.2 Propagation en présence d'hydrométéores

Au cours des mois d'avril et mai 1979, un des radars RONSARD installé à Trappes a mesuré les réflectivités des précipitations le long du faisceau émis par le satellite OTS et capté à la station spatiale de Gometz-la-Ville.

Nous avons pu établir une relation du type  $A = aZ^b$  liant l'affaiblissement du signal radioélectrique reçu à la station et la réflectivité  $Z$  des précipitations présentes sur le faisceau. Les constantes  $a$  et  $b$  que nous avons déterminées ne sont valables que pour des situations convectives.



De juin 1979 à fin septembre 1979 des mesures du champ électrique atmosphérique ont été entreprises à la station de Gometz-la-Ville afin d'établir l'existence d'éventuelles corrélations avec les atténuations et les dépolarisations des signaux radioélectriques émis par le satellite.

Les résultats obtenus montrent que l'atténuation augmente lorsque l'intensité du champ électrique atmosphérique croît.

Ces résultats feront l'objet de communications au 26<sup>ème</sup> Symposium de l'AGARD "propagation effects in space/earth paths" (Londres, 12-16 mai 80) et au Symposium International de la Commission F de l'URSI (Lennoxville, 26-30 mai 1980).

### III.3 COLLABORATIONS

- avec les départements APH, EFT et DAS du CNET ;
- avec la Direction des Télécommunications du Réseau National ;
- avec l'ONERA.

#### IV. ETUDE DE LA MOYENNE ATMOSPHERE DYNAMIQUE ET COMPOSITION

On sait que le seul bilan radiatif ne peut rendre compte des températures observées dans l'atmosphère moyenne. L'hypothèse d'un apport d'énergie par des processus dynamiques est nécessaire pour expliquer les observations.

Dans le système couplé Atmosphère-Ionosphère les sources d'énergie sont essentiellement localisées dans la troposphère-stratosphère des basses et moyennes latitudes ainsi que dans l'ionosphère des zones aurorales. La redistribution en latitude et altitude de cette énergie s'effectue soit par l'établissement de cellules de circulation générale, soit par le canal d'un vaste système d'ondes (ondes planétaires, marées atmosphériques, ondes de gravité, ondes acoustiques).

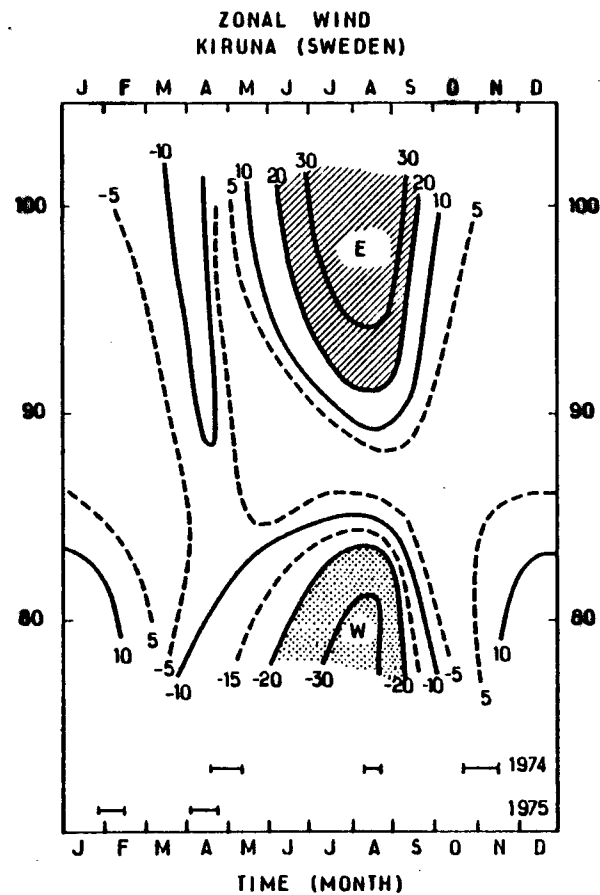
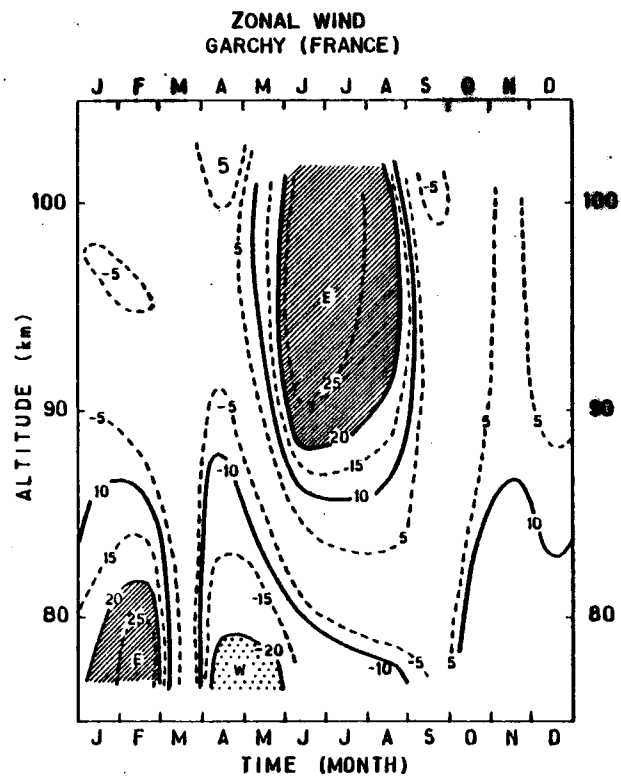
L'estimation de l'énergie transmise par les ondes et la mise en évidence des niveaux d'interactions avec la circulation générale est indispensable à la connaissance de la physico-chimie de l'atmosphère moyenne.

Dans ces conditions, la nécessaire description morphologique du spectre des ondes atmosphériques doit déboucher sur une modélisation de ses différentes composantes et de leurs interactions.

C'est cette voie qui est suivie par le groupe Moyenne Atmosphère du CRPE qui travaille autour de 2 instruments : le radar météorique et le sondeur à diffusion incohérente.

Ces deux approches se complètent en effet mutuellement :

- Les études de la dynamique de la région 80 - 110 km faites à partir des radars météoriques peuvent être étendues vers le haut grâce aux données fournies par le sondeur à diffusion au-dessus de 100 km.
- Les études de composition (détection des ions négatifs et des agrégats dans la mésosphère) que le groupe Atmosphère Moyenne du CRPE commence à entreprendre avec le sondeur à diffusion de St-Santin, nécessitent une bonne connaissance de la dynamique de cette région. Les



**Figure IV-1** : Contours du vent zonal moyen à Garchy (47°N) et Kiruna (68°N). Les vitesses (en  $\text{ms}^{-1}$ ) sont comptées positivement vers l'est.

variations de température et de composition induites par les mouvements oscillatoires (marées, ondes planétaires, ondes de gravité) modifient en effet profondément les conditions de formations des ions lourds mésosphériques.

## IV.1 DYNAMIQUE

### IV.1.1 Ondes planétaires et circulation générale

Les implantations successives des radars météoriques du CNET à haute (Kiruna) et moyenne (Garchy, Paray-le-Monial, Monpazier) latitudes ont fourni une riche matière propre à l'étude de la circulation générale dans la moyenne atmosphère (Figure IV-1) et des caractéristiques des ondes planétaires, faisant l'objet d'une publication de synthèse (142). La connaissance des modes de génération et de propagation des ondes planétaires doit aussi bénéficier des données acquises par le radar météorique implanté depuis 1977 à Porto Rico. Les multiples collaborations internationales (URSS, USA, France) ont contribué à préciser la description des phénomènes de grande échelle (132). Citons en particulier la coopération engagée dans le cadre de la RCP 545 avec le Laboratoire d'Aéronomie de Verrières, qui montre l'intérêt considérable de la coordination des mesures optiques et des mesures dynamiques (234).

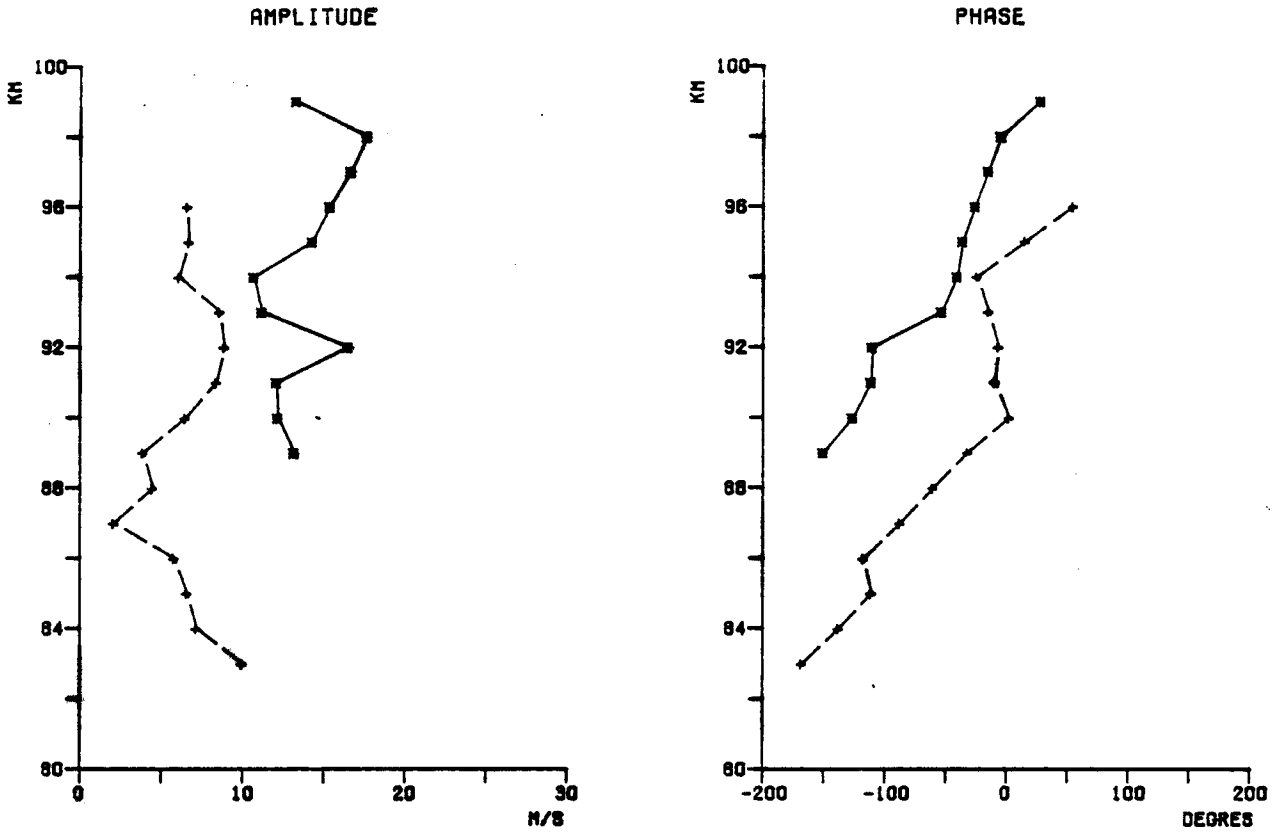
### IV.1.2 Marées atmosphériques

La modélisation, développée à partir des données des radars météoriques de 1970 à 1977, de la source et de la propagation des marées atmosphériques a pu être confrontée avec les données plus récentes obtenues par le radar de Porto Rico. Il en ressort une confirmation pour l'essentiel des résultats du modèle et notamment des hypothèses faites sur la variabilité des marées en fonction de la longitude.

### IV.1.3 Ondes de gravité

Le spectre des ondes de périodes comprises entre 2 h et 8 h a été établi aux différentes stations du radar météorique. Les séries d'observations combinant 2 stations (Figure IV-2) ont été utilisées pour la détermination de leur direction de propagation. La délimitation des régions-sources possibles a été tentée en mettant en

31/10/1975  
ONDE DE PERIODE 5 H 20 MN  
MONPAZIER (\*)  
GARCHY (+)



23/10/1973  
ONDE DE PERIODE 8 HEURES  
GARCHY (\*)  
PARAY-LE-MONIAL (+)

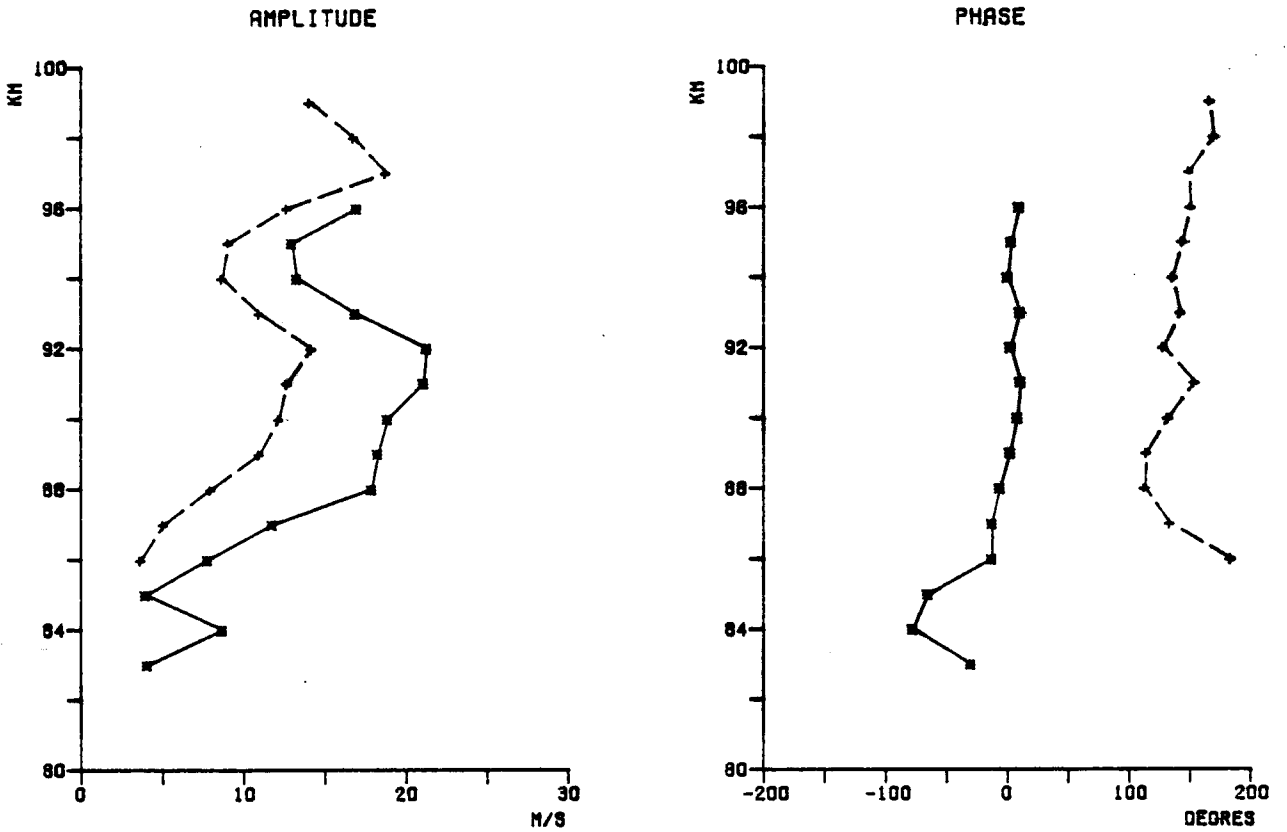


Figure IV-2

oeuvre un calcul de tracé de rayon inverse. L'étude énergétique du spectre dans la bande 2 h - 8 h a fait l'objet d'une première approche. L'ensemble de ce travail a constitué une thèse de doctorat de 3ème cycle (403).

Une étude des ondes de gravité de périodes supérieures à deux heures observées dans la basse thermosphère sur les données de vent et de température du sondeur à diffusion a été entreprise (405). Ces ondes se caractérisent par une faible vitesse de phase, elles sont absorbées par le vent moyen à une altitude de 120 km environ. Une étude de l'interaction onde-vent moyen est donc possible à partir de ces données expérimentales. La figure IV-3 montre la variation en fonction de l'altitude de la longueur d'onde verticale observée.

#### IV.1.4 Turbulence

Jusqu'ici, l'ensemble des mouvements de petite échelle avait échappé au domaine de la dynamique accessible par les mesures des radars météoriques. Quelques expériences antérieures avaient tenté de s'y intéresser, mais sans pouvoir mettre en relation les fluctuations turbulentes avec le champ du vent moyen. L'expérience de radar météorique à 2 émetteurs qui fonctionne depuis mars 79 a d'ores et déjà fait la preuve de sa capacité à combler cette lacune. Dépouillées au fur et à mesure de leur acquisition, les données vérifient la précision relative attendue. La reconstitution des trajectoires météoritiques (calcul des radiants) joue à cet égard un rôle de test. Les premiers résultats présentés notamment sous la forme de fonctions de structure (Figure IV-4) laissent présager une description très élaborée de la turbulence à l'échelle du km, de l'anisotropie du champ turbulent dans la région 80 - 100 km, du taux de transfert d'énergie à la turbulence et de ses variations spatio-temporelles.

#### IV.2 COMPOSITION

La mesure des spectres ioniques et électroniques dans la mésosphère permet une mesure continue de la concentration des ions négatifs dans cette région. Par ailleurs, la variation de la forme des spectres ioniques en fonction de l'altitude permet de définir la limite supérieure de la couche d'agrégats positifs et d'en surveiller les fluctuations. Ces mesures ne prennent tout leur sens que si elles sont couplées avec :

LONGUEUR D'ONDE VERTICALE  
PARAMETRE TEMPERATURE 1/6/78 (PROP. DE LA PHASE VERS LE BAS)

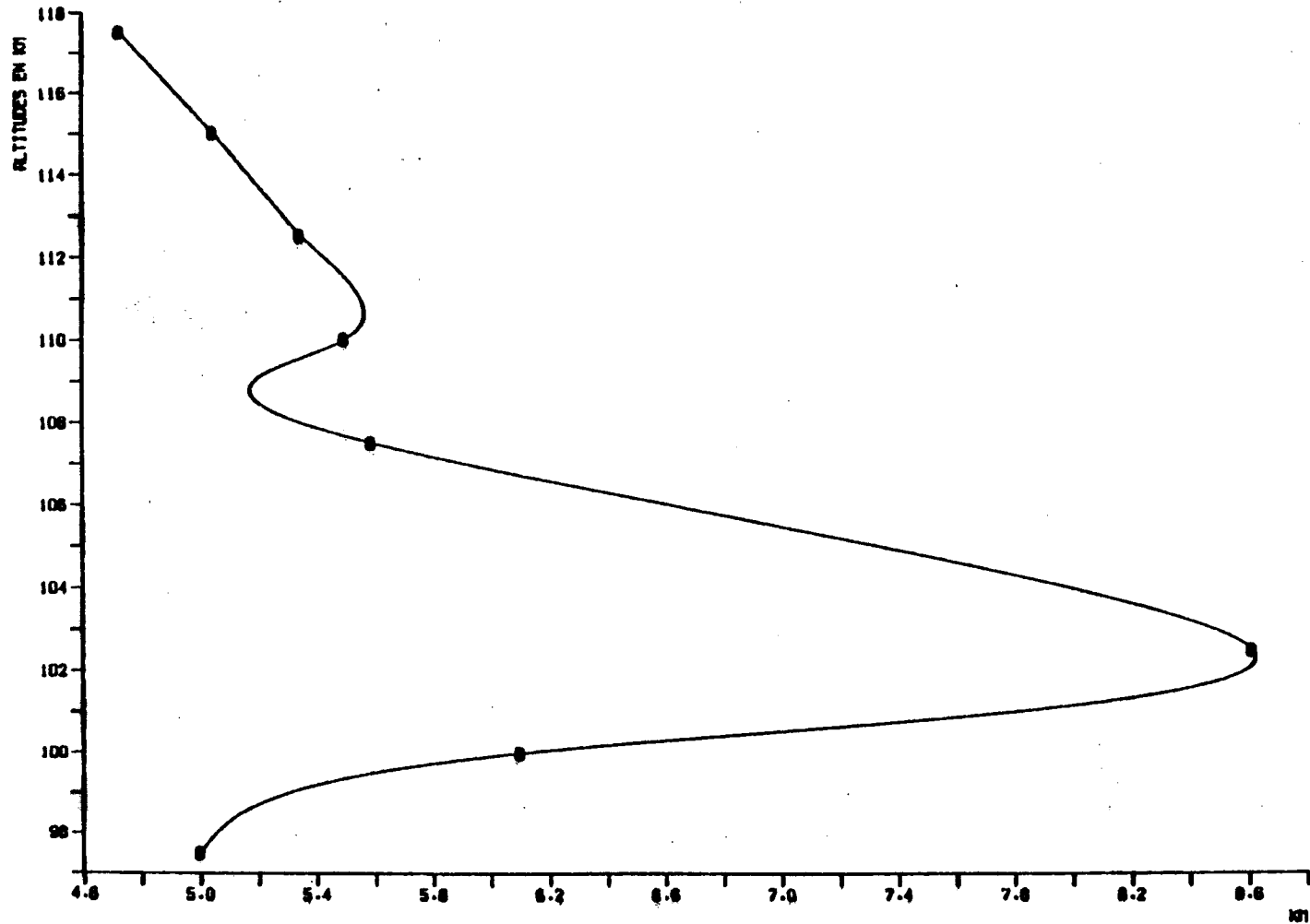


Figure IV-3 : Variation avec l'altitude de la longueur d'onde verticale associée à l'onde de gravité de période 145 minutes mise en évidence à partir des données de température du 1er juin 78 du sondeur à diffusion incohérente de St-Santin dans la basse thermosphère (95-120 km).

FONCTION DE STRUCTURE  
 DES FLUCTUATIONS DE VITESSE RADIALE  
 DU VENT ZONAL  
 NONPAZIER - 03-10/05/1979

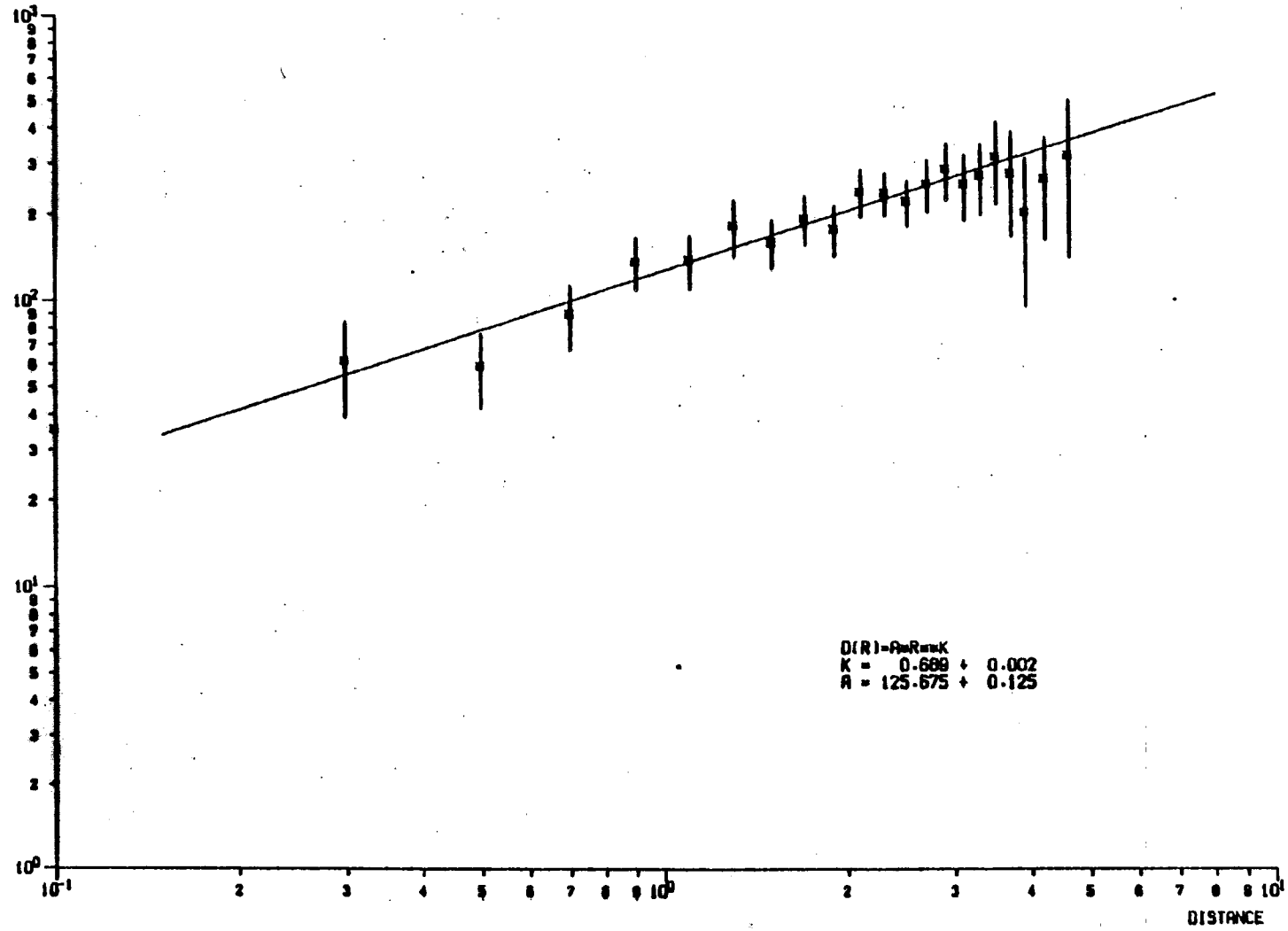


Figure IV-4



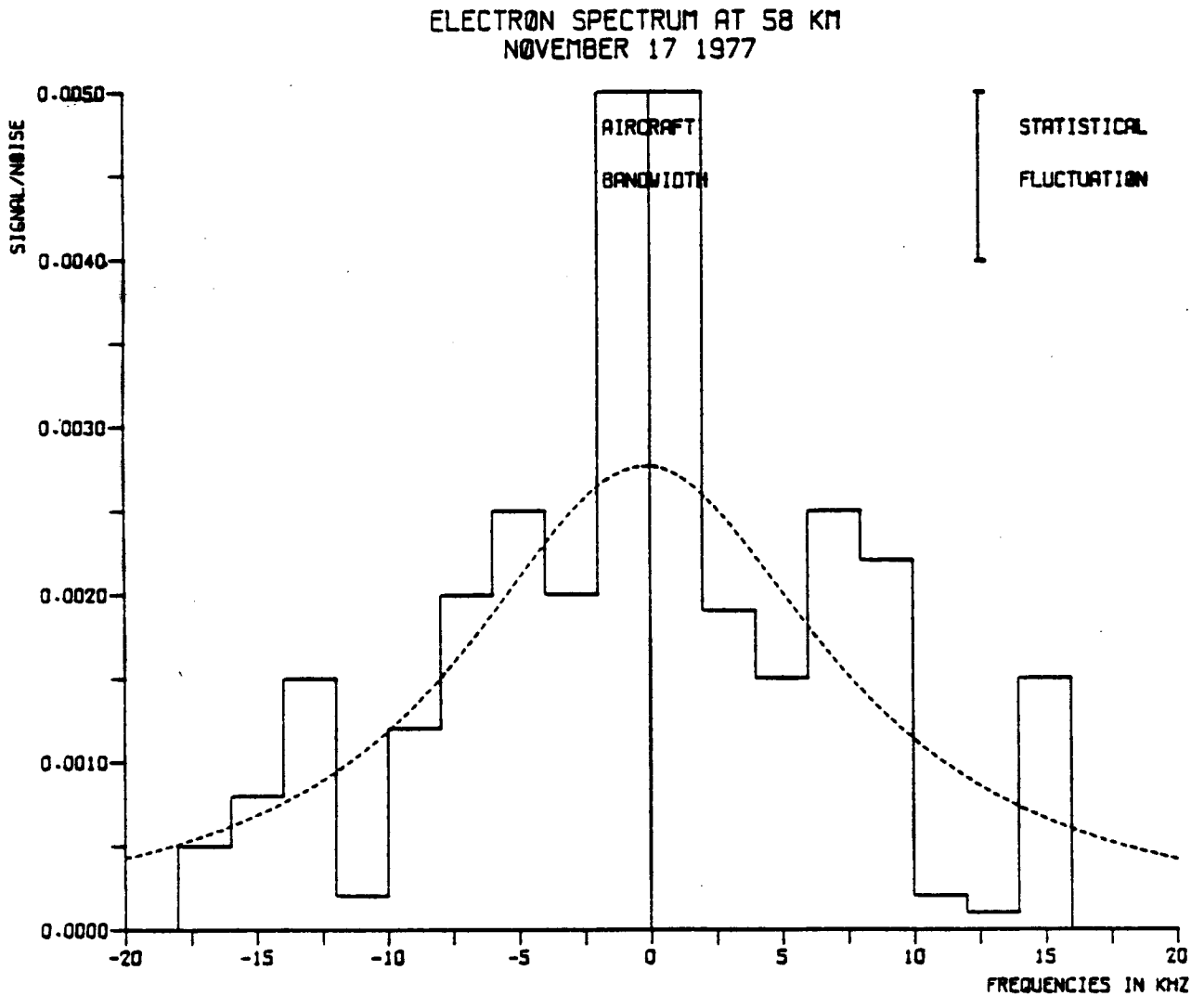


Figure IV-5 : Spectre électronique de diffusion incohérente mesuré à la station de Monpazier à une altitude de 58 km, après une heure d'intégration du signal ionosphérique.

Une régression non linéaire sur la forme théorique du spectre électronique est indiquée en pointillé, après élimination de la partie centrale due aux parasites.

La densité neutre ainsi déduite (proportionnelle à la demi-largeur du spectre) est en bon accord avec les modèles. Par contre, la densité électronique obtenue (proportionnelle à l'intégrale du spectre) est nettement plus élevée que la valeur couramment admise à cette altitude.

- 1) des modèles photochimiques permettant de décrire les processus de génération des ions positifs et négatifs dans la mésosphère. Une collaboration a été développée dans ce sens entre le CRPE et l'Institut d'Aéronomie de Bruxelles (Mrs. G. Kockarts et J. Wissenberg).
- 2) des mesures en Laboratoire des vitesses des réactions photochimiques concernées et de leur variation en fonction de la température. Des expériences de ce type sont réalisées au CRPE (voir chapitre V).
- 3) des expériences optiques simultanées permettant entre autres :
  - une mesure de la température dans la région concernée,
  - une étude de la morphologie des nuages noctiluents dont l'existence semble être liée à la limite supérieure de la couche d'agrégats positifs.

Des expériences communes sont prévues dans le cadre du fonctionnement d'EISCAT en collaboration avec plusieurs laboratoires français et étrangers.

Ces travaux se développent en effet autour de deux pôles :

- Le sondeur à diffusion de St-Santin,
- Le sondeur auroral EISCAT.

Pour mener à bien les études mésosphériques avec le sondeur à diffusion de St-Santin, il est nécessaire d'éliminer de manière efficace les échos parasites (avions, propagation troposphérique) qui perturbent gravement la réception du signal de diffusion incohérent (spectre ionique) en provenance de la région que l'on désire étudier. Un projet de modification du système émission-réception a été établi en 1978. Cette modification sera réalisée en bistatique en 1981. Des mesures préliminaires ont cependant pu être faites avec un système émission-réception fonctionnant en impulsions longues. L'analyse des premiers résultats (Figure IV-5) semble montrer que la puissance et la forme des spectres mesurés ne sont pas toujours conformes à ce que prévoit la théorie. Des études sont en cours, en collaboration avec l'Institut d'Aéronomie de Bruxelles et le CEPHAG de Grenoble pour tenter d'expliquer cette différence.

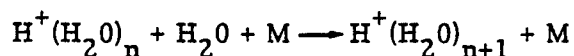
La mise en route du radar incohérent européen EISCAT prévu pour début 1981 permettra également d'obtenir des mesures dans la mésosphère aurorale. La préparation de ces expériences (élaboration des systèmes, du type de fonctionnement du radar, des méthodes de traitement des données) est maintenant en voie d'achèvement.

/

## V. CHIMIE ATMOSPHERIQUE ET ASTROCHIMIE

Un premier thème concerne la cinétique des réactions entre ions et molécules intervenant dans la partie supérieure ( $\geq 50$  km) de la moyenne atmosphère (10 - 100 km). Au-dessus de la mésopause (85 km) les ions observés sont  $\text{NO}^+$  et  $\text{O}_2^+$ , au-dessous de cette altitude  $\text{NO}^+$  et  $\text{O}_2^+$  se transforment en ions agrégats  $\text{H}^+(\text{H}_2\text{O})_n$ . La transformation est liée à la basse température de la mésopause (120 - 200 K), mais elle n'est pas comprise quantitativement. Le laboratoire étudie les réactions en question en écoulement supersonique, qui constitue notre réacteur à basse température.

Les paramètres de la dynamique de l'écoulement, qui déterminent les conditions cinétiques de pression, température, et temps de réaction ont été établis en 1978. Les premières données quantitatives concernant la croissance des ions  $\text{H}^+(\text{H}_2\text{O})_n$  ( $3 \leq n \leq 10$ ), en utilisant  $\text{N}_2$  et  $\text{O}_2$  comme gaz vecteur, à des pressions variant de 0,4 à 0,8 Torr, et à des températures comprises entre 120 et 180 K, ont été obtenues en 1979 (212, 214). Il faut noter qu'avant cette recherche, aucun résultat cinétique n'existait pour une réaction impliquant la molécule de  $\text{H}_2\text{O}$ , en-dessous de 300 K. Il est pourtant surprenant que les données acquises montrent que la croissance des ions  $\text{H}^+(\text{H}_2\text{O})_n$  à basse température se fasse d'une façon aussi différente. Au-dessus de 300 K une réaction d'agrégation :



(M = une molécule du gaz vecteur), est cinétiquement de troisième ou de deuxième ordre, c'est-à-dire, proportionnelle à  $P^1$  ou à  $P^0$  ( $P$  = pression). Nous trouvons qu'entre 120 et 180 K, la cinétique est proportionnelle à  $P^{-1,5}$  ! Ceci indique que la croissance des ions  $\text{H}^+(\text{H}_2\text{O})_n$  est beaucoup plus complexe qu'on ne l'avait soupçonné, et que la cinétique de ces réactions à basse température ne peut être obtenue en extrapolant les données obtenues à plus haute température (212, 214).

Afin de vérifier que ces résultats ne soient pas dus à une incompréhension de la dynamique de l'écoulement (comme c'était le cas entre 1974 et 1977), l'étude de l'agrégation de  $\text{NO}^+$  avec  $\text{N}_2$ ,  $\text{O}_2$  et  $\text{NO}$  a été débutée. Les premiers résultats montrent que la cinétique de ces réactions n'est pas comparable avec la cinétique d'agrégation des ions  $\text{H}^+(\text{H}_2\text{O})_n$ , bien qu'assez différente de la cinétique au-dessus de 300 K.

Un deuxième thème concerne la cinétique des réactions entre ions et molécules ayant un intérêt astrochimique. L'ion  $\text{CH}_3^+$  joue un rôle important dans la chimie des molécules interstellaires, et en 1979 les réactions de  $\text{CH}_3^+$  avec  $\text{NH}_3$  et  $\text{H}_2\text{O}$  ont été étudiées dans un tube à dérive à introduction sélective, dans un domaine d'énergie des ions compris entre 0,04 et 1 eV (158).

L'étude de la réaction  $\text{CH}_3^+ + \text{NH}_3$  a permis de proposer un mécanisme réactionnel complet (213, 241, 242). La cinétique des différentes réactions primaires produit simultanément les ions  $\text{CH}_3\text{NH}_3^+$  par association,  $\text{CH}_2\text{NH}_2^+$  par réarrangement moléculaire,  $\text{NH}_4^+$  par transfert de proton et  $\text{NH}_3^+$  par transfert de charge. La cinétique des réactions secondaires met en jeu les ions produits dans la première étape et l'excès de  $\text{NH}_3$  dans le milieu. L'ion final du mécanisme est  $\text{NH}_4^+$  (213).

L'étude de la réaction  $\text{CH}_3^+ + \text{H}_2\text{O}$ , voie possible de formation de  $\text{CH}_3\text{OH}$  dans le milieu interstellaire, a permis de montrer que cette réaction est typiquement du troisième ordre dans nos conditions de pression et de température, et a permis de souligner l'importance que joue  $\text{H}_2\text{O}$  comme troisième corps. De plus, nous avons pu discuter la cinétique de formation des agglomérats ioniques  $\text{CH}_3^+(\text{H}_2\text{O})_n$  pour  $n < 4$ .

Le troisième thème concerne la composition de l'atmosphère de Vénus. Les résultats obtenus en décembre 1978 par les sondes Pionnier Vénus et Venera 11 et 12 ont été étudiés. La chimie du soufre en-dessous de 25 km reste très intrigante. En octobre 1979, la proposition d'analyser la phase condensée de l'atmosphère de Vénus par un spectromètre de masse embarqué sur la station aérostatique de l'expérience "Vénus 1985" est devenu un projet, et constitue une nouvelle étude pour le laboratoire.



**Figure VI-1** : Vue de l'antenne de réception de Kiruna du sondeur ionosphérique auroral à diffusion incohérente EISCAT. Cet instrument construit en collaboration Européenne permettra de faire une étude fine de l'ionosphère aurorale et de son couplage avec la magnétosphère et l'atmosphère neutre. Il devrait aussi contribuer à une meilleure compréhension de la génération et du fonctionnement des arcs auroraux.

## VI. ELECTRODYNAMIQUE DE L'ATMOSPHERE IONISEE

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

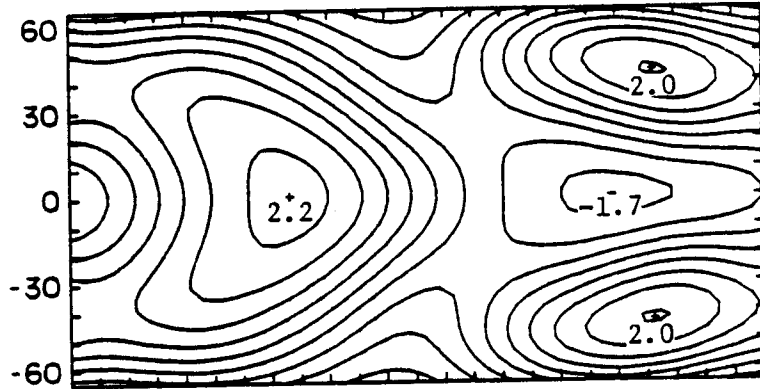
- 1) La dynamo vent-solaire/magnétosphère, qui par l'effet du mouvement relatif des deux plasmas magnétisés que sont le vent solaire et le plasma magnétosphérique, produit une force électromotrice d'une centaine de kilovolts à travers la cavité magnétosphérique. Ses fluctuations temporelles rapides et importantes commandent toute l'histoire de l'activité magnétique dans la cavité.
- 2) La dynamo ionosphérique, qui produit des champs et courants électriques en tout point de l'ionosphère par l'effet du mouvement de l'air neutre à travers les lignes de force géomagnétiques. Son fonctionnement sous l'effet des marées atmosphériques est responsable des variations régulières du mouvement du plasma ionosphérique.

Les expériences mises en oeuvre par le CRPE donnent accès à l'étude des effets de ces deux classes de dynamo. Elles visent à échantillonner toutes les régions-clés du circuit magnétosphérique :

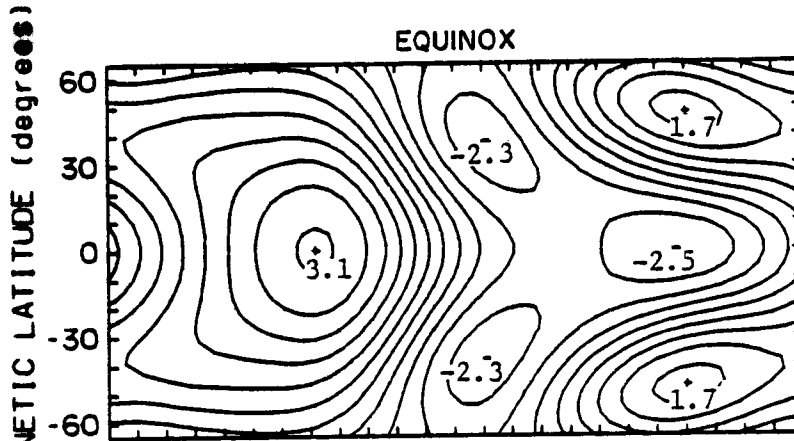
- Le vent solaire, avec ISEE-3
- La magnétopause et les régions frontières de la magnétosphère, avec ISEE-1 et 2.
- L'ionosphère aurorale, avec les programmes de fusées SUBSTORM-GEOS et PORCUPINE, et bientôt le sondeur à diffusion auroral EISCAT (voir figure VI-1) et le satellite polaire ARCAD-3.
- La magnétosphère externe dans ses régions dipolaires, avec le satellite géostationnaire GEOS-2.

UT-AVERAGED PSEUDO-POTENTIAL

SOLSTICE



EQUINOX



YEARLY AVERAGE

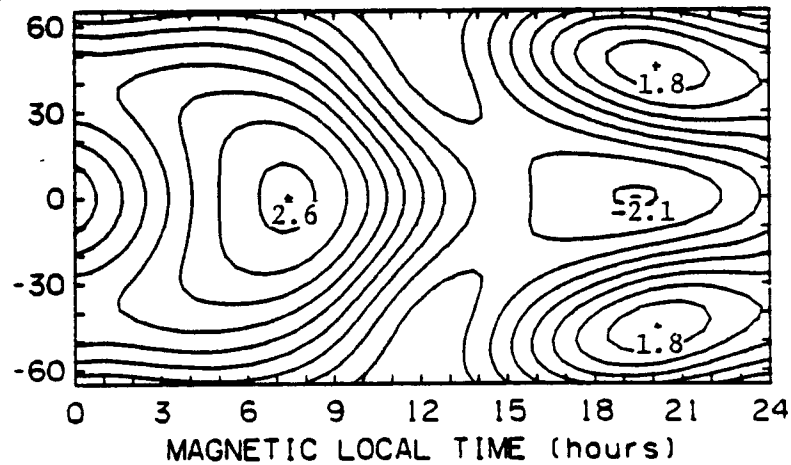


Figure VI-2 : Par une analyse statistique homogène portant sur l'ensemble des données de champ électrique fournies par les radars de Saint-Santin, Millstone Hill, Arecibo, et Jicamarca à diverses latitudes, on a établi un modèle des variations saisonnières du potentiel électrostatique de l'ionosphère prévalant à basses et moyennes latitudes pendant les périodes magnétiquement calmes. La figure présente les cartes globales de ce potentiel correspondant aux solstices, aux équinoxes, et à la moyenne annuelle. Les équipotentielles sont tracées par pas de 500 volts, et les valeurs des extrema sont exprimées en kilovolts.



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

Alors que les efforts en électrodynamique au CRPE s'étaient, dans les dernières années, centrés sur l'ionosphère des moyennes latitudes, l'évolution actuelle vise à développer des compétences nouvelles, afin d'étudier les processus de couplage ionosphère-magnétosphère dont l'ionosphère aurorale et la magnétosphère externe sont les théâtres privilégiés.

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

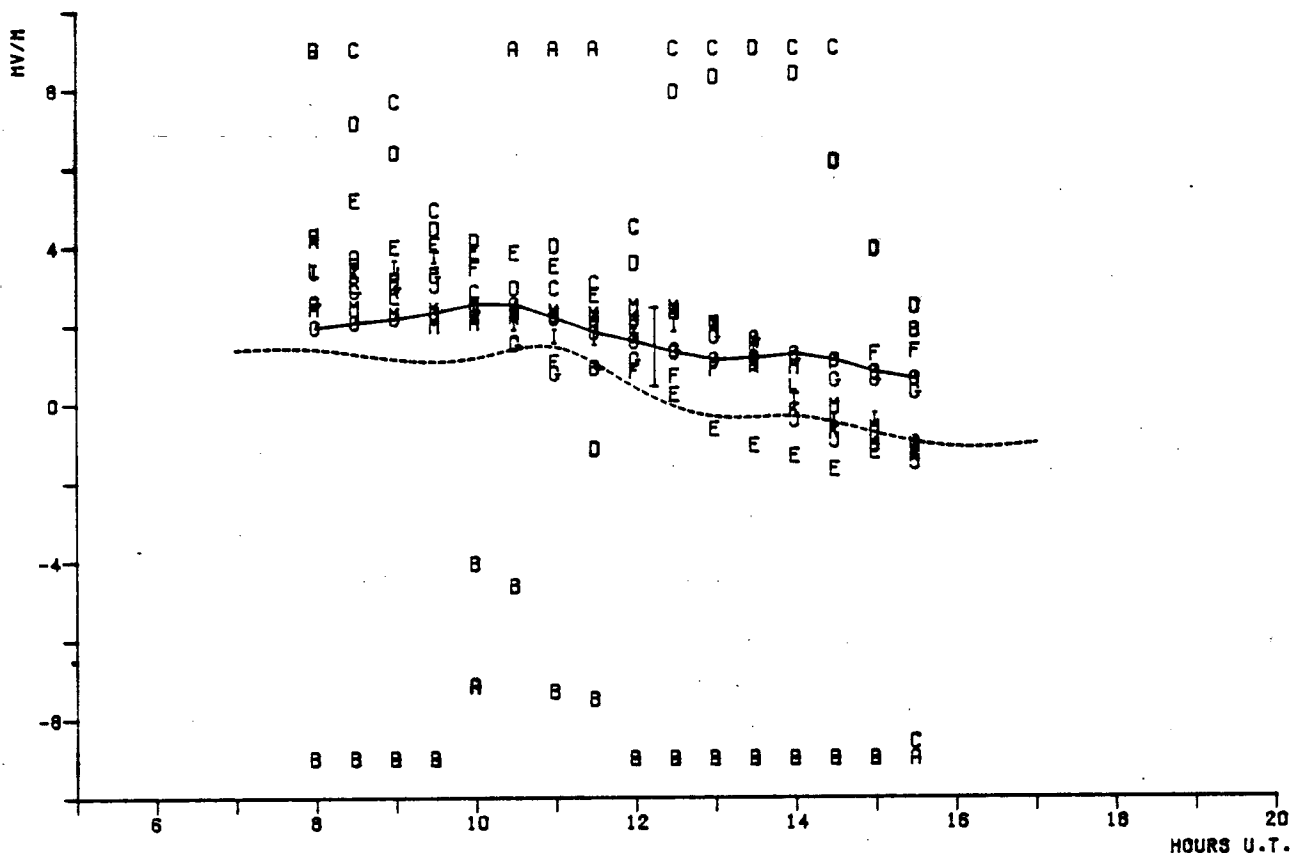
Les variations régulières de chaque paramètre électrodynamique de l'ionosphère (vents neutres, champs, courants et conductivités électriques) ont été étudiées au moyen du sondeur à diffusion de Saint-Santin. La démarche suivie vise à modéliser localement d'abord, puis à l'échelle planétaire, chacun de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

A l'occasion de ce travail, un programme numérique d'interprétation de données de diffusion incohérente en termes de paramètres électrodynamiques a été progressivement constitué. Testé sur les mesures de Saint-Santin, il est prêt à fonctionner sur celles du sondeur auroral EISCAT.

### VI.1.1 Champ électrique en région F

Le modèle de champs électriques des jours calmes à Saint-Santin achevé l'an passé et publié cette année (104) a été étendu à un modèle global, saisonnier du potentiel électrostatique ionosphérique fondé sur les données de l'ensemble des sondeurs à diffusion incohérente (236). Cette étude au sein d'un groupe de travail de l'URSI, a permis d'établir des cartes saisonnières du potentiel électrostatique ionosphérique (figure VI-2). Il a été présenté (236), ainsi qu'une communication de synthèse sur les champs électriques ionosphériques (207), à l'assemblée générale de l'A.I.G.A. à Canberra.

DATE MARCH 24 1979  
 MERIDIONAL COMPONENT OF THE ELECTRIC FIELD  
 ALTITUDES 95.8100.....M150.0200



**Figure VI-3 :** Le sondeur ionosphérique de Saint-Santin permet, à partir de la mesure des trois composantes de la vitesse des ions, de calculer à toute altitude la composante méridionale du champ électrique ionosphérique par résolution de l'équation de mouvement des ions. On voit ici les variations au cours de la journée du 24 mars 1979 de ce champ méridional calculé à différentes altitudes de 95 km (lettre A) à 150 km (lettre M) de 5 en 5 kilomètres. La courbe en trait plein est la mesure de référence effectuée à 200 km en région F. Le champ s'y déduit directement des vitesses sans aucune correction pour les effets du vent neutre. La courbe en pointillé est la moyenne pour tous les jours magnétiquement calmes. A l'exception des points de basse altitude (95 à 110 km) les valeurs calculées en région E se rassemblent bien autour de la mesure de région F. Ces résultats confirment que le champ électrique ne varie pas avec l'altitude dans la couche dynamo ionosphérique, et que l'hypothèse théorique d'équipotentialité des lignes de force magnétique est correcte en moyennes latitudes.

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

Les mesures de vitesses de dérive tridimensionnelles des ions de la région E ont été utilisées pour calculer directement, par résolution de l'équation de mouvement des ions, le champ électrique nord-sud et la fréquence de collision ions-neutres à chaque altitude de mesure. On a pu vérifier (figure VI.3) que les variations en altitude du champ électrique étaient plus faibles que l'incertitude expérimentale de la méthode, ce qui fournit une vérification expérimentale directe de l'équipotentialité des lignes de force magnétiques entre les régions E et F de moyennes latitudes. Les valeurs de fréquences de collision déduites parallèlement des vitesses observées sont en bon accord avec celles déduites du modèle Jacchia d'atmosphère neutre. L'ensemble de cette étude a permis de vérifier que la description théorique de l'électrodynamique de l'ionosphère est cohérente par rapport aux mouvements ioniques observés expérimentalement. L'étude des courants électriques peut ainsi être entreprise sur une base solide.

### VI.1.3 Courants électriques en région E

A partir de mesures des profils de vitesses ioniques à trois composantes, on peut, si le champ électrique est indépendant de l'altitude (voir § précédent), calculer le courant électrique à chaque altitude dans la couche dynamo ionosphérique. La figure VI-4 présente un exemple de profils de courants électriques déduits du sondeur de Saint-Santin à intervalles réguliers d'une demi-heure.

En intégrant ces profils en altitude, on trouve le courant ionosphérique total circulant horizontalement dans l'ionosphère. Pendant les périodes de calme magnétique, ce courant est supposé être responsable de la majeure partie des variations du champ magnétique au sol : une vérification expérimentale directe, fondée sur la comparaison des courants calculés avec les variations observées du champ magnétique, a été entreprise (229).

### VI.1.4 Conductivités ionosphériques

Les profils de concentration électronique et les mesures de fréquences de collision ions-neutres dans la basse ionosphère ont été utilisés pour calculer les conductivités Hall et Pedersen de l'ionosphère. Les variations diurnes résultantes ont été paramétrisées en fonction de l'angle zénithal solaire.

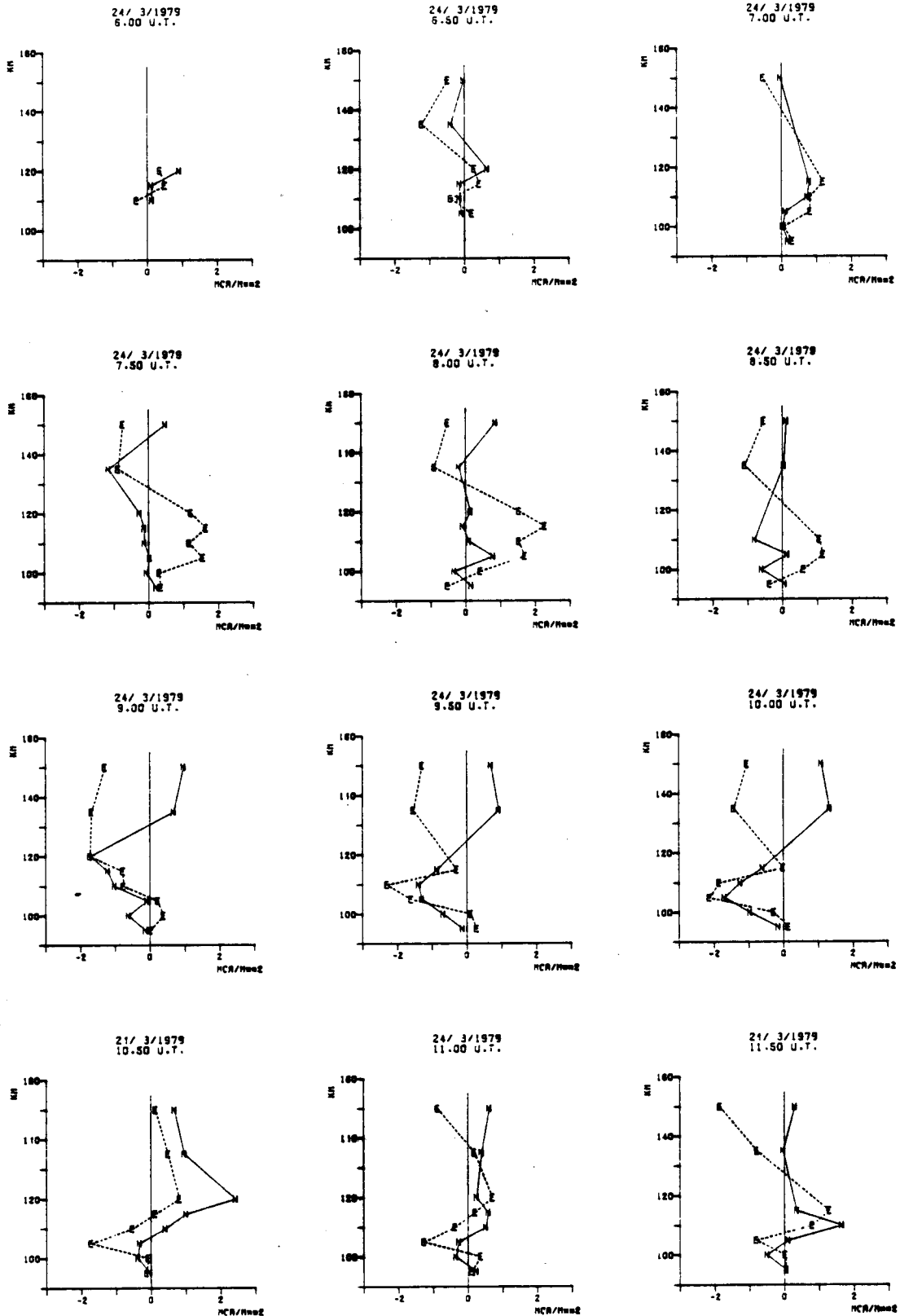


Figure VI-4 : Les mesures de concentration électronique et de vitesse ionique du sondeur de Saint-Santin, réalisées en balayage de 90 à 200 kilomètres d'altitude, permettent également de restituer le profil des courants électriques horizontaux circulant dans la couche dynamo ionosphérique. La figure montre de tels profils de courants (en milliampères par mètre carré) en fonction de l'altitude calculés toutes les 30 minutes pour le 24 mars 1979. Les courants vers l'est sont indiqués par un E, les courants vers le nord par un N. On peut remarquer les fortes variations en temps et en altitude.

### VI.1.5 Dynamique de l'ionosphère équatoriale

Les 28 mois de mesures par ionosonde de Sahr (Tchad) ont permis de mettre en évidence les strates ascendantes de la région F équatoriale (120). Les distributions temporelles de l'occurrence du E sporadique nocturne et du F diffus ont été analysées. On a pu mettre en évidence l'effet des différents modes de marées sur le E sporadique, et une anticorrélation des présences de F diffus et de E sporadique.

La découverte de cette anticorrélation apporte un élément intéressant pour la compréhension des causes et des mécanismes de contrôle de la formation du F diffus équatorial. Il sera présenté au symposium sur l'aéronomie équatoriale (Porto Rico) en 1980.

### VI.2 LA DYNAMO VENT SOLAIRE/MAGNETOSPHERE

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

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

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

#### VI.2.1 Etudes théoriques sur la convection magnétosphérique

Elles ont pour but la compréhension des interactions entre plasmas magnétosphériques et ionosphériques, et de leurs effets sur la distribution du potentiel électrostatique de convection dans les régions dipolaires de la magnétosphère. L'accent

a été mis sur le problème le plus mal décrit actuellement par les modèles théoriques, qui est l'effet des précipitations électroniques aurorales sur la convection. Il a été abordé sous deux aspects :

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

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

- le renforcement des conductivités aurorales par les précipitations, qui crée un gradient latitudinal de conductivité,
- la dissymétrie jour-nuit des conductivités, liée à la photoionisation solaire qui crée des gradients longitudinaux.

Ce travail s'appuie, sur le plan expérimental, sur une étude des conductivités à Saint-Santin et au voisinage de Chatanika, qui doit aboutir à une modélisation globale des conductivités ionosphériques.

L'ensemble constitue la matière d'une thèse de 3ème cycle et a fait l'objet d'une communication à l'EGS (237).

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

On a repris l'idée simple de Kennel (1969) sur l'interaction précipitation-convection d'électrons magnétosphériques et leurs relations à la géométrie de la zone aurorale diffuse, en y incluant les variations en longitude. Ce travail, qui est juste amorcé, doit fournir la matière d'une thèse de 3ème cycle, mais aussi prépare l'inclusion du transport et de la précipitation des électrons magnétosphériques dans le modèle numérique de convection en cours de développement.

### VI.2.2 Etude expérimentale de la convection en zone aurorale

De façon analogue aux études de moyennes latitudes, le CRPE développe des mesures des différentes caractéristiques électrodynamiques du plasma auroral, et des différents effets de l'activité aurorale sur la haute atmosphère neutre.

Des mesures in situ de la résistivité du plasma auroral et des courants d'électrons thermiques ont été réalisées au cours des programmes de tir de fusées SUBSTORM-GEOS et PORCUPINE. Les résultats, qui doivent permettre de qualifier de nouvelles méthodes de mesures, sont discutés dans le chapitre VIII : "Résonance des plasmas".

Une étude expérimentale de la distribution en latitude (60 à 75 degrés) du champ électrique de convection mesuré par les radars à diffusion incohérente de Chatanika (Alaska) et Millstone Hill (Massachusetts) a été entreprise dans le cadre d'une thèse de 3ème cycle (402). Elle doit permettre de tester les différents modèles de champ de convection actuellement disponibles.

L'interaction des phénomènes de précipitation et de convection en zone aurorale avec l'atmosphère neutre est entreprise sur la base de données du radar de Chatanika acquises dans le cadre de coopérations avec le SRII et Utah State University (USA). Les différents programmes de bilan d'énergie de l'ionosphère aurorale sont par ce biais mis au point en vue de l'exploitation du sondeur auroral européen EISCAT. Un programme décrivant l'interaction entre un spectre d'électrons auroraux précipités et l'atmosphère, et calculant le profil de concentration électronique résultant, a permis par inversion du profil de recalculer des spectres énergétiques d'électrons auroraux à partir du profil observé de  $N_e$  (203). Il constitue un outil important d'interprétation des données d'EISCAT. Il en est de même du programme de calcul du dépôt d'énergie par effet Joule et par les électrons précipitants dans la thermosphère aurorale, développé à l'occasion de l'étude de l'orage magnétique d'avril 1978 qui doit se concrétiser par une thèse de 3ème cycle (407, 209).

Enfin, le CRPE participe, en collaboration avec le Service d'Aéronomie, le CERGA et le CESR, à la réalisation de l'interféromètre de Michelson à grand angle. Des contacts ont été pris en Norvège pour son implantation près du site d'EISCAT à Tromsø et l'ensemble du projet a été exposé au cours de la 7ème réunion annuelle sur





les études de la haute atmosphère par des méthodes optiques à l'université de Tromsø en juin 1979 (244).

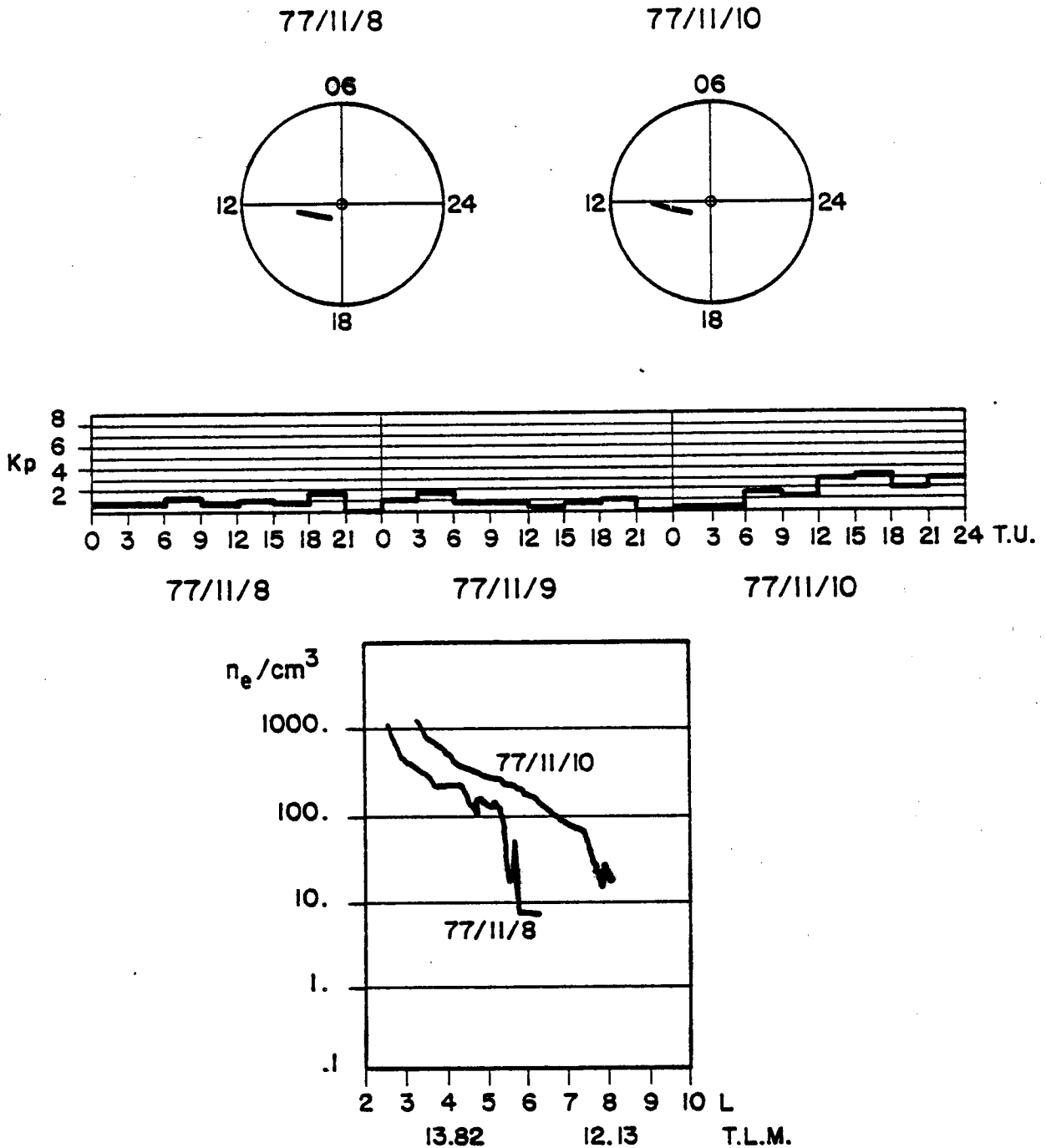
### VI.2.3 Convection magnétosphérique au voisinage de la plasmopause

Les expériences de sondeur à relaxation à bord de GEOS et ISEE, et de sonde à impédance mutuelle à bord de GEOS, fournissent une mesure du champ magnétique (en intensité) et de la concentration et température du plasma froid. Celui-ci, qui est entraîné dans une dérive en  $E \times B$  par le champ électrique magnétosphérique, permet d'en étudier indirectement la morphologie.

A bord de GEOS-2, qui suit l'orbite géostationnaire, on mesure  $N_e$  et  $T_e$  à tous les temps locaux mais pour une seule valeur de la distance géocentrique. La figure VI-5 présente en une représentation polaire deux journées de mesures de  $N_e$  et  $B$ . On voit très clairement la concentration électronique croître du matin vers le soir, et l'entrée du satellite dans la plasmasphère, marquée par une nette augmentation de  $N_e$  entre environ 18 h et 0 h. Les déplacements en temps local de la région soir de la plasmasphère peuvent être suivis d'un jour à l'autre, et reliés aux effets de l'activité magnétique.

A bord de GEOS-1 et ISEE, placés sur des orbites excentriques, on a une vision complémentaire de la précédente, essentiellement en coupe radiale, de la plasmasphère, mais on perd la couverture en temps local. La figure VI-6 montre les variations de densité électronique mesurées le long de deux traversées de la plasmasphère par ISEE, au même temps local proche de midi mais à deux jours d'intervalle. La grande variation du profil de concentration électronique entre ces deux jours est d'autant plus surprenante que l'activité magnétique était à un niveau très faible avant aussi bien qu'entre les deux passages. Ceci témoigne de la complexité, même en période calme, des processus dynamiques contrôlant la géométrie de la plasmasphère.

Afin de pouvoir interpréter les profils de concentration de GEOS-1 et ISEE en termes de champ électrique de convection, un ensemble de programmes interactifs a été mis au point sur PDP-11. Ils permettent de calculer les déplacements du plasma froid sous l'effet de champs électrique et magnétique donnés, et de faire subir ces déplacements à des profils mesurés à un certain temps local pour en déduire des profils



**Figure VI-6 :** Profils équatoriaux de la concentration électronique (par centimètres cube) en fonction du paramètre L mesurés par le sondeur à relaxation du satellite ISEE A pour les orbites des 8 et 11 novembre 1977 (dont la trajectoire est tracée dans les diagrammes du haut). Comme le montrent les valeurs de  $K_p$  présentées dans le diagramme central, il s'agit d'une période de calme magnétique. L'augmentation de la concentration électronique dans ce secteur de midi entre les deux passages peut s'interpréter comme un effet de remplissage des tubes de force magnétiques par la source de plasma froid ionosphérique pendant cette période calme.

. 29 APRIL 1976

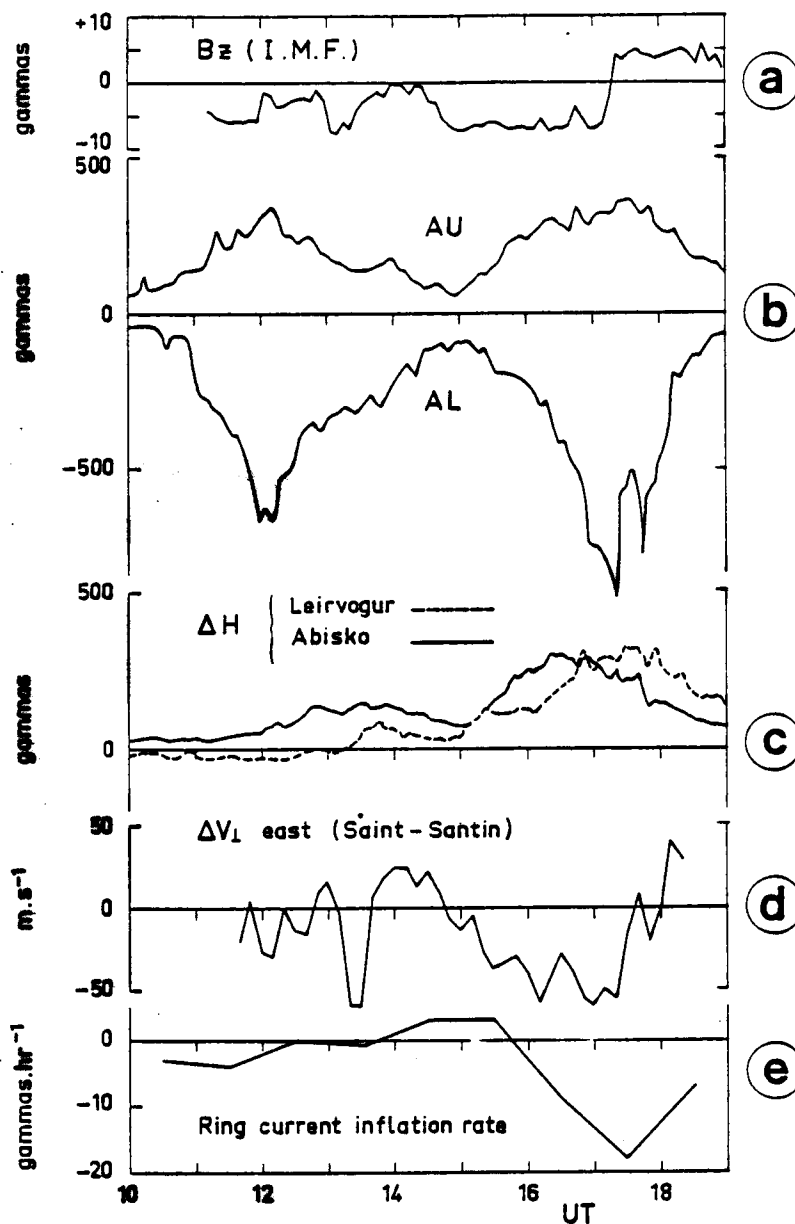


Figure VI-7 : Un exemple de perturbation du champ électrique de moyenne latitude par la dynamo vent solaire/magnétosphère est fourni par la journée du 29 avril 1976. La dérive ionique est-ouest perpendiculaire au champ magnétique (courbe d) a été mesurée à Saint-Santin avec une résolution de dix minutes, et comparée aux variations simultanées de la composante nord-sud du champ interplanétaire mesurée par le satellite IMP-J (courbe a), aux indices d'électrojet AU et AL (courbes b), aux traces magnétiques H des stations aurorales de Leirvogur et Abisko (courbe c) situées de part et d'autre de la longitude de Saint-Santin, et au taux d'inflation du courant annulaire (courbe e) estimé à partir des variations temporelles de l'indice Dst équatorial. Les dérives à Saint-Santin semblent répondre en temps réel au champ interplanétaire. Une variation vers le sud de ce champ produit une variation vers l'ouest des dérives, c'est-à-dire, dans le secteur après-midi, une intensification de la convection du plasma ionosphérique vers le soleil.

à d'autres temps locaux où une autre mesure existe. Cette méthode doit permettre de tester indirectement la validité de différents modèles du champ de convection magnétosphérique, et d'en calculer les paramètres libres (tels que, par exemple, la valeur de la différence de potentiel totale produite par le vent solaire à travers la cavité magnétosphérique). Les résultats de cette étude constituent une thèse de 3ème cycle (503).

#### VI.2.4 Effets de la convection magnétosphérique en moyennes latitudes

La convection magnétosphérique influence, à travers les zones aurorales, les moyennes et basses latitudes de la thermosphère et de l'ionosphère. Les mécanismes responsables sont soit la fermeture des courants auroraux à travers les plus basses latitudes ionosphériques, soit la perturbation de la circulation thermosphérique neutre par les sources de chauffage aurorales. Le sondeur ionosphérique de Saint-Santin, qui mesure simultanément des vents neutres et les champs électriques, est l'instrument idéal pour mettre en évidence et séparer ces divers effets. Ce thème a donné lieu à un effort poursuivi d'analyse de données, et de plus suscité des travaux d'interprétation théorique.

- 1) L'étude expérimentale des perturbations de champ électrique a mis en évidence leurs relations avec le champ magnétique interplanétaire et la formation du courant annulaire, et avec les courants électriques de convection en zone aurorale (mesurés à Chatanika pour le cas de l'orage d'avril 1978). Un exemple est présenté sur la figure VI-7. On a aussi montré que la moyenne des perturbations de dérive en  $E \times B$  était toujours dirigée vers l'ouest à tous les temps locaux : l'activité magnétique provoque un supplément de sous-rotation de la région F de moyenne latitude.
- 2) Une interprétation théorique en a été donnée par l'analyse de deux mécanismes de perturbation du champ électrique :
  - On a calculé la distribution planétaire des champs et courants électriques produits par la fermeture en moyenne latitude des courants auroraux, et montré qu'ils permettent de comprendre la variation en temps local et l'amplitude des effets observés à Saint-Santin.

- On a étudié en détail la "dynamo ionosphérique de perturbation" (508), en calculant les champs électriques induits par l'effet dynamo à moyenne latitude des perturbations de la circulation thermosphérique pendant les orages. Ce mécanisme permet d'expliquer la sous-rotation du plasma de région F précédemment observée.

Une communication de synthèse sur les effets planétaires des orages (208) a été présentée à l'UGGI à Canberra.

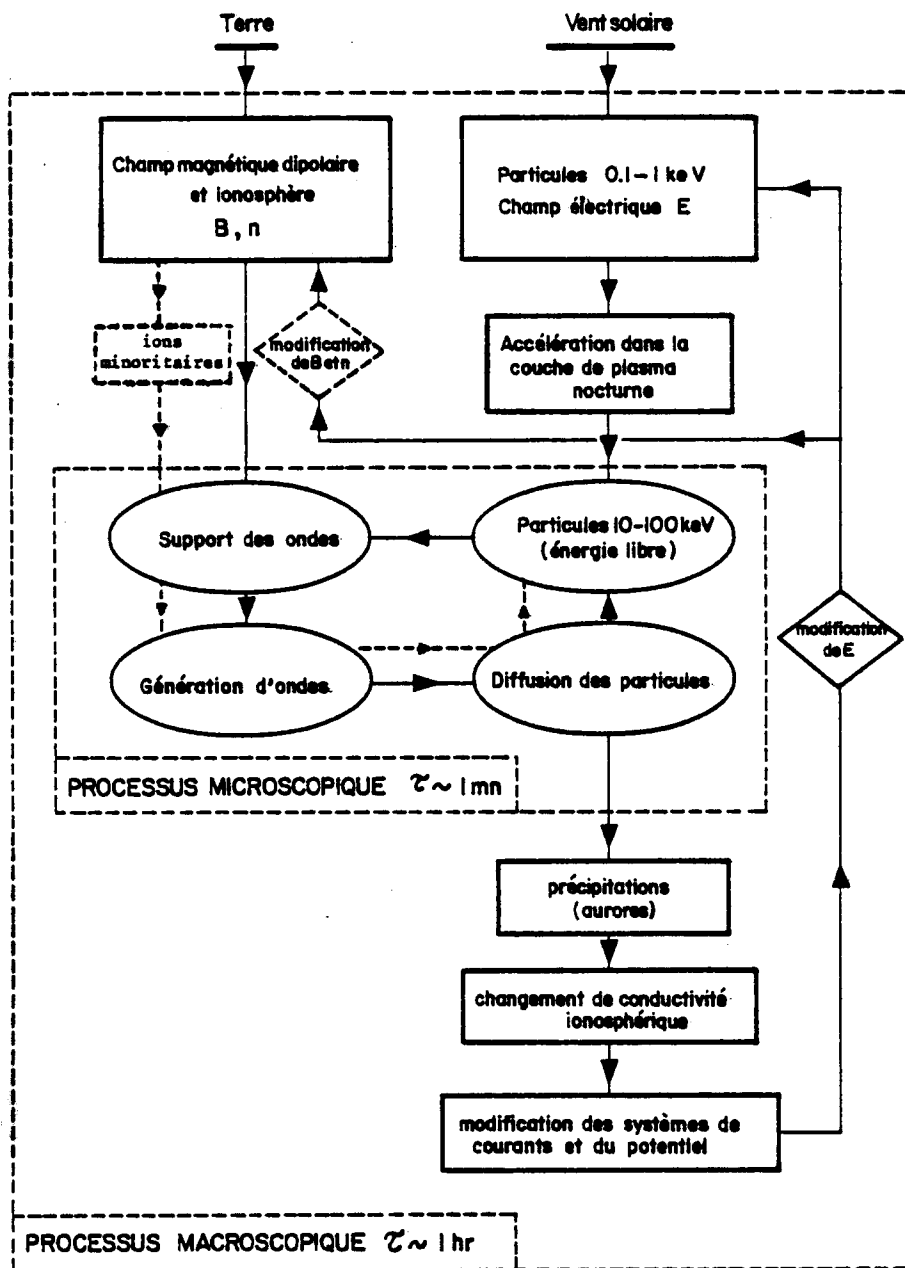
## VII. RAYONNEMENT ELECTROMAGNETIQUE TERRESTRE

Les problèmes fondamentaux -c.a.d. de portée astrophysique- posés par l'étude de l'environnement ionisé circumterrestre concernent la composition, la structure et la dynamique du plasma magnétosphérique, ses interactions avec la haute atmosphère et le champ magnétique terrestres ainsi qu'avec le vent solaire. Au plan expérimental ces études mettent en jeu diverses techniques dont quelques-unes seulement sont mises en oeuvre au CRPE. Mesures directes des champs continus électrique ou magnétique, analyses des composantes de haute ou moyenne énergie des particules chargées sont effectuées dans d'autres laboratoires, le CRPE concentrant ses efforts sur la mesure de la composante thermique du plasma et sur l'analyse des champs d'ondes, électrostatiques ou électromagnétiques, observés dans l'ensemble de la magnétosphère, de l'ionosphère et du vent solaire.

Un chapitre spécial du rapport d'activité (Chapitre VI : Electrodynamique de l'environnement ionisé) est consacré au mouvement d'ensemble du plasma, tel qu'on peut l'étudier grâce aux mesures à distance effectuées au sol à l'aide des grands sondeurs ionosphériques, ou aux mesures in situ effectuées à bord des satellites GEOS et ISEE. Ces dernières mesures s'appuient elles-mêmes sur des techniques de sondage par méthodes "actives", dans lesquelles la physique des résonances de plasma joue un rôle si fondamental, et ouvre de telles possibilités quant aux résultats géophysiques attendus, qu'elles nécessitent également un chapitre particulier (Chapitre VIII : Résonance des plasmas). Nous ne parlons ici que des rayonnements électromagnétique ou électrostatique naturels observés dans l'espace circumterrestre, principalement à l'aide des satellites GEOS et ISEE, mais aussi à l'aide de quelques expériences au sol ou en fusée <sup>(1)</sup>.

Le rayonnement électromagnétique (e.m.) ou électrostatique (e.s.) du plasma, s'il ne transporte en général qu'une faible fraction de l'énergie mise en jeu dans les phénomènes magnétosphériques, joue cependant le rôle de traceur pour ces

(1) Nous ne parlerons pas des travaux expérimentaux poursuivis au département TSD sur la mise au point des sondes magnétiques prévues pour l'étude du rayonnement électromagnétique des planètes (projet GALILEO) ou du vent solaire (projet ISPM).



LES DEUX "EQUILIBRES" AUTO-CONSISTANTS DE LA MAGNETOSPHERE

Figure VII-1 : Les deux équilibres auto-consistants de la magnétosphère.

On montre sur ce schéma la place centrale occupée par les interactions entre ondes et particules (source du rayonnement électromagnétique circum-terrestre) dans la chaîne des processus à plus grande échelle qui commandent la dynamique du système Vent solaire - Magnétosphère - Ionosphère. Dans des conditions relativement régulières, chacune des deux boucles (microscopique et macroscopique) peut conduire à un équilibre quasi-stationnaire en des temps caractéristiques qui sont de l'ordre de la minute pour la première et de l'heure pour la seconde. Les temps caractéristiques pour les processus microscopiques impliquant les protons sont cependant plus longs (10 - 30 mn). On a également représenté sur la figure (tracé tireté) le phénomène, récemment découvert, du rôle joué par les ions mineurs dans les interactions et donc dans les échanges entre ionosphère et magnétosphère.

phénomènes. En effet une onde d'un type donné ne peut être émise que dans des conditions particulières du plasma ambiant (faible densité de plasma thermique par exemple, ou existence de flux alignés avec le champ magnétique terrestre, ou fortes anisotropies, ou inhomogénéités) qui toutes résultent de l'histoire antérieure détaillée de la convection. L'observation d'un certain type d'onde impose donc des contraintes quant aux valeurs des paramètres macroscopiques du plasma qui ne sont pas toujours accessibles simultanément par l'expérience. Par ailleurs le rayonnement (e.m. ou e.s.), par son action en retour sur les particules du plasma, est à l'origine de modifications importantes des caractéristiques à grande échelle de la convection : diffusion des particules, accélération sélective, précipitations, .... (Figure VII-1). Selon la gamme de fréquence, ces modifications affectent l'une ou l'autre des populations de particules constitutives de l'environnement terrestre (électrons, protons, ions lourds,...). En conséquence, une étude détaillée, expérimentale et théorique, de l'origine et des conséquences des rayonnements observés dans toutes les régions de la magnétosphère ou du vent solaire (plan équatorial, zones aurorales, onde de choc), et dans la plus grande gamme possible de fréquence, est indispensable à la compréhension des phénomènes à grande échelle de l'ensemble Terre-Magnétosphère. C'est en gardant présentes à l'esprit ces remarques que les études sur le rayonnement e.m. ou e.s. dans l'espace circumterrestre ont été abordées cette année au CRPE.

De tous les travaux entrepris dans le domaine du rayonnement naturel, nous ne détaillerons que ceux qui ouvrent la voie à des directions de recherche nouvelles, en liaison avec une compréhension plus fine des phénomènes macroscopiques. C'est ainsi que nous décrivons successivement les phénomènes liés aux échanges entre l'ionosphère et la magnétosphère, à la production de flux ou de courants alignés, à la génération et aux effets de la turbulence (e.m. ou e.s.) dans les zones frontières. Un bref paragraphe sera consacré à la recherche de signaux artificiels dans la magnétosphère.<sup>(2)</sup> Enfin, l'étude expérimentale des signaux naturels ou artificiels impliquant la mise en oeuvre de méthodes d'analyse particulières, nous consacrerons à celles-ci le dernier paragraphe de ce chapitre.

(2) Seuls sont abordés ici les signaux artificiels résultants d'expériences non contrôlées (émission des lignes de haute tension, rayonnement parasite des cellules solaires). Les autres cas sont abordés dans le chapitre X : "Expériences actives".



## VII.1 ECHANGES ENTRE L'IONOSPHERE ET LA MAGNETOSPHERE

Les mécanismes de transfert (masse, quantité de mouvement, énergie) entre les deux réservoirs naturels de particules que sont l'ionosphère et la queue magnétosphérique sont au centre des problèmes actuels de la géophysique externe. Champs électriques (parallèles ou perpendiculaires aux lignes de force) et gradients de densité sont à l'origine de ces transferts. Mais ils sont eux-mêmes liés à l'existence d'anisotropies de flux ou d'inhomogénéités de température dans lesquelles les instabilités e.s. ou e.m. jouent un rôle prépondérant.

C'est ainsi que bon nombre de précipitations de particules ont pour origine une diffusion en angle d'attaque induite par des ondes de toute nature. Dans le domaine électrostatique (ondes au voisinage de  $f_{pe}$ , ou de  $(n+1/2) f_{ce}$  <sup>(3)</sup>), on a poursuivi l'étude expérimentale et théorique des conditions de génération de ces ondes et l'on s'aperçoit -comme dans le cas des ondes e.m.- que le rôle du rapport entre densité de plasma froid (d'origine ionosphérique) et densité de plasma chaud (d'origine magnétosphérique) est prépondérant (108, 222). Dans le domaine électromagnétique, une comparaison détaillée du spectre des ondes TBF et de la fonction de distribution des électrons énergétiques (Max Plank Institut, Lindau) a permis de vérifier l'applicabilité de la théorie quasi-linéaire à ce type d'interactions : pas d'émission lorsque l'anisotropie des particules ne dépasse pas une certaine anisotropie critique fonction de la fréquence ; précipitation rapide des particules en cas d'émission (216). De même il semble bien que l'échange de charge entre hydrogène neutre de la très haute atmosphère et protons (phénomène jusqu'à présent négligé dans ce genre de théorie) joue un rôle important dans la diffusion et la précipitation des protons par les ondes e.m. d'ultra-basse fréquence (531).

Mais la découverte la plus caractéristique effectuée cette année dans ce domaine concerne la mise en évidence du rôle joué par l'ion  $He^+$  dans le processus de génération des ondes UBF (223, 248, 249). Cet ion, d'origine ionosphérique (et donc de faible énergie), favorise, lorsqu'il apparaît même en faible concentration ( $\geq 5\%$ ) dans la région équatoriale, l'apparition d'ondes UBF caractéristiques. Ces ondes une fois engendrées (et dont la source d'énergie réside dans les protons énergétiques et anisotropes) réagissent sur les ions  $He^+$  en augmentant leur angle d'attaque et leur

(3)  $f_{pe}$  et  $f_{ce}$  : fréquence de plasma et gyrofréquence électroniques.  $F_{H^+}$  et  $F_{He^+}$  : gyrofréquences des protons et des ions  $He^+$ .  $f_{rhb}$  : fréquence de résonance hybride basse.  $f_{pi}$  : fréquence de plasma ionique.

13 Juillet 1977 . GEOS.1

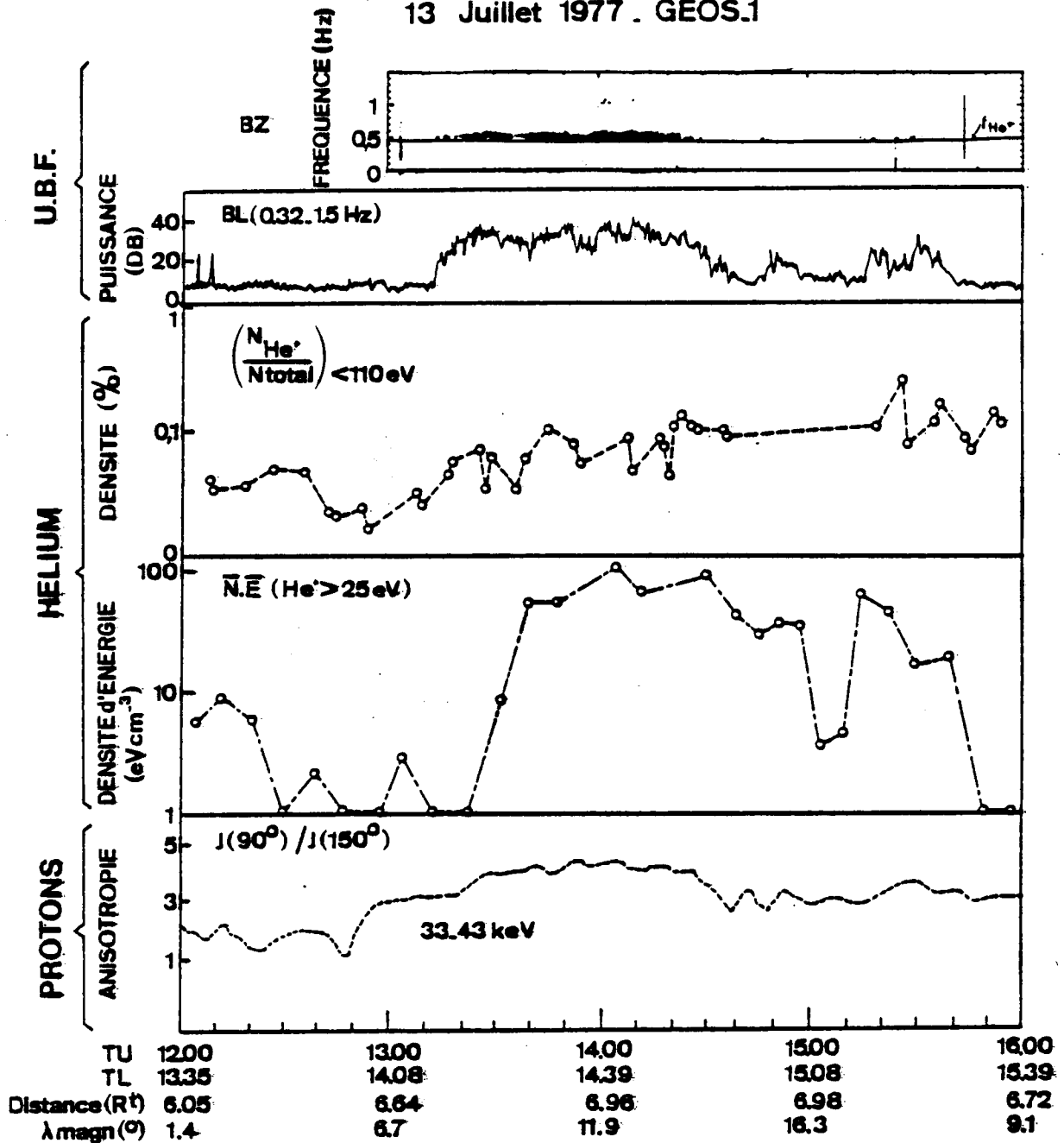


Figure VII-2 : Rôle des ions He<sup>+</sup> dans la génération des ondes UBF observées à bord de GEOS et effet de celles-ci sur le chauffage de ceux-là.

De haut en bas :

- spectre dynamique d'ondes UBF observées au voisinage de la gyrofréquence de l'Hélium ( $F_{He^+}$ )
- puissance intégrée des ondes observées ( $0dB = 10^{-5} \gamma^2$ )
- concentration des ions He<sup>+</sup> thermiques
- densité d'énergie des ions He<sup>+</sup> suprathermiques (E représente l'énergie moyenne et N la densité)
- anisotropie des protons de haute énergie, mesurée par le rapport des flux à 90° et à 150° du champ magnétique continu.

Lorsque l'anisotropie des protons chauds (30-40 keV) est suffisamment forte ( $\geq 2$ ) et lorsque la concentration en ions He<sup>+</sup> est suffisamment grande ( $\geq 5\%$ ), les ondes UBF apparaissent. Ces ondes réagissent sur les ions He<sup>+</sup> en augmentant leur angle d'attaque (non représenté ici) et leur énergie moyenne. Les ions He<sup>+</sup> d'origine ionosphérique peuvent, par ce procédé, être piégés dans les régions équatoriales de la magnétosphère et acquérir des énergies importantes ( $\sim 1$  keV). Le phénomène se ramène à un échange d'énergie non collisionnel entre protons chauds et Hélium froid, par l'intermédiaire des ondes UBF.

Travail effectué en coopération avec les chercheurs de l'Université de Berne et du Max-Planck Institut für Aeronomie de Lindau (248).

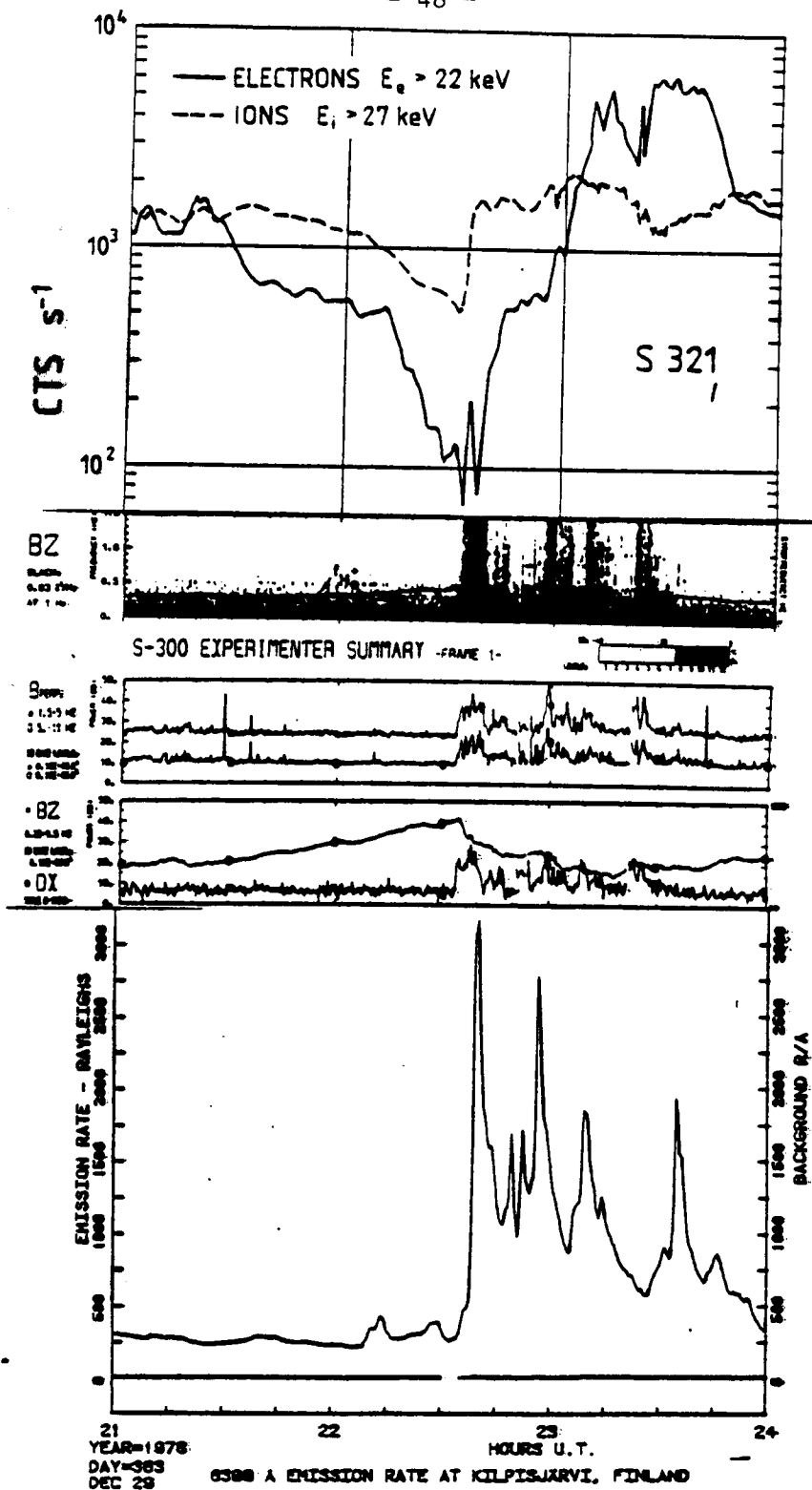


Figure VII-3 : Ondes UBF mesurées dans le plan équatorial associées à des déplacements rapides des zones de précipitation aurorales.

Le panneau du bas correspond à des mesures effectuées au sol à l'aide d'un photomètre à champ réduit. On y remarque les émissions optiques intenses associées à la phase active d'un sous-orage. Chaque pic correspond au passage d'un arc dans le champ de l'appareil. Les images de caméra à grand champ (non représentées ici) montrent que ces passages correspondent à des déplacements rapides, vers le Nord, de la zone de précipitation.

Les 3 panneaux du milieu sont relatifs au champ des ondes UBF reçues simultanément à bord de GEOS. On note que chaque pic optique détecté au sol est associé à une impulsion électromagnétique de type SIP (Short Irregular Pulsation).

Le panneau du haut représente la variation du flux des particules de moyenne énergie détectées à bord de GEOS durant le sous-orage. Noter la variation importante du flux des électrons (2 ordres de grandeur).

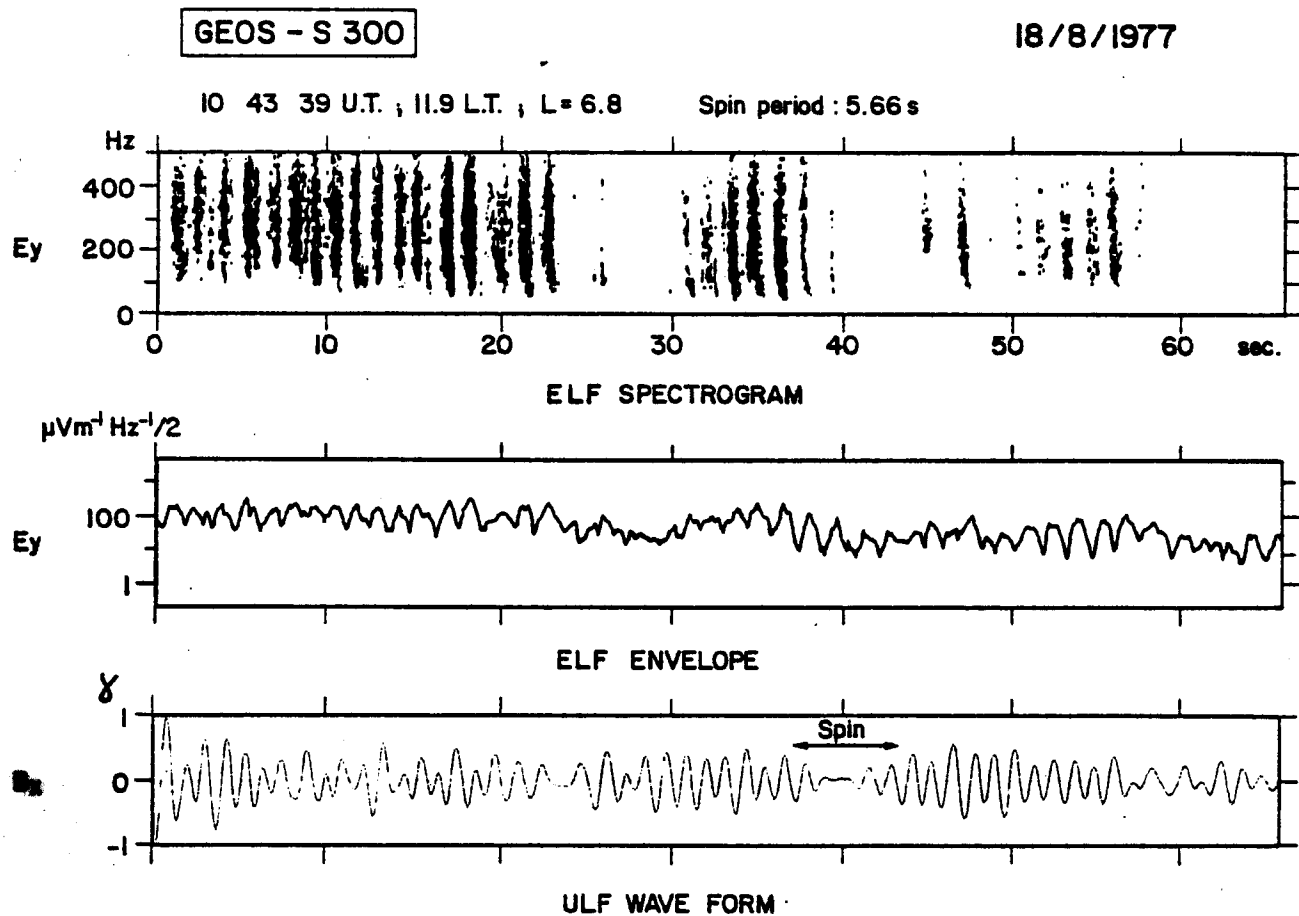
Travail effectué en collaboration avec un grand nombre de chercheurs européens et un chercheur canadien (536).

énergie (Figure VII-2). L'augmentation de l'angle d'attaque favorise le maintien dans la magnétosphère équatoriale de grandes quantités d'ions  $\text{He}^+$  (qui autrement seraient retournés à l'ionosphère conjuguée). Le chauffage quant à lui pourrait être à l'origine de ces ions énergétiques qui participent, souvent dans des proportions non négligeables, à l'énergie du courant annulaire terrestre. Il est vraisemblable que cette découverte amène à modifier assez profondément nos idées sur l'origine des ondes UBF d'une part et sur le rôle des ions minoritaires dans la dynamique magnétosphérique d'autre part. Elle a permis par ailleurs de clarifier nos idées sur les relations existant entre amplification des ondes et diffusion des particules dans un milieu à plusieurs composants ioniques (515, 516).

## VII.2 FLUX OU COURANTS ALIGNES

L'on sait que de tels phénomènes sont invoqués dans tout mécanisme de précipitation aurorale ou de déclenchement de sous-orage. Leur détection directe par des analyseurs de particules est toutefois délicate au moins dans le domaine des faibles énergies ( $\leq 300$  eV) car les deux espèces de particules (protons et électrons) ne sont pas toujours mesurées simultanément, ou parce que les détecteurs ne peuvent pas souvent regarder dans les deux directions opposées. Dans le plan équatorial, la détection de ces courants par leurs effets magnétiques continus est difficile compte tenu de leur faible densité linéique. En revanche leur déplacement (ou leur traversée par un satellite) peut induire dans une sonde alternative un signal bien supérieur au seuil de sensibilité. C'est ce qui semble bien se produire lors du phénomène UBF rapporté sous le nom de SIP (Short Irregular Pulsation) dont des expériences récentes, effectuées en liaison avec des observations photométriques au sol, ont montré qu'il était associé à des déplacements rapides de la frontière de précipitation des électrons auroraux (Figure VII-3). L'analyse de tels phénomènes se poursuit pour déterminer la part du signal e.m. lié au déplacement du courant et la part liée à sa turbulence propre (536).

Un autre phénomène récemment observé à bord de GEOS dans le double domaine des ondes UBF et TBF implique également l'existence de flux dirigés d'électrons de basse énergie ( $\leq 20$  eV). Il s'agit d'ondes e.s. de fréquence comprise entre  $f_{\text{rhh}}$  et  $f_{\text{pi}}$ , dont l'amplitude est fortement modulée ( $\sim 30$  dB) par une onde UBF ( $f \sim F_{\text{He}^+}$ )



**Figure VII-4** : Modulation d'ondes électrostatiques de très basse fréquence par des ondes électromagnétiques d'ultra-basse fréquence

On observe à bord des satellites GEOS, dans la magnétosphère externe ( $L > 6$ ) des ondes électrostatiques d'extrêmement basse fréquence (EBF) dont le spectre est compris entre la fréquence hybride basse (typiquement 80 Hz) et la fréquence plasma ionique (typiquement 500 Hz). Ce spectre (figure du haut) est fortement modulé en amplitude. Le panneau du milieu qui représente le bruit intégré dans cette gamme de fréquence montre que cette modulation, de période  $\sim 1.2s$  pour l'exemple présent, peut atteindre 20 dB. Cette période est identique à celle des ondes d'ultra-basse fréquence (UBF) observées simultanément. La forme d'onde de ces UBF est représentée sur le panneau du bas. Il a été montré récemment que ce type de phénomène était associé à des flux intenses d'électrons de faible énergie ( $< 20 eV$ ) aligné le long du champ magnétique terrestre (215, 511).

observée simultanément (Figure VII-4). L'analyse de ce phénomène, en liaison avec les chercheurs du Mullard Institute (Angleterre) qui possèdent les données sur le plasma de faible énergie, se poursuit (215, 511).

Dans ce même domaine, il convient de citer un travail théorique important (155) destiné à interpréter l'origine du rayonnement kilométrique auroral de la Terre à partir de flux d'électrons alignés, et le démarrage d'études de simulation sur la création des double-couches le long des lignes de force aurorales. Ces deux travaux ont été entrepris en liaison étroite avec des chercheurs de l'Ecole Polytechnique.

### VII.3 TURBULENCE ASSOCIEE AUX FRONTIERES MAGNETOSPHERIQUES

Occasionnelle pour GEOS et naturelle pour ISEE, la traversée des frontières magnétosphériques a permis d'effectuer un certain nombre d'observations non encore totalement interprétées.

Dans le cas de GEOS, il s'agit de la détection d'un bruit UBF extrêmement puissant ( $\sim 1 \gamma \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ ) au voisinage immédiat de la magnétopause. La couche turbulente est en fait la couche de courant ( $\sim 10^6 \text{ A}$ ) qui circule à la frontière de la magnétopause comme résultat de l'interaction du vent solaire et du champ magnétique dipolaire de la Terre. Le déplacement du satellite à travers cette couche de courant produit, comme dans le cas des SIP, une modification du champ magnétique alternatif détecté, dans la gamme des basses fréquences tout au moins ( $f \lesssim 2-3 \text{ Hz}$ ). Au-delà, l'observation reflète la turbulence très forte engendrée à l'intérieur de la nappe de courant. Cette turbulence est susceptible d'une part d'expliquer l'existence d'une résistivité anormale élevée (que toute théorie de la reconnection requiert), d'autre part d'évacuer l'excès d'énergie que l'on a du mal actuellement à détecter dans les particules. Des calculs d'ordre de grandeur ont été effectués (149) et d'autres analyses sont en cours pour bien discerner la nature et l'importance du phénomène de turbulence dans les régions de reconnection.

Les mesures faites à bord d'ISEE dans le vent solaire sont de nature différente. Elles montrent l'existence d'un fort bruit électrostatique centré autour de la fréquence de plasma, mais qui n'est observé que lorsque la ligne de force du champ magnétique interplanétaire est tangente à l'onde de choc (Figure VII-5). Cette forte

DAY 310, 1977

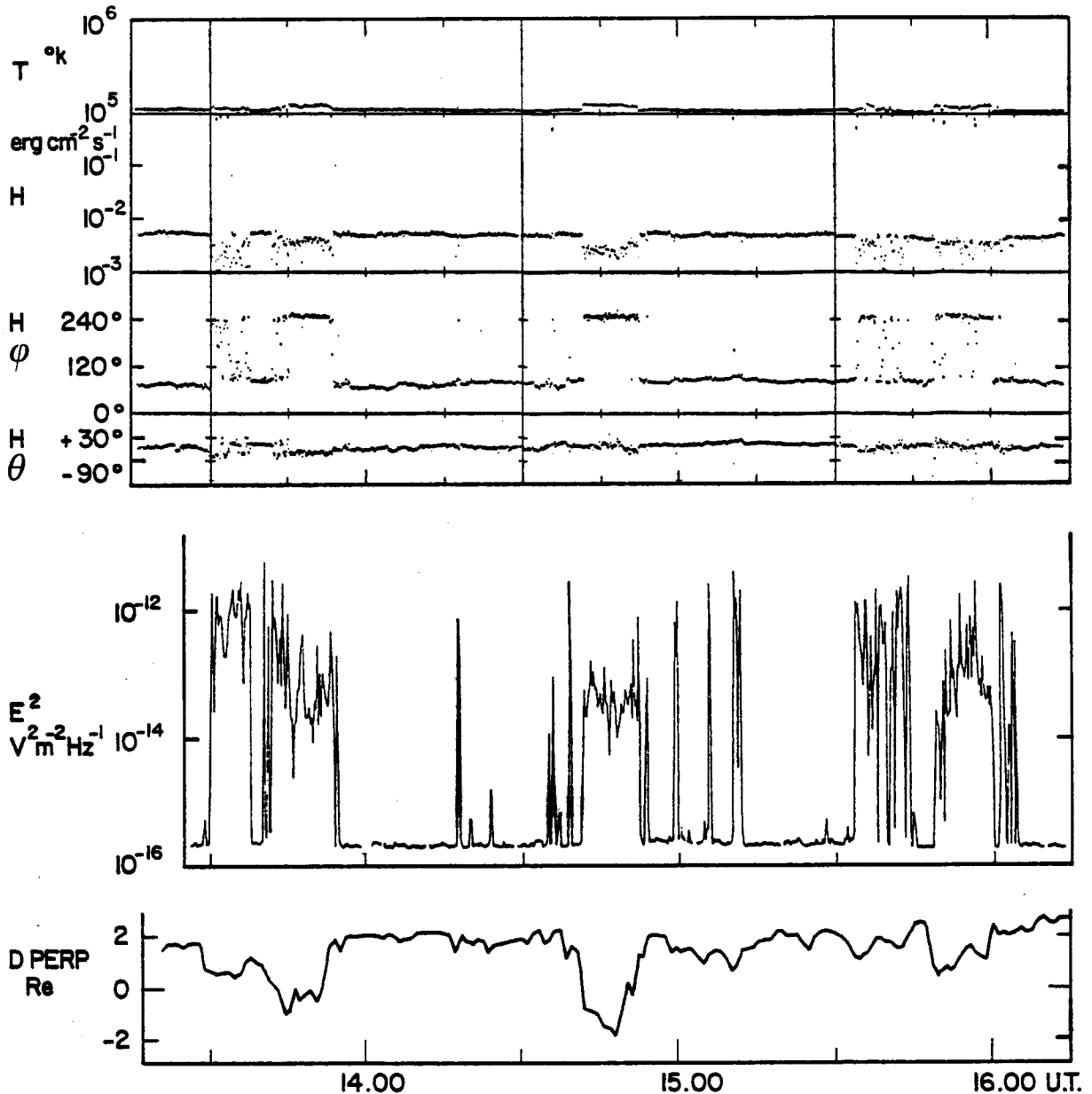


Figure VII-5 : Ondes électrostatiques "à contre-courant" observées dans le vent solaire à bord du satellite ISEE.

De bas en haut :

- D PERP : distance minimum entre la ligne de force qui passe par le satellite et le modèle de choc. Une décroissance de cette quantité indique que la ligne de force se rapproche du choc ou se connecte plus profondément (le zéro, arbitraire, dépend du modèle choisi).

- $E^2$  : champ électrique moyen des ondes dans la gamme de fréquence 0-50 kHz en  $V^2 \cdot m^{-2} \cdot Hz^{-1}$ . Il augmente brutalement quand la ligne de force se connecte au choc.

- $H_\theta$  et  $H_\phi$  sont respectivement l'élévation et l'azimut du flux de chaleur déterminé d'après les mesures d'électrons entre 0 et 500 eV. L'azimut s'inverse brusquement lorsque la ligne de force est connectée car le flux de chaleur vient alors du choc au lieu de venir du soleil.

- H : module de ce flux de chaleur. Il décroît lorsque la ligne de force est connectée car c'est alors la différence entre les flux de chaleur venant du soleil et du choc.

- T : température électronique : elle croît lorsque la ligne de force est connectée.

Les lignes de force connectées au choc sont donc les lieux d'intense réflexion des particules du vent solaire et d'intenses émissions d'ondes.

Travail effectué en collaboration avec l'Observatoire de Meudon et le Goddard Space Flight Center (Interplanetary Physics Branch) (220).

émission est liée à l'existence d'électrons de moyenne énergie réfléchis par l'onde de choc et remontant le long des lignes de force (d'où le nom d'ondes à contre-courant (upstream) donné à ces ondes). L'étude de celles-ci doit permettre de comprendre l'un des mécanismes de réaction de la magnétosphère à l'intrusion du vent solaire et de spécifier le niveau de bruit que l'on peut rencontrer, du fait de ces mécanismes, au voisinage des planètes du système solaire (219, 220).

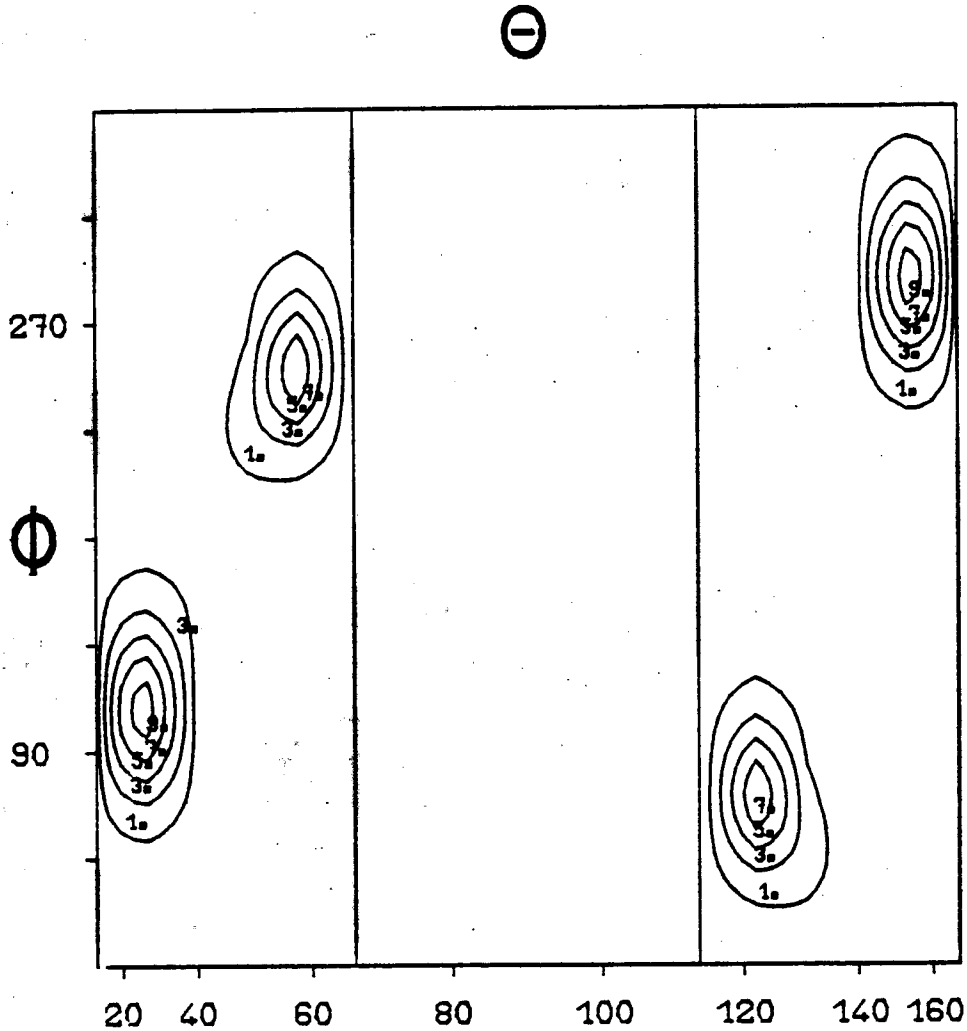
#### VII.4 RECHERCHES SUR LES SIGNAUX D'ORIGINE ARTIFICIELLE (POLLUTION ET COMPATIBILITE ELECTROMAGNETIQUES)

Le problème de la pollution électromagnétique de l'environnement terrestre (et de ses conséquences sur la dynamique de la magnétosphère) a été abordé à plusieurs reprises, principalement aux E.U.. C'est dans un autre chapitre (chapitre X : Expériences Actives) que sont décrits les travaux expérimentaux ou théoriques liés à l'injection volontaire et contrôlée d'ondes TBF dans la magnétosphère à l'aide d'émetteurs puissants situés au sol (en général mais non exclusivement pour les besoins de communication ou de radionavigation). C'est ainsi que les signaux des émetteurs NKL (Etats-Unis), Omega (Norvège) ou NBA (Panama) ont pu être étudiés grâce aux satellites GEOS ou FR1.

La question demeure toutefois de savoir si les lignes à haute tension qui sillonnent les pays industrialisés ne sont pas à l'origine d'un rayonnement involontaire pouvant se propager dans la magnétosphère dans toute la gamme TBF ( $f \ll 10-20$  kHz). Des recherches ont été entreprises à ce sujet à partir des données des satellites GEOS mais il est encore difficile d'apporter une réponse quantitative certaine quant au niveau des bruits e.m. ainsi rayonnés.

En revanche, et l'on rejoint ainsi là un problème de compatibilité e.m., de forts signaux ont été observés à bord de GEOS dans la gamme EBF ( $f \ll 500$  Hz). Ces signaux sont vraisemblablement produits par la mise en (et hors) circuit, à raison d'environ 240 fois par tour, de toutes les cellules solaires situées sur une génératrice. L'évaluation quantitative des effets observés est en cours.





14 - 8 -1977 10 H 1 MN 5455 MS LT=11.48 E.N.

FP,FG,F(KHZ)=23.70 4.42 1.76 N=9 M=7 Q=1.63 PR= 1.90

LAT=0.80 LONG=25.10 DIST= 5.95 L= 6.01 AP= 12.06

**Figure VII-6 : Détermination de la fonction de distribution des normales d'ondes d'une émission de type chœur détectée à bord de GEOS**

$\phi$  est l'angle entre le champ magnétique  $\vec{B}_0$  et la direction de la normale d'onde.  $\phi$  est l'angle azimutal de la projection de cette normale dans le plan perpendiculaire à  $\vec{B}_0$ . Les contours d'isointensité de répartition des normales d'ondes sont obtenus à partir de la méthode du maximum d'entropie appliquée aux seules composantes magnétiques du signal. Dans ces conditions, à chaque point  $\theta$ ,  $\phi$  est toujours associé le point  $\pi - \theta$ ,  $\phi + \pi$ . L'utilisation d'une ou de plusieurs composantes électriques permet en général de faire disparaître la mauvaise image. On remarque sur cet exemple l'existence de deux pics dans la distribution. Ce phénomène semble assez général pour les phénomènes de chœur observés loin de la région de génération (la zone interdite au centre correspond au cône de résonance pour la fréquence considérée et les paramètres du plasma mesurés) (401).

## VII.5 PROGRES EN MATIERE D'ANALYSE DES CHAMPS D'ONDES

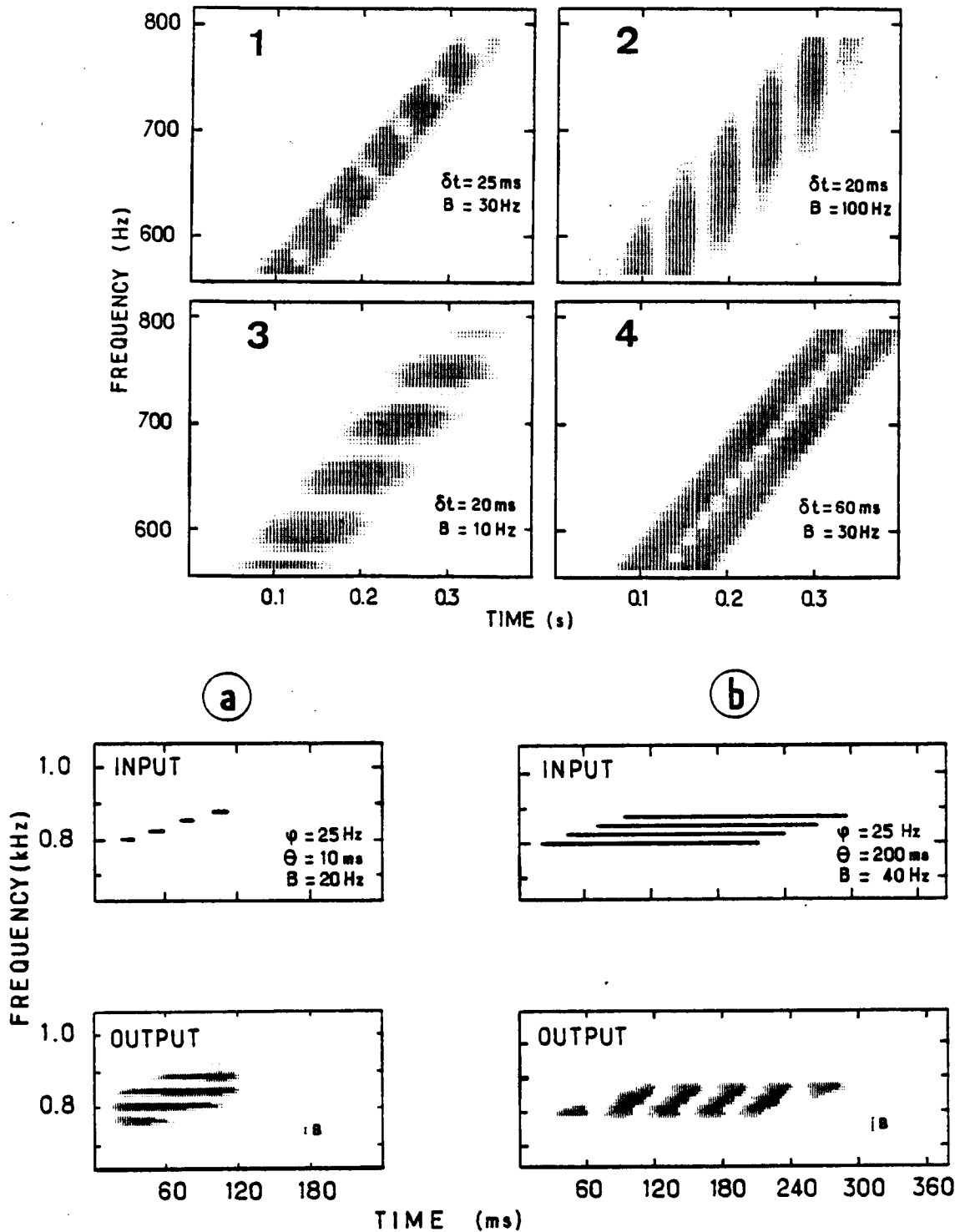
Fondées principalement sur des données expérimentales, les études sur le rayonnement e.m. circumterrestre se devaient, pour progresser, d'être associées à des méthodes puissantes d'analyse du signal. Les travaux relatifs à ces méthodes se divisent en trois catégories.

### VII.5.1. Mise en routine des méthodes d'analyse de la polarisation

Ces méthodes, mises au point les années précédentes, sont maintenant utilisées en routine, principalement dans le domaine UBF, pour visualiser les différents paramètres de la polarisation (puissance circulaire droite ou gauche, puissance linéaire, ellipticité, direction des grands axes,...). Elles ont nécessité l'affinement du processus d'élimination des signaux parasites liés à la rotation du satellite dans le champ magnétique continu de la Terre (153, 330). Parallèlement ont été poursuivies, en routine ou sur des cas isolés, les études de la fonction de cohérence des signaux enregistrés sur plusieurs composantes (pour déterminer la nature du signal (111,135)) ou en différents points (pour déterminer les caractéristiques de sa propagation (126, 514).

### VII.5.2. Détermination de la direction des normales d'ondes

Cette détermination a été effectuée dans le cadre de deux hypothèses distinctes, qui recouvrent chacune un objectif et des méthodes différents. Soit l'on admet qu'il existe pour chaque fréquence un et un seul plan d'onde. La direction de la normale d'onde (ainsi que les caractéristiques expérimentales de la polarisation) se détermine alors à l'aide des seules composantes magnétiques du signal. La méthode utilisée, très rapide et jouissant d'une excellente résolution en fréquence et en temps, est celle qui a été mise au point à Issy-les-Moulineaux et qui s'appuie sur le concept de polarisation complexe instantanée (139). Soit l'on admet que pour chaque fréquence, il existe une fonction de distribution des directions de propagation. L'on utilise alors entre 9 et 36 coefficients de la matrice de cohérence des 6 composantes magnétiques et électriques du signal, et l'on impose à celui-ci de suivre les lois théoriques de dispersion et de polarisation. La méthode (maximum d'entropie ou de vraisemblance, noyaux de Dirichlet) est plus lourde d'emploi mais se révèle extrêmement précieuse pour étudier les signaux à composantes multiples (Figure VII-6) et remonter ainsi aux mécanismes de leur génération (134, 157, 401, 537). Cette méthode est principalement



**Figure VII-7 : Différence entre structure apparente et structure réelle dans le plan fréquence-temps de signaux à composantes multiples.**

En haut : résultats d'une analyse sur des signaux à fréquence glissante séparés par des intervalles de temps  $\delta t$  différents et analysés avec des bandes passantes différentes. C'est seulement lorsque l'écart  $\delta t$  est assez grand et que la bande d'analyse n'est ni trop large ni trop faible que l'on retrouve la structure originale (panneau n° 4). Dans tous les autres cas, on trouve des structures apparentes qui n'ont rien à voir avec la structure réelle.

En bas : résultats d'une analyse effectuée sur des signaux de durée finie, de fréquence différente et légèrement décalés dans le temps. Les paramètres des signaux et la bande d'analyse du filtre ont été choisis de façon à montrer que les structures apparentes peuvent différer fortement des structures réelles. A gauche, la séparation apparente en fréquence des signaux est de 40 Hz alors que la séparation réelle est de 25 Hz. A droite, il apparaît une série de signaux à fréquence glissante qui ne reproduisent nullement la structure du signal original (127).

utilisée à Orléans. Grâce au concours d'un chercheur japonais, de l'Université de Nagoya, elle a permis d'étudier le rayonnement dans l'ionosphère et la magnétosphère équatoriales de l'émetteur NBA ( $f = 24$  kHz) situé au Panama, la réception des signaux se faisant à bord du satellite FR1.

### VII.5.3. Etude des propriétés des signaux à structure variable dans le temps

Cette étude est le prolongement de celles que nous avons effectuées les années précédentes sur le comportement apparent, dans le plan fréquence-temps, de signaux dont l'amplitude comme la fréquence varient simultanément dans le temps. Cette année, nous avons considéré principalement les signaux à composantes multiples (monochromatiques ou à fréquence glissante) et l'on s'est attaché à définir des méthodes simples permettant de détecter les fausses structures apparentes qui peuvent résulter de l'interférence entre plusieurs composantes d'une même émission (Figure VII-7) et qui peuvent donc conduire à des conclusions fausses quant à sa nature et l'origine de celle-ci (124, 127, 128).

## VIII. RESONANCE DES PLASMAS

Grâce à l'excitation artificielle des diverses fréquences de résonance caractéristiques du plasma, associée à l'observation d'émissions d'ondes naturelles à caractère électrostatique ou électromagnétique, une meilleure connaissance des paramètres du plasma circumterrestre a été obtenue. Les principales fréquences de résonance qui seront ultérieurement mentionnées dans ce chapitre sont respectivement : la fréquence oblique basse  $f_{ob}$ , la gyrofréquence électronique  $f_{ce}$  et ses harmoniques  $nf_{ce}$ , la fréquence plasma  $f_{pe}$ , la fréquence hybride haute  $f_{uh}$ , et la série des fréquences  $f_{qn}$  supérieures à  $f_{uh}$  qui sont comprises entre  $nf_{ce}$  et  $(n+1)f_{ce}$ .

A partir de la mesure de ces fréquences caractéristiques, il est facile d'en déduire l'intensité du champ magnétique ainsi que la densité électronique. D'autre part, à partir de la mesure de l'amplitude des résonances, il est également possible d'en déduire la température électronique.

L'analyse des données provenant des expériences à résonance embarquées sur les satellites GEOS 1 et 2 et ISEE A a été poursuivie. De nouveaux résultats ont été acquis concernant les profils de densité et de température électroniques du plasma thermique dans la magnétosphère et dans le vent solaire ; les traversées des zones de transition que constituent la plasmopause, la magnétopause et l'onde de choc ont été tout spécialement étudiées. Cependant pour accéder à une connaissance plus complète du plasma circumterrestre, il était nécessaire de ne plus se cantonner dans une description statique du milieu. De fait, l'aspect dynamique de la magnétosphère ne peut être compris que dans le cadre d'un système de circulation et de courant à l'échelle de la magnétosphère entière. C'est pourquoi l'analyse des données a été principalement axée sur l'aspect dynamique du plasma et qu'une grande partie des résultats obtenus se trouve exposée dans le chapitre VI : "Electrodynamique de l'Environnement Ionisé".

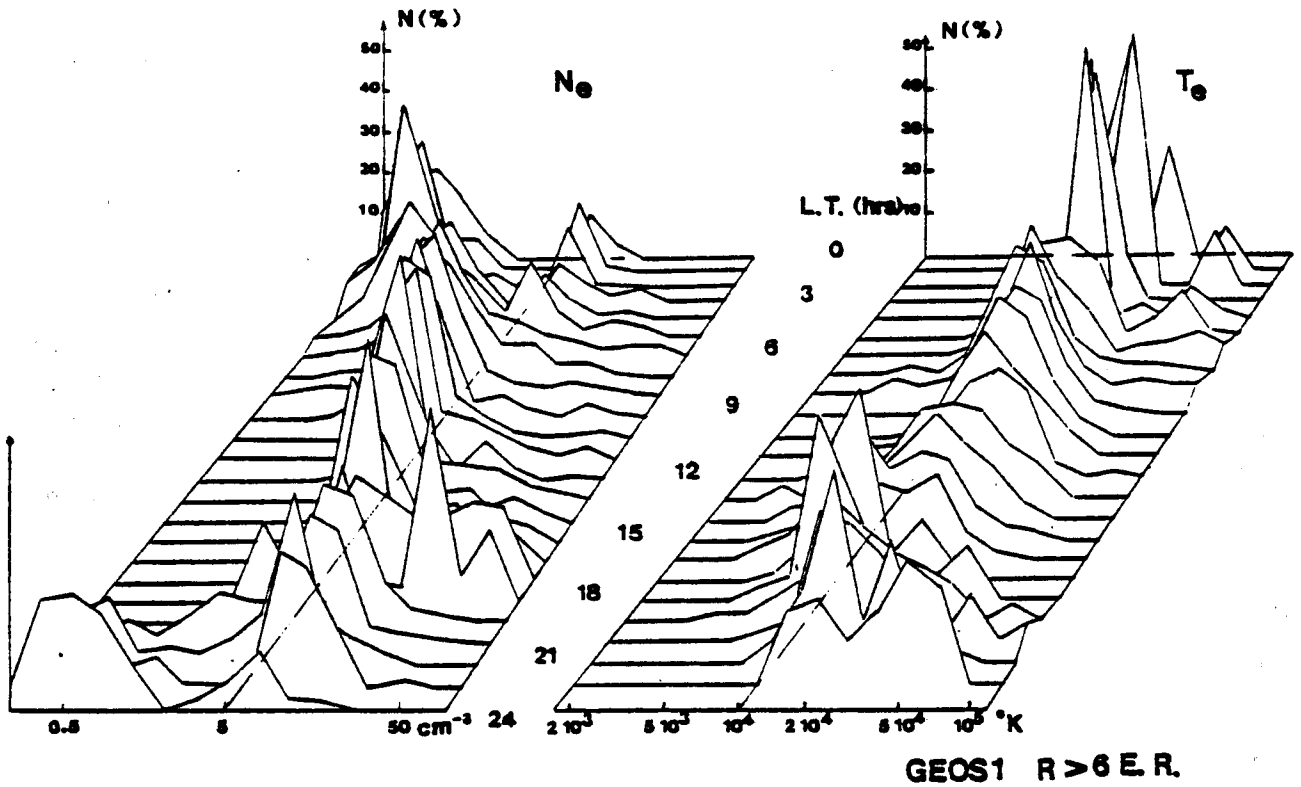
Les processus physiques liés au couplage ionosphère-magnétosphère ont été étudiés par le biais de la participation du CRPE aux programmes de fusées sondes en zone aurorale "SUBSTORM-GEOS" et "PORCUPINE". Lors du premier programme l'objectif scientifique du CRPE consistait à mesurer la résistivité des plasmas auroraux, de manière à déceler l'éventuelle présence d'une résistivité anormale, liée à une turbulence du plasma probablement engendrée par un mécanisme de déstabilisation

des ondes acoustiques ou cyclotroniques ioniques. Quant au programme PORCUPINE ses objectifs scientifiques étaient doubles : d'une part mesurer la fonction de distribution électronique et détecter les émissions d'ondes associées à la présence de courants alignés, d'autre part mesurer la contribution des électrons thermiques à ces courants. Soulignons qu'avec le lancement prochain d'ARCAD 3, satellite polaire à orbite basse (500 - 2 000 km), le CRPE possède un ambitieux programme scientifique consacré à l'étude du couplage ionosphère-magnétosphère.

En ce qui concerne l'aspect théorique de la physique des résonances, l'accent a été tout particulièrement mis sur les études permettant de mettre en évidence l'effet d'un mouvement d'ensemble du plasma et de mesurer vectoriellement sa vitesse à partir des caractéristiques des résonances observées. De fait, il existe encore peu de moyens expérimentaux permettant de mesurer correctement ces mouvements d'ensemble, notamment dans la direction parallèle aux lignes de force du champ magnétique. De plus, il est apparu que dans de nombreuses données expérimentales, l'interprétation théorique ne pouvait être effectuée dans le cadre d'une théorie se restreignant à considérer le plasma comme Maxwellien, mais qu'il fallait prendre en compte l'influence d'une population suprathermique. D'autre part, dans le cadre de l'interprétation et de l'identification des résonances, des méthodes de traitement du signal ont été mises au point.

Enfin, le CRPE a été amené à définir sa participation scientifique à d'éventuelles expériences spatiales futures telles que les projets OPEN (U.S.A.) et VIKING (Suède). Ces projets mettront en oeuvre des satellites explorant les régions de hautes latitudes jusqu'à des altitudes supérieures à  $3 R_E$ , régions où la fréquence plasma est souvent inférieure à la gyrofréquence électronique. Dans ces conditions expérimentales qui n'avaient pas été abordées jusqu'alors, il est apparu primordial sur le plan théorique de prévoir quelles fréquences caractéristiques pouvaient encore être excitées.

Le présent chapitre illustre donc les différents aspects mentionnés dans cette introduction.



**Figure VIII-1 :** Distribution statistique des densités et températures électroniques mesurées sur GEOS 1 à l'aide de l'expérience impédance mutuelle. Les courbes sont les histogrammes des valeurs de densités ou de températures, mesurées dans un secteur heure locale - altitude donné. Nous avons normalisé le nombre de mesures obtenues dans un tel secteur à 100, afin de pouvoir comparer les différents histogrammes : les mesures sont beaucoup plus nombreuses du côté jour que du côté nuit. On observe sur un tel diagramme la présence de la plasmasphère (entre 16 et 20 HL), la présence d'une plasmasphère "extérieure" ( $N_e \sim 5 \text{ cm}^{-3}$ ,  $T_e \sim 12\,000^\circ\text{K}$ ), et la présence de plasma plus ténu ( $N_e \sim 0.5 \text{ m}^{-3}$ ) et plus chaud ( $T_e \sim 50\,000^\circ\text{K}$  et plus, en dehors des limites de l'instrument) dans les zones de nuit, et pour les périodes agitées.

## VIII.1 MAGNETOSPHERE

### Expérience "impédance mutuelle" sur GEOS 1-2

L'ensemble des données obtenues sur le satellite GEOS 1 a été analysé. Il s'avère que l'approximation d'un plasma homogène, Maxwellien, isotrope, peut être envisagée pour une grande partie des données, allant de 80 % du côté jour (de 9 h à 20 h, en temps local) à 40 % du côté nuit (de 0 h à 6 h, en temps local). Cette proportion est d'autant plus grande que l'activité magnétique est faible. Les valeurs de densité et température obtenues dans le cadre de cette approximation ont été classées en histogrammes, dans des secteurs heures locales et altitude donnés (voir exemple sur figure VIII-1).

Les traits caractéristiques relevés dans le comportement de la densité et de la température sont les suivants :

- Le plasma est encore relativement dense ( $N_e \sim 5 \text{ cm}^{-3}$ ) et froid ( $T_e \sim 12\,000^\circ\text{K}$ ) en dehors de la plasmasphère proprement dite. Du côté jour ( $\sim 9$  à  $20$  HL), cette plasmasphère "extérieure" se prolonge au moins jusqu'à  $7 R_E$ .
- Du côté nuit ( $\sim 22$  à  $6$  HL) c'est encore vrai en cas de faible activité magnétique. En cas de forte activité, on observe aux alentours de  $4$  à  $5 R_E$ , une nouvelle frontière au-delà de laquelle le plasma apparaît comme très peu dense ( $N_e < 1 \text{ cm}^{-3}$ ), relativement chaud ( $T_e > 50\,000^\circ\text{K}$ ), et très souvent non Maxwellien. Son origine est alors vraisemblablement non ionosphérique.
- Les gradients de densité de type "plasmopause" observés sur GEOS 1 occupent une assez grande distance radiale (en moyenne, de  $1$  à  $2$  rayons terrestres pour une variation de  $N_e$  de  $10$  à  $50 \text{ cm}^{-3}$ ). A l'extérieur de ce gradient, la température est en moyenne plus élevée en période d'agitation magnétique.

Ces travaux ont fait l'objet d'une publication et d'une communication (156, 217).



## VIII.2 COUPLAGE IONOSPHERE-MAGNETOSPHERE

### VIII.2.1 Expérience "PORCUPINE"

La deuxième phase du projet "PORCUPINE" s'est concrétisé par le lancement de deux fusées sondes ARIES depuis la base de l'ESRANGE (Kiruna, Suède). Rappelons que ce programme ouest-allemand est consacré à la recherche sur la physique des aurores, et que le lancement a eu lieu alors que le satellite GEOS 2 se trouvait sur la même ligne de force, ce qui permettra l'étude des phénomènes de couplage ionosphère-magnétosphère. Les deux tirs ont été effectués au mois de mars 1979, le premier (F3) dans une aurore assez ténue, et le second (F4) en présence d'un fort arc auroral (Baie magnétique  $> 500 \gamma$ ).

- Toutes les données de l'expérience M.F.- destinée à mesurer le courant d'électrons thermiques le long du champ magnétique- ont été complètement traitées au CNES durant l'année 1979.

Pendant le premier tir, où le champ électrique mesuré était très faible (composante transverse inférieure à 25 mV/m), les mesures semblent indiquer l'existence de vitesses de dérive de quelques km/sec, dirigées vers le bas et décroissantes au cours du vol. Ces mesures paraissent exemptes de perturbations liées à la rotation de la pointe, ce qui constitue un progrès par rapport aux résultats de l'expérience précédente (PORCUPINE 1, mars 77).

Pendant le second tir une notable perturbation a été détectée sur les mesures pendant la seconde moitié du vol où le champ électrique était important (composante transverse comprise entre 75 et 125 mV/m). Tout s'est passé comme si les sondes M.F. détectaient une très grande vitesse de dérive (plusieurs dizaines de km/sec) transversalement au champ magnétique. Cet effet perturbateur masque l'éventuelle détection de courants alignés ; il reste inexpliqué à ce jour.

- Lors de l'excitation active des résonances H.F. du plasma, au moyen d'une sonde quadripolaire, nous observons une structure interférentielle très fine dans le signal reçu. En effet, en plus de la présence habituelle de résonances aux fréquences  $f_{qn}$  et à la fréquence hybride haute ( $f_{uh}$ ), il apparaît une émission d'ondes -en dessous de  $f_{uh}$ - dans chaque intervalle de fréquence séparant deux harmoniques successifs de la gyrofréquence

électronique ( $f_{ce}$ ). Pour une valeur fixée du rapport  $f_{uh}/f_{ce}$ , ces émissions d'ondes sont étroitement liées à la valeur de la température électronique. D'autre part, pour des fréquences supérieures à  $f_{uh}$ , la traversée de nappes de courants alignés se traduit par l'apparition d'une "semi-résonance" aux alentours de  $(n+\frac{1}{2})f_{ce}$ .

L'analyse du spectre croisé des signaux aléatoires recueillis sur les deux antennes (152), révèle l'existence d'émissions d'ondes naturelles aux alentours de  $3/2f_{ce}$  et de  $f_{uh}$  (voir Fig. VIII.2). Les niveaux d'amplitude de ces émissions sont généralement au-dessus du niveau du bruit thermique, mais elles correspondent cependant à une très faible turbulence du plasma. D'autre part, nous observons également des instabilités d'ondes engendrées par la création d'un plasma artificiel émis par une source de Xénon préalablement éjectée du corps principal de la fusée. Ces instabilités se produisent au voisinage de  $f_{uh}$ ,  $nf_{ce}$  et  $(n+\frac{1}{2})f_{ce}$ .

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

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

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

En 1979 on a terminé l'intégration des expériences scientifiques à bord d'une maquette du satellite. On a effectué un vol simulé en ambiance plasma dans la grande enceinte SIMLES de la SOPEMEA à Toulouse, sous l'égide du CNES (voir fig. VIII-3 et VIII-4) ce qui a permis de vérifier la cohabitation des divers ensembles, la qualité EMI du satellite et de fournir des données pour l'étalonnage et la mise au point du dépouillement.

CORRELATEUR F3 (POS)

UR BAS NIVEAU

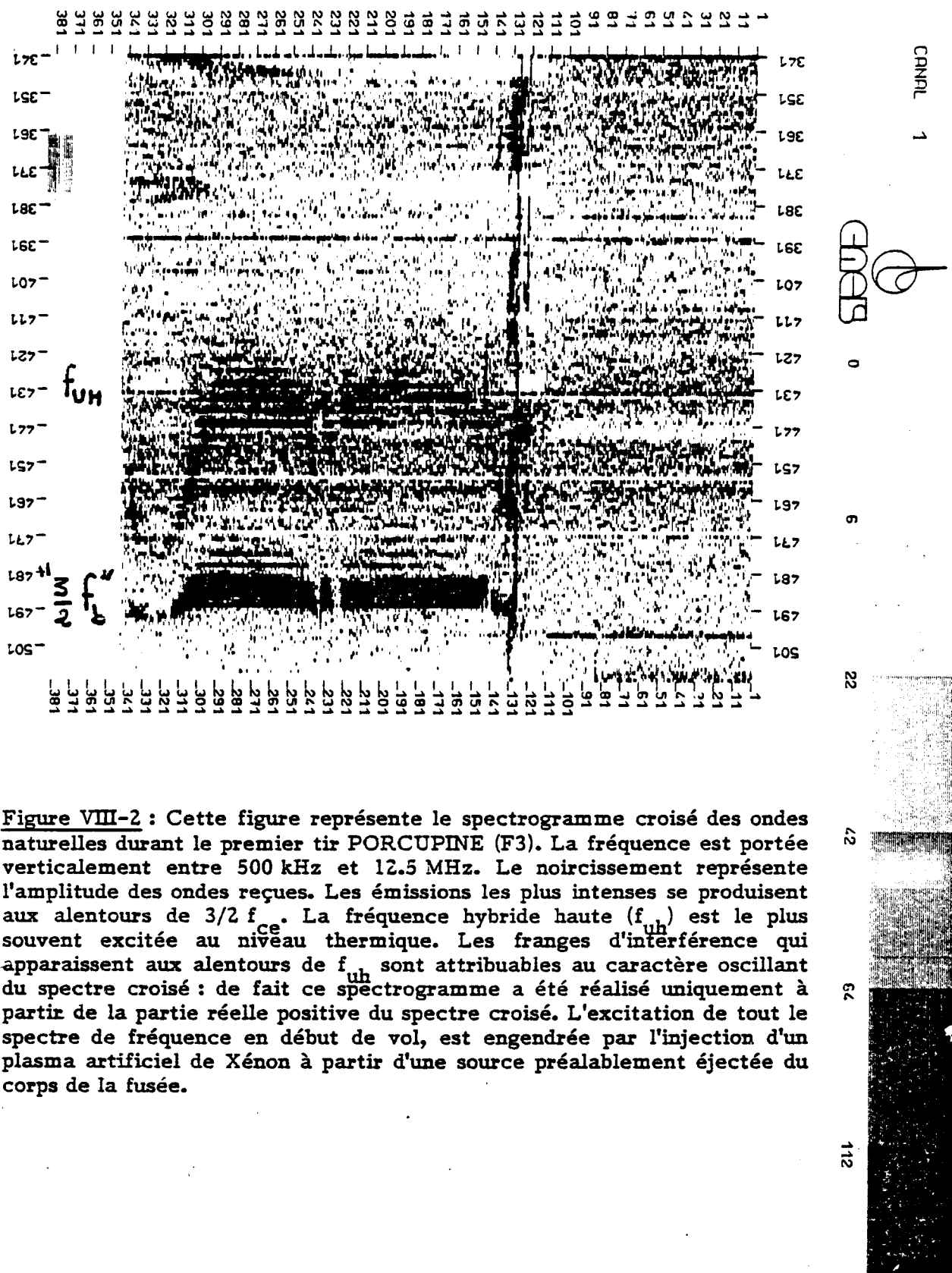


Figure VIII-2 : Cette figure représente le spectrogramme croisé des ondes naturelles durant le premier tir PORCUPINE (F3). La fréquence est portée verticalement entre 500 kHz et 12.5 MHz. Le noircissement représente l'amplitude des ondes reçues. Les émissions les plus intenses se produisent aux alentours de  $3/2 f_{ce}$ . La fréquence hybride haute ( $f_{uh}$ ) est le plus souvent excitée au niveau thermique. Les franges d'interférence qui apparaissent aux alentours de  $f_{uh}$  sont attribuables au caractère oscillant du spectre croisé : de fait ce spectrogramme a été réalisé uniquement à partir de la partie réelle positive du spectre croisé. L'excitation de tout le spectre de fréquence en début de vol, est engendrée par l'injection d'un plasma artificiel de Xénon à partir d'une source préalablement éjectée du corps de la fusée.

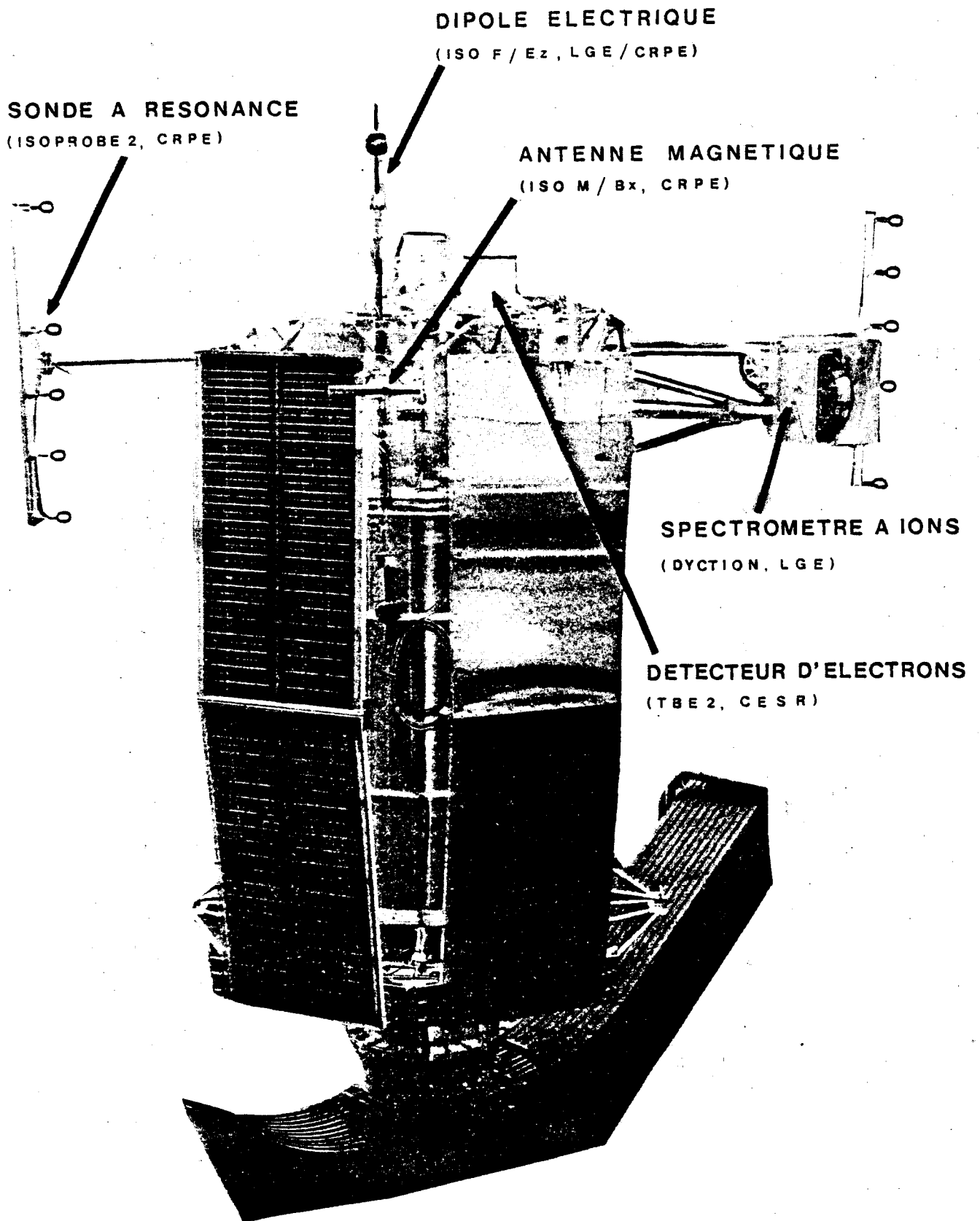
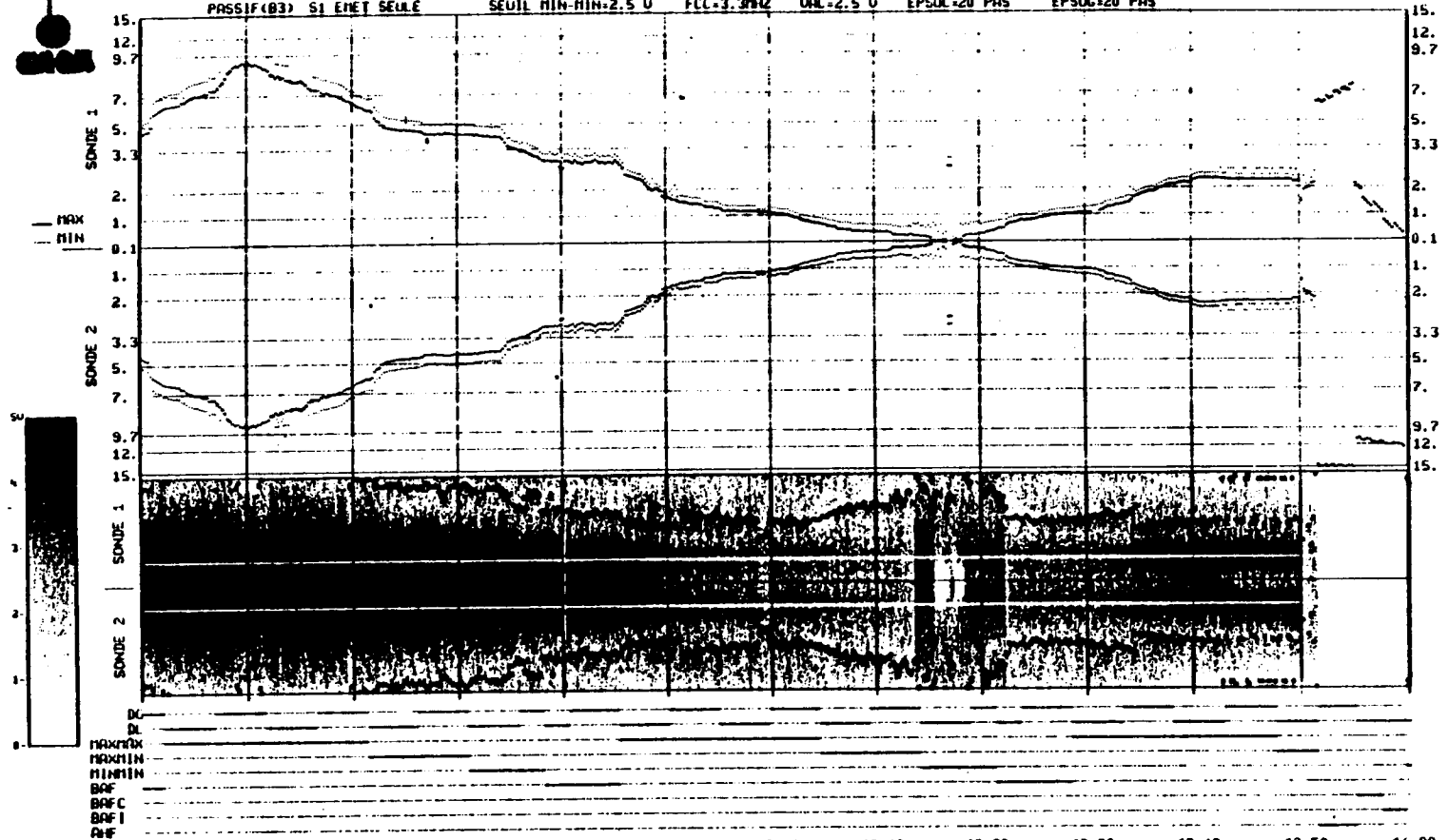


Figure VIII-3 : Configuration de la maquette du satellite ARCAD 3 lors de l'essai dans l'enceinte SIMLES. Les bras porteurs des sondes ont été raccourcis compte tenu de la place relativement limitée dans l'enceinte.

ARCAD3

SOMMAIRE ISOPROBE - 28/09/78 TRIS-120 URSS -TPC=BAF PERM TCC=63  
 ETAT TELECOMMANDES S1=0 EM-MONO REC-STEREO MOD=50. KHZ A/M=AUTO Z/ISOZ=ISOZ  
 S2=PI -EH-STEREO REC=MONO MOD=12.5 KHZ A/F=AUTORISE ETAPE BAF= NORMALE  
 PASSIF(B3) S1 ENET SEULE SEUIL MIN-MIN=2.5 U FCC=3.30KZ UAC=2.5 U EPSOC=20 PAS EPSOC=20 PAS

- VUE 1 -



HEURE TU	12.00	12.10	12.20	12.30	12.40	12.50	13.00	13.10	13.20	13.30	13.40	13.50	14.00
HEURE LOCALE	12.30	12.30	12.30	12.30	12.30	12.30	12.30	12.30	12.30	12.30	12.30	12.30	12.30
LAT. GEOD.	102.36	102.36	102.36	102.36	102.36	102.36	102.36	102.36	102.36	102.36	102.36	102.36	102.36
LAT. GEOG.	108.08	108.08	108.08	108.08	108.08	108.08	108.08	108.08	108.08	108.08	108.08	108.08	108.08
LONG. GEOG.	22.16	22.16	22.16	22.16	22.16	22.16	22.16	22.16	22.16	22.16	22.16	22.16	22.16
ALTITUDE	307.35	307.35	307.35	307.35	307.35	307.35	307.35	307.35	307.35	307.35	307.35	307.35	307.35
L	7.30	7.30	7.30	7.30	7.30	7.30	7.30	7.30	7.30	7.30	7.30	7.30	7.30

Figure VIII-4 : Exemple de micro-fiche du dépouillement de l'expérience ISOPROBE à bord d'ARCAD 3 à partir de données obtenues en caisson à plasma. Les résonances issues des deux sondes montées antiparallèles à l'axe Z sont représentées tête-bêche (échelles verticales : fréquences de résonance horizontales : le temps). La figure en grisé représente le voisinage de la résonance : souligné en blanc la résonance, souligné en noir l'anti-résonance. Un courant aligné s'identifierait immédiatement par la dissymétrie des courbes relatives aux deux sondes.

### VIII.2.3 Expérience "SUBSTORM GEOS"

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

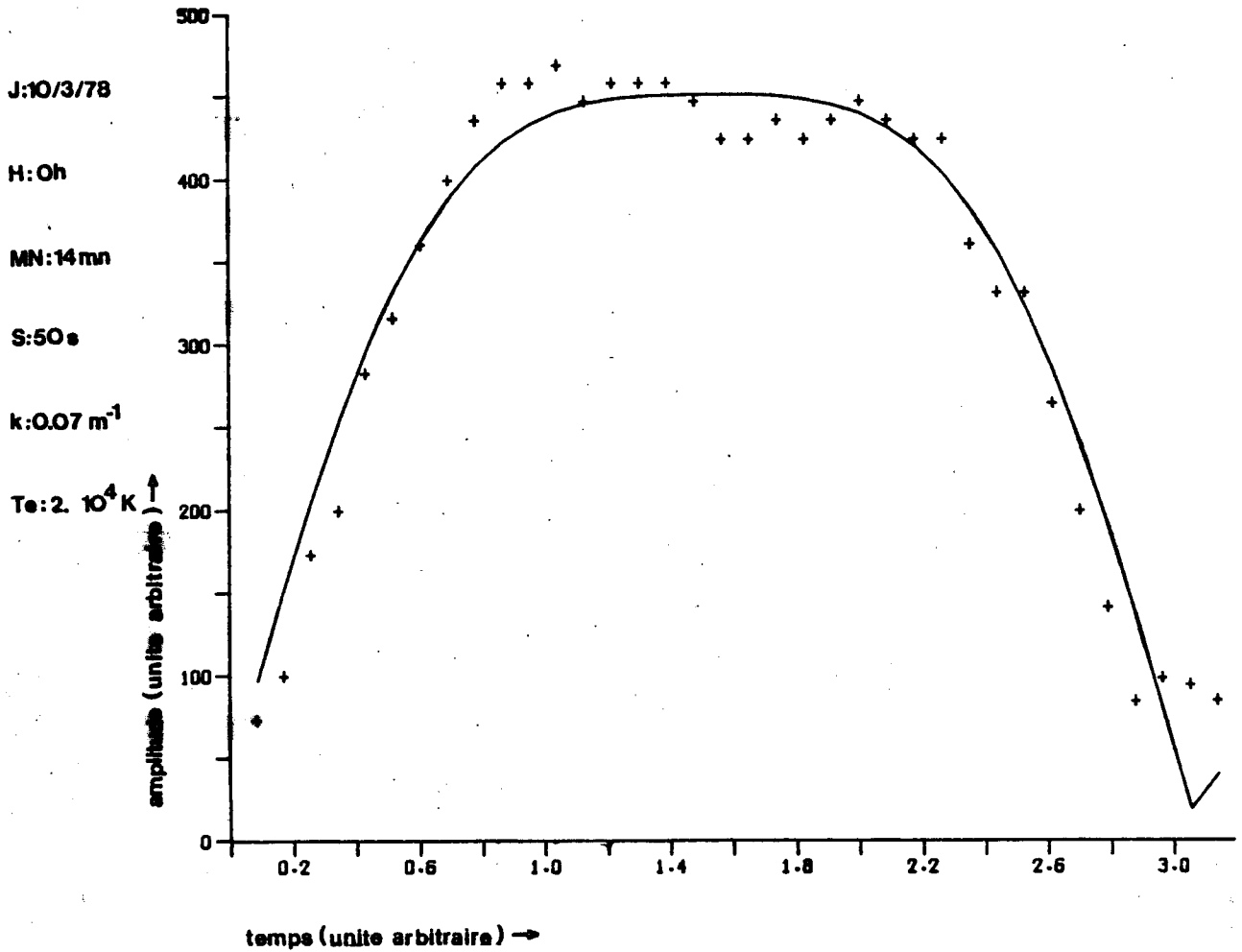
Bien que l'interprétation des mesures obtenues ne soit pas encore certaine, la conclusion la plus vraisemblable est que la résistivité du plasma était normale. Ceci est en accord avec les mesures de champs électriques effectuées par les chercheurs de l'Institut Royal de Technologie à Stockholm, qui n'ont pas décelé la présence de champs parallèles (239). Le principal facteur d'incertitude concerne la contribution des ondes acoustiques ioniques excitées par les électrodes d'émission et propagées à travers le plasma jusqu'aux électrodes de réception (243). Cette contribution dépend, de manière encore mal connue, des dimensions des électrodes, de leurs potentiels électriques, et enfin de la vitesse de déplacement de la sonde par rapport au plasma.

Afin d'éclaircir ces points, entre autres, on vient d'entreprendre un nouveau programme d'études sur les méthodes de caractérisation des plasmas, programme qui comporte à la fois des travaux théoriques et des expériences en plasma de laboratoire. Ses premières étapes sont justement consacrées aux problèmes de l'excitation, de la propagation et de la réception d'ondes acoustiques ioniques dans des plasmas du type ionosphérique.

### VIII.3 METROLOGIE DES PLASMAS SPATIAUX

#### Sondage à relaxation

Les résultats des sondeurs à relaxation des satellites GEOS 1 et 2 sont utilisés de deux manières :



**Figure VIII-5 :** Exemple de figure d'interférence entre le champ électrostatique et l'antenne réceptrice. Les "+" indiquent l'amplitude du signal reçu (unité arbitraire) en fonction du temps (unité arbitraire ; temps total : 1/2 période de spin = 3 093 ms). La courbe théorique (en trait plein) est celle s'ajustant au mieux avec les données expérimentales ("+"). On obtient ainsi une longueur d'onde de 90 m environ et de ce fait une température d'environ  $2.10^4$  K ce qui est une valeur typique pour cette heure locale, ainsi qu'il apparaît sur les statistiques de la figure VIII-1.

- D'une manière opérationnelle : l'observation de la série des harmoniques  $-nf_{ce}$  de la gyrofréquence électronique permet une mesure extrêmement précise de la valeur du champ géomagnétique. Cette mesure, faite en routine, est utilisée conjointement avec les données de l'expérience ondes UBF pour suppléer à la défaillance du magnétomètre embarqué sur GEOS 2.

- Pour poursuivre les études sur les possibilités de diagnostic des plasmas :

1) L'utilisation des observations de résonances du plasma à  $f_{qn}$  (voir § VIII.6), faites en mode de poursuite automatique, pilotées par un calculateur (HP 2100) permet de faire une mesure directe de la longueur d'onde  $\lambda$  du champ électrostatique alternatif. De plus avec la connaissance du rapport  $T_e/\lambda$  par la fréquence de la résonance et par la théorie des modes de Bernstein, on peut obtenir une mesure de  $T_e$  (fig. VIII-5).

2) Les données haute cadence sélectionnées sont traitées. Leurs caractéristiques spectrales permettent l'interprétation détaillée des mécanismes de résonance du plasma dans la magnétosphère. Elles doivent, en particulier, permettre de distinguer entre les cas où il y a accompagnement du satellite par les ondes et ceux où il y a échos obliques selon la théorie développée à partir des résultats antérieurs dans l'ionosphère. Ces résultats devraient donc permettre l'interprétation correcte des effets tels que Doppler, orientation du vecteur d'onde à l'intérieur du plan perpendiculaire au champ géomagnétique, et doivent être utilisés pour l'estimation des vitesses de dérive du plasma perpendiculaires au champ magnétique (voir § VIII.5) etc...

Ces possibilités ont été utilisées pour la définition des propositions d'expériences actives à bord du satellite VIKING et du système OPEN où les sondes impédance mutuelle et à relaxation ont été rassemblées pour constituer un appareil unique.

#### VIII.4 TRAITEMENT DU SIGNAL

##### VIII.4.1 Précision de la mesure des paramètres d'un plasma

La détection passive, par une antenne plongée dans un plasma, du microchamp électrique aléatoire dont il est le siège, permet de remonter à la valeur



des différents paramètres du milieu, notamment sa densité et sa température électroniques. Cependant cette technique pose le problème de la précision de la mesure, puisque la nature stochastique du signal -tension aléatoire due aux fluctuations qui l'engendrent, additionnée d'un bruit parasite aléatoire- va entâcher d'erreurs aléatoires les résultats tirés de son analyse.

A partir du spectre évalué théoriquement, il est possible de chiffrer et de minimiser ces erreurs, ceci pour une expérience donnée, c'est-à-dire définie par un rapport signal sur bruit et un temps d'enregistrement du signal. Avec une sonde dipolaire, on obtient typiquement dans l'ionosphère ( $f_p \sim 1$  MHz), des durées d'intégration (correspondant à une largeur de bande spectrale de  $10 f_p$ ) de l'ordre de la milliseconde pour une précision de 1 % environ sur la température et jusqu'à dix fois meilleure sur la densité. Dans la magnétosphère ( $f_p \sim 10$  KHz), les précisions calculées sur ces deux paramètres sont très voisines : une précision de l'ordre de 1 % nécessite de 1/10 à 1 seconde d'enregistrement du phénomène.

De la même manière, ces prévisions sont faites actuellement pour une sonde quadripolaire. Elles seront l'objet d'une thèse de 3<sup>e</sup> cycle.

#### VIII.4.2 Reconnaissance automatique des résonances de l'expérience sondeur

##### ISEE A

A partir d'un lot étalon de résonances reconnues à la main on définit l'entité résonance par un ensemble de N mesures censées la décrire au mieux. On peut alors représenter le lot étalon par un nuage de points dans un espace à N dimensions qui a la particularité de mettre en évidence les directions privilégiées de ce nuage (axes principaux d'inertie). Il faut ensuite isoler dans cet espace un volume. Tout nouvel individu qui se trouvera à l'intérieur de celui-ci sera classé parmi les résonances et on classera parmi les bruits naturels ceux qui se trouveront à l'extérieur.

D'excellents résultats ont été obtenus en appliquant cette technique dans le vent solaire où seule la résonance plasma est observée. En effet ce n'est pas moins de 90 % des résonances qui sont ainsi reconnues. Avant de passer à la phase d'exploitation le lot étalon sera enrichi et on tiendra compte des effets d'antennes sur les signaux reçus.

Dans la magnétogaine les résultats sont aussi bons et on aborde actuellement le cas de la magnétosphère où le problème est plus complexe et les résonances de différents types moins bien organisées.

Ce travail a fait l'objet d'une note technique et d'une communication qui sera publiée dans un numéro spécial d'Il nuovo cimento (332, 243). Enfin il est à noter que la méthode utilisée est très générale et peut être tout aussi bien appliquée à des comparaisons théorie-expérience.

## VIII.5 PHYSIQUE DES RESONANCES

### VIII.5.1 Ondes électrostatiques dans un magnétoplasma Maxwellien

Le travail théorique sur les ondes électrostatiques dans un magnétoplasma maxwellien portant surtout sur les résonances aux fréquences  $f_{qn}$  a été complété en étudiant de la même façon les fréquences  $f_{cyl}$  qui sont caractéristiques de la forme des surfaces d'ondes rayonnées par une source ponctuelle (138). Des abaques ont été établis, permettant de donner les principales caractéristiques des ondes électrostatiques en fonction du rapport  $f_{pe}/f_{ce}$  entre fréquence plasma et gyrofréquence.

Le CRPE a cherché d'autre part à observer dans de nouvelles conditions ( $f_{pe} \sim 300$  à  $500$  MHz,  $f_{ce} \sim 90$  MHz) le rayonnement directif aux fréquences  $f_{qn}$  en utilisant le caisson de l'ESTEC (Noordwijk, Pays-Bas). Des observations intéressantes de rayonnement en direction oblique ont été obtenues. Cependant, hors des fréquences  $f_{qn}$ , les données expérimentales présentent des caractéristiques compliquées qui sont analysées dans le cas de cette expérience de laboratoire et aussi dans le cas des expériences IPOCAMP et PORCUPINE. La dualité des deux types d'expériences est profitable à cause de la reproductibilité et la maîtrise des paramètres de l'expérience de laboratoire et des conditions d'homogénéité et d'absence de limites du plasma spatial.

### VIII.5.2 Etude des ondes cyclotron harmoniques électroniques électrostatiques

Une étude détaillée des ondes cyclotron harmoniques électroniques (OCHE) de nature rétrograde a été réalisée dans la première branche de dispersion ( $1 < f/f_{ce} < 2$ ) et pour des conditions de plasma dense ( $f_{pe} > f_{ce}$ ) (138). Cette étude a

permis de montrer théoriquement et expérimentalement les différents types de surfaces d'ondes et d'équipotentiels en milieu homogène et inhomogène. Une classification du OCHE a été établie et étendue à toute branche de dispersion, par la suite cette classification a été élargie pour toute condition de plasma (136); une méthode graphique et numérique permet de déduire rapidement les propriétés des OCHE dans les plans de propagation et de détection, par la détermination d'une fréquence particulière appelée " $f_{cyl}$ " base de cette classification.

Plus récemment, il vient d'être montré que les courbes polaires de propagation (et en conséquence celles de détection par le principe de Poeverlein) possédant une structure fine pour des fréquences  $f$  proches de  $f_{cyl}$  (524). Cette étude permet de montrer (i) la continuité des propriétés des ondes dans la classification mentionnée plus haut et (ii) dans quel domaine de détection les surfaces d'ondes apparaissent. Ceci est important pour l'étude future de l'effet d'une dérive parallèle au champ magnétostatique sur les OCHE rétrogrades.

Enfin, ces ondes ont été étudiées dans la direction de détection parallèle à  $\vec{B}_0$  dans la première branche de dispersion (525). Pour la première fois, un signal interférentiel a été observé dans cette direction; ceci est en désaccord avec les simples modèles théoriques précédents incluant des surfaces d'ondes cylindriques, mais en bon accord avec la structure ouverte et fermée de ces surfaces comme il a été montré précédemment (138).

D'autre part, une étude réalisée sur le cône de résonance à la fréquence hybride basse  $f_{lh}$  a permis de montrer que  $f_{lh}$  pouvait être utilisée comme traceur des lignes du champ magnétique (147).

### VIII.5.3 Interprétation des signaux résonants aux $f_{qn}$ observés par les sondeurs à relaxation embarqués sur GEOS 1 et 2

Ces résonances du plasma caractéristiques des modes électrostatiques de Bernstein sont atteintes par des ondes ayant des vecteurs d'onde perpendiculaires au champ géomagnétique  $\vec{B}_0$  et des longueurs d'onde comparables au rayon moyen de gyration des électrons. Dans ces conditions, un effet Doppler notable est attendu sur les ondes reçues et doit permettre une estimation de la vitesse de dérive du plasma perpendiculairement à  $\vec{B}_0$ . Des travaux antérieurs ont montré qu'au voisinage de ces fréquences, des ondes pouvaient se propager selon des trajectoires proches de celle du satellite et que l'inhomogénéité du milieu devait peu affecter leurs caractéristiques.

Un modèle dans lequel l'onde accompagne strictement le satellite dans un plasma homogène est en cours de développement. Il prend en compte la géométrie des antennes émettrices et réceptrices. Ceci conduit à un programme de traitement automatique des données GEOS qui doit fournir le module de la vitesse de dérive du plasma par rapport au satellite. Par ailleurs l'étude des propriétés de directivité du système émetteur-récepteur à ces fréquences se développe. Elle doit conduire à une estimation de la direction de la vitesse de dérive du plasma dans un plan perpendiculaire à  $\vec{B}_0$ .

En ce qui concerne l'interprétation de la courbure des surfaces de phase constante d'une onde rayonnée par une source ponctuelle, une relation analytique simple a été obtenue permettant de déduire la forme des surfaces de phase constante à partir de celle de la surface des indices. La comparaison des surfaces de phase constante déduites de surfaces d'indices avec les résultats expérimentaux d'ondes excitées selon un mode de Bernstein par une source ponctuelle dans un caisson à plasma est à faire. Une comparaison similaire sera faite ultérieurement pour le mode sifflement.

#### VIII.5.4 Résonance oblique basse

A la suite de la publication des travaux sur la résonance oblique basse en magnétoplasma maxwellien, la question se posait de savoir où étaient localisées les franges d'interférence pour les fréquences voisines de la gyrofréquence. Cette question a été clairement tranchée dans une note de recherche (535) : le système interférentiel est situé à l'intérieur du cône de résonance à faible distance de la source, et à l'extérieur de ce cône à grande distance.

Une autre question était posée dans le cadre de la préparation de l'expérience OPEN : dans quelle condition la résonance plasma pouvait-elle être excitée en-dessous de la gyrofréquence électronique. Les calculs ont montré que cette résonance ne pouvait être excitée qu'à faible distance de la source ; pour les plus grandes distances, c'est la résonance oblique basse qui est excitée. Ce résultat a fait l'objet d'une note de recherche qui a été soumise pour publication.

## IX. PHYSIQUE THEORIQUE ET MODELISATION

### IX.1 PHYSIQUE DES PLASMAS

#### IX.1.1 Simulation sur ordinateurs des plasmas fortement corrélés

Le travail sur le concept de pression d'un plasma tridimensionnel à une composante a été terminé. Le calcul a été mené par la méthode de Monte Carlo où ont été explicitement pris en compte les effets de bord (puisque l'idée directrice était que la modification de la densité sur les bords introduit une différence entre la pression totale et le terme cinétique  $\bar{n} kT$ ). Ce calcul est donc à mettre en parallèle avec ceux plus "classiques" utilisant le potentiel modifié (Ewald) pour se débarrasser de ces effets de bord et ne calculer la pression qu'à l'aide de grandeur mesurée loin des parois (où la densité est homogène). On montre alors que si l'on applique "naïvement" (sans distinguer l'énergie potentielle due à l'interaction particule-particule de celle due à l'interaction particule-bain, on retrouve là, avec une excellente précision, les courbes données par De Witt (avec une pression négative dénuée de sens physique). Par contre en appliquant correctement la formule du Viriel où l'on distingue soigneusement les énergies d'interactions particule-particule et particule-bain, on récupère une pression positive que l'on interprète comme l'échange de moment entre les particules et les parois. Il ressort donc de ces expériences que le schéma Monte Carlo utilisé est correct, que le nombre de particules est suffisamment grand, à la fois dans les expériences du CRPE et dans celle de De Witt et Hansen (puisque les 2 schémas très différents redonnent, avec la même interprétation, les mêmes résultats) et qu'une interprétation évitant les difficultés liées à la dérivation par rapport au volume dans le cas du Jellium est possible.

Le problème du plasma à 2 composantes a alors été repris mais cette fois-ci à une dimension et dans le cadre de la dynamique moléculaire. Il apparaît que dans la limite des fortes corrélations (où ion et électron forment des paires) une diminution de la densité prend place sur une distance de l'ordre de la taille de la paire. Le mécanisme détaillé est le suivant : la paire forme un oscillateur nonlinéaire dont l'énergie cinétique de vibration est moitié de l'énergie potentielle (électrostatique). L'énergie cinétique totale (de vibration + translation du centre de masse de la paire) étant égal à l'énergie électrostatique, on voit que l'énergie de translation n'est que la moitié de l'énergie cinétique totale ce qui correspond à une pression moitié de celle du

gaz parfait. Sur les trajectoires des particules on s'aperçoit que souvent une première particule frappe le mur, rebondit, tandis que la 2ème, obligée de coller à la première, s'approche du mur et repart sans avoir eu la possibilité de contribuer ni à la pression, ni à la densité près du bord. Ceci confirme donc l'interprétation microscopique de la pression qui doit être prise égale à  $n_0 kT$  avec  $n_0 \neq \bar{n}$  ( $n_0$  est la densité sur le bord,  $\bar{n}$  est la densité moyenne). Un tel mécanisme est très général et l'étude dans le cas des sphères dures a été commencée. Il a d'ailleurs été suggéré par Lieb sous le nom de théorème du mur.

Deux publications (105, 530) ont résulté de ces travaux. D'autres sont en cours.

### IX.1.2 Confinement magnétique d'un écoulement de plasma

Ce programme, qui se poursuit depuis 1977, est fondé sur l'analogie 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 pour les fins de la fusion thermonucléaire contrôlée.

Les résultats obtenus ont été présentés au Congrès International sur les Couches Limites Magnétosphériques, tenu à Alpbach (Autriche) du 11 au 15 juin 1979 ; l'article correspondant a été publié dans le compte rendu de ce congrès (239).

### IX.1.3 Champs parallèles, simulation numérique des doubles couches

Il existe schématiquement deux grandes classes de modèles pour ces champs : dans les premiers, un champ électrique faible existe tout le long de la ligne de force du champ magnétique tandis que dans les secondes, un champ fort est localisé dans une zone étroite (une centaine de longueurs de Debye locales le long de la ligne de force, ou quelques rayons de Larmor des ions dans le cas des modèles de chocs obliques) située à 1 ou 2 rayons terrestres d'altitude en zone aurorale. Les modèles du deuxième type, d'abord étudiés macroscopiquement par l'école de Stockholm (Block, Carlqvist, Boström, etc...) ont connu récemment un regain d'intérêt considérable, suite à la mise en évidence de chocs électrostatiques stationnaires dans des plasmas de laboratoire et dans des simulations numériques. Malheureusement, les expériences et les simulations faites à ce jour correspondent à des conditions aux limites assez strictes (sur les populations de particules réfléchies par le choc par exemple) et à un

établissement brutal du courant dans le plasma. Ces dernières années ont vu proliférer les modèles d'arcs auroraux invoquant des chocs électrostatiques stationnaires sans qu'aient été comprises les conditions d'existence de ces chocs et sans qu'on connaisse les mécanismes physiques qui les engendrent.

1

Le point central est de comprendre comment des instabilités de courant (mode de Buneman, mode acoustique ionique) peuvent conduire à un choc électrostatique laminaire plutôt qu'à un état turbulent homogène. Actuellement il n'existe pas d'approche analytique du problème, c'est pourquoi il a été abordé en faisant des simulations numériques particulières pour lesquelles le CRPE a bénéficié de l'expérience de J.C. Adam du Centre de Physique Théorique de l'Ecole Polytechnique.

Les simulations faites jusqu'à présent portent sur des systèmes homogènes long ( $L = 256$  à  $1024 \lambda_{\text{Debye}}$ ) aux limites périodiques. Contrairement aux simulations faites sur des systèmes courts ( $L < 256 \lambda_D$ ) avec conditions non périodiques et potentiel extérieur imposé, les simulations ne montrent pas de champs électriques localisés et stationnaires. En revanche, il a été observé des ondes acoustiques ioniques de grandes amplitudes  $\frac{e\phi_{\text{max}}}{k_B T_e} \sim 1$  et de très grandes longueurs d'ondes (quelques centaines de  $\lambda_D$ ) ainsi que des champs électriques fluctuants, intenses, localisés sur une dizaine de  $\lambda_D$  et associés à des creux de densité du plasma pouvant atteindre 50 %. Ces structures à petite échelle ayant une durée de vie de quelques dizaines de  $\omega_{p,i}^{-1}$ . Ces premiers résultats font l'objet d'une prochaine publication, probablement à Phys. Rev. Lett.. Le travail sera complété par l'étude du mouvement de particules tests dans le champ créé par le développement de l'instabilité de courant, pour déterminer si la diffusion des particules s'accompagne ou non d'une friction et de la formation locale de jets de particules rapides.

Ces simulations périodiques constituent une étape indispensable d'approfondissement des instabilités de courant, et montrent clairement que la physique des systèmes courts diffère grandement de celle des systèmes longs. Mais il est bien évident qu'une zone de transition séparant deux plasmas à des potentiels différents ne peut apparaître que dans un système non périodique. C'est pourquoi l'objectif fixé est la simulation de systèmes longs, avec conditions non périodiques et potentiel flottant en imposant seulement le courant électrique.

## IX.2 THEORIE DES GROUPES ET PHYSIQUE NON-LINEAIRE

### IX.2.1 Oscillateur anharmonique

Il s'agit d'étudier le système

$$\ddot{x} + A(t)x + B(t)x^3 = 0$$

où  $A(t)$  et  $B(t)$  décroissent asymptotiquement avec le temps respectivement comme  $\alpha t^{-\mu}$  et  $\beta t^{-\nu}$ ,  $\mu$  et  $\nu \in \mathbb{R}^+$ . On s'intéresse aux solutions asymptotiques. Les groupes de stricte invariance, par exemple auto-semblables, ne permettent que de résoudre le cas  $\mu = 2$ . On utilise les transformations canoniques généralisées et les groupes de quasi-invariances. Dans ce dernier formalisme on introduit une "échelle"  $C(t)$  judicieusement choisie et un nouveau temps  $\theta(t)$  comprimé autant que possible et si possible renormalisé. On montre comment doit être choisi  $C(t)$  (qui est à notre disposition) selon les valeurs des paramètres  $\mu$  et  $\nu$ ; on obtient dans tous les cas les solutions asymptotiques.

Ces résultats ont été partiellement publiés (129) et un article plus détaillé a été soumis pour publication.

### IX.2.2 Equation de la chaleur non-linéaire

Il s'agit de la solution auto-semblable de l'équation de diffusion  $\partial\psi/\partial t = \partial/\partial x [\psi^S \partial\psi/\partial x]$ . Cette solution, donnée par AMES à partir des groupes auto-semblables, apparait alors comme conséquence de la fusion des deux variables  $x$  et  $t$  en une variable réduite  $x(t/T)^{-\omega}$  où  $\omega$  prend la valeur particulière  $(S+2)^{-1}$ . En fait cette solution se retrouve comme solution stationnaire dans le nouvel espace et le nouveau temps de l'équation transformée par le groupe quasi-invariance. Il est alors particulièrement aisé d'étudier la stabilité. On a pu montrer que pour  $S < 1$ , cette solution était stable, ce qui a été confirmé par la résolution numérique directe de l'équation de départ. Ce travail partiellement publié (129) a donné lieu à un article de synthèse sur la question (en cours de publication).



### IX.2.3 Analyse des Equations de Vlasov Einstein en Géométrie Sphérique

Le travail sur l'expansion d'un gaz stellaire a été poursuivi par l'introduction de la théorie de la relativité générale. Il n'est malheureusement plus question de donner une solution explicite mais de montrer que le modèle initial non statique peut se transformer en un problème similaire mais cette fois statique : un exemple intéressant est l'obtention de la matrice de Schwarzschild et de la constante de "redshift" dans laquelle on montre après de longs calculs qu'il suffit de corriger par un terme de dérive Doppler et un terme de changement d'échelle. Il faut noter enfin qu'il faut dans ces calculs faire un choix entre l'invariance de l'élément de volume de l'espace des phases et l'invariance d'une des intégrales premières des géodésiques. C'est ce dernier point de vue qui a été adopté en conservant l'intégrale de l'énergie. Les interprétations physiques des différents résultats mathématiques obtenus dans ce travail en cours de publication dans *Astrophysical Journal* doivent être maintenant obtenues.

### IX.2.4 Oscillateur Harmonique Quantique Multidimensionnel avec Fréquences Dépendantes du Temps

Il s'agit de résoudre l'équation de Schroedinger associée à l'Hamiltonien :

$$H = (-1/2) \sum_{j=1}^N (\partial^2 / \partial x_j^2) + (1/2) \sum_{j=1}^N \omega_j^2(t) x_j^2$$

où les  $\omega_j^2(t)$  sont des fonctions arbitraires et différentes du temps. On utilise pour chaque variable des changements d'échelles différents. On montre alors qu'on peut ramener le problème à N équations découplées décrivant chacune soit un oscillateur harmonique à fréquence fixe, soit encore plus simple, une particule libre. La résolution numérique porte simplement sur les N équations différentielles découplées des oscillateurs classiques  $d^2 A_j / dt^2 + \omega_j^2(t) A_j = 0$  et sur une double transformation de Fourier qu'il faut effectuer de temps en temps pour réinitialiser le problème (les zéros de  $A_j$  constituant une singularité essentielle de la transformation dont il faut se débarrasser). La Philosophie de la méthode ressemble beaucoup à celle des Pas de Géants (Voir Rapports 77 et 78) et le problème est un excellent exemple de la philosophie analytico-numérique que le CRPE préconise et développe depuis plusieurs années. Il est enfin possible dans ce problème d'adopter une optique "quasi-particule" en utilisant la distribution de Wigner  $f$  qui permet, à partir de la fonction d'ondes  $\psi$  de définir, au moins comme outil mathématique, une distribution. Dans l'espace des

phases, cette dernière ayant pour l'oscillateur harmonique, la même équation d'évolution que des particules classiques, on peut résoudre le problème sans aucune approximation autre que la discrétisation à l'instant initial de la fonction de Wigner et à condition que l'on s'intéresse non à la fonction  $\psi$  mais aux observables que l'on peut déduire de cette fonction (le problème inverse de revenir à  $\psi$  à partir de  $f$  étant épouvantablement complexe) (106).

### IX.2.5 Equation de Schroedinger : Puits de Potentiel dont la longueur varie avec le temps

On considère le mouvement quantique unidimensionnel d'une particule dans un potentiel nul entre 2 barrières dont l'une est fixe et l'autre mobile (on connaît son mouvement) et infini à l'extérieur. Les transformations canoniques généralisées permettent de ramener le problème à celui d'un oscillateur harmonique dépendant du temps, soumis à des conditions aux limites fixes. Ce dernier problème peut être résolu par une méthode d'expansion et nous sommes ramenés à la solution d'équations différentielles couplées. Pour deux mouvements, l'intégration analytique du système est possible. Il s'agit d'un mouvement uniforme (ou l'on introduit une renormalisation du temps) et d'un mouvement en  $\sqrt{1+\Omega t}$  (compression logarithmique du temps). Ce travail est soumis pour publication.

### IX.3 STRUCTURE ET SIMULATION DES AUTOCOMMUTATEURS - RESEAUX DE CONNEXION

Les travaux de l'an dernier avaient permis de dégager les problèmes qui restaient en suspens. On pouvait recenser :

a) l'obtention de formules précises donnant la probabilité de blocage. Ces formules utilisées jusqu'à présent, utilisaient la théorie des graphes et calculaient le nombre de chemins possibles.

b) L'influence d'un surdimensionnement des matrices dans un réseau de Clos à 3 étages : (Etage d'entrée et de sortie,  $r$  blocs de  $(n \times m)$  sur lesquels arrivent ou partent  $r \times n$  lignes ; Etage central,  $m$  matrices de  $r \times r$ ). Le surdimensionnement consiste à prendre  $m > n$  et l'on sait que  $m = n$  est suffisant (à condition de réarranger les appels) et que  $m = 2n - 1$  permet de passer tous les appels quelle que soit la stratégie.

c) L'influence de la stratégie du choix de la matrice centrale lorsque plusieurs chemins sont possibles. On distingue trois stratégies. Au hasard : on choisit au hasard parmi tous les chemins possibles (c'est celle actuellement utilisée). Séquentiel : on essaye dans l'ordre la 1ère puis la 2nd puis la 3ème matrice. Saturation : On choisit la matrice la plus chargée.

d) L'obtention d'algorithme de réarrangeabilité si l'on veut minimiser le réseau et passer toutefois tous les appels.

e) La généralisation de ces résultats à des systèmes à plus de 3 étages.

Un résultat central obtenu a été la mise en évidence à la fois par des calculs théoriques et par des simulations numériques d'une "limite thermodynamique" qui permet de considérer le système comme extensif pour  $r$  (le nombre de blocs d'entrée) suffisamment grand. Dans la limite  $r \rightarrow \infty$  (pratiquement  $r \geq 60$ ) les probabilités de blocage sont indépendantes du nombre de blocs d'entrée. Le résultat est également valable si au lieu de modifier la taille des matrices centrales on rajoute 2 étages (un à l'entrée, l'autre à la sortie) pour traiter un plus grand nombre de lignes d'arrivée.

Cette "perspective thermodynamique" doit être contrastée avec une "perspective algébrique" où la prise en compte de toutes les successions d'appels possibles, tend à surdimensionner les systèmes et à introduire des matrices qui ne sont occupées qu'avec des probabilités tendant vers zéro comme  $\exp - N$  ( $N$  nombre de lignes) et que l'on peut supprimer sans difficulté. De plus cette perspective thermodynamique permet de calculer les probabilités de blocage à partir de grandeurs macroscopiques (comme le trafic écoulé relié par des équations simples au trafic demandé). Il en résulte sur les différents points mentionnés :

a) L'obtention pour une stratégie au hasard de formules de probabilité de blocage beaucoup plus précises que celles actuellement utilisées notamment pour les faibles probabilités de blocage où l'estimation par simulation numérique d'un évènement rare est toujours difficile. Ces formules ont été comparées avec les simulations et l'accord trouvé excellent.

b) Ces formules sont facilement étendues au cas où il y a surdimensionnement.

c) Une démonstration de la hiérarchie des stratégies par ordre d'efficacité croissante : hasard, séquentiel, saturation.

d) L'obtention d'un algorithme général de réarrangeabilité lors de l'arrivée d'un nouvel appel. Il a pu être aussi démontré que dans la limite  $r \rightarrow \infty$  le nombre de reroutages nécessaires tend vers une limite finie indépendante de  $r$  (le résultat algébrique prévoyait un maximum de  $r - 1$ ).

e) La simulation de réseaux à 5 étages et la vérification de l'extensivité sur ces réseaux.

Ces résultats ont été partiellement publiés (511). D'autres publications sont en cours.

## X. EXPERIENCES ACTIVES

### X.1 EXPERIENCE PICPAB (Phenomena Induced by Charged Particle Beams)

Dans le cadre du premier vol du SPACELAB, le CRPE/ORLEANS a la responsabilité de l'expérience Européenne d'injection de faisceaux de particules énergétiques (10 KeV, électrons et ions d'hydrogène  $H^+$ ,  $H_2^+$ ). Cette expérience (102) a pour but de déterminer les paramètres qui régissent les phénomènes complexes liés à la neutralisation du véhicule et des faisceaux eux-mêmes, aux interactions faisceaux/milieu ambiant et aux générations d'ondes par ces faisceaux.

En 1979, la réalisation du prototype a été terminée en collaboration très étroite avec trois autres laboratoires (LGE-France, NDRE-Norvège, SSD/ESTEC-Hollande). L'intégration des diverses parties réalisées dans les quatre laboratoires s'est achevée par un essai fonctionnel dans la grande chambre à vide (SIMLES) de la SOPEMEA à Toulouse sous l'égide du CNES. Dans cette enceinte de  $300\text{ m}^3$ , les accélérateurs et les diverses sondes de diagnostic ont été installés dans l'attitude qu'ils auront en vol les uns par rapport aux autres et par rapport au champ magnétique terrestre (voir fig. X-1b). Les conditions de vide attendues ( $10^{-4}$  à quelques  $10^{-7}$  Torr) furent systématiquement explorées et d'autre part l'enceinte était pourvue d'une source à plasma fournie par le C.R.P.E. simulant le plasma ionosphérique (de quelques  $10^4$  à  $10^6\text{ e/cm}^3$ ). Indépendamment du caractère technique de cet essai (cohabitation, EMI, etc...) cette expérience a produit des résultats tout à fait remarquables du point de vue scientifique bien que les conditions aux limites (volume restreint, effet des parois) soient très différentes du vol orbital. A titre d'exemple, la figure X-1a montre le spectrogramme d'ondes détectées au voisinage de la fréquence plasma pour différents cas de faisceaux et la figure X-2 illustre l'évolution de la fréquence plasma pendant l'un des pulses d'électrons.

Les conditions de fermeture du circuit global (faisceaux/courants de retour) ont été simulées également (différentes surfaces collectrices du courant de retour, cible "flottante" ou connectée à la masse). L'ensemble des résultats obtenus est en cours de dépouillement et fera l'objet de publications en 1980. Au C.R.P.E. l'expérience PICPAB implique plusieurs groupes.

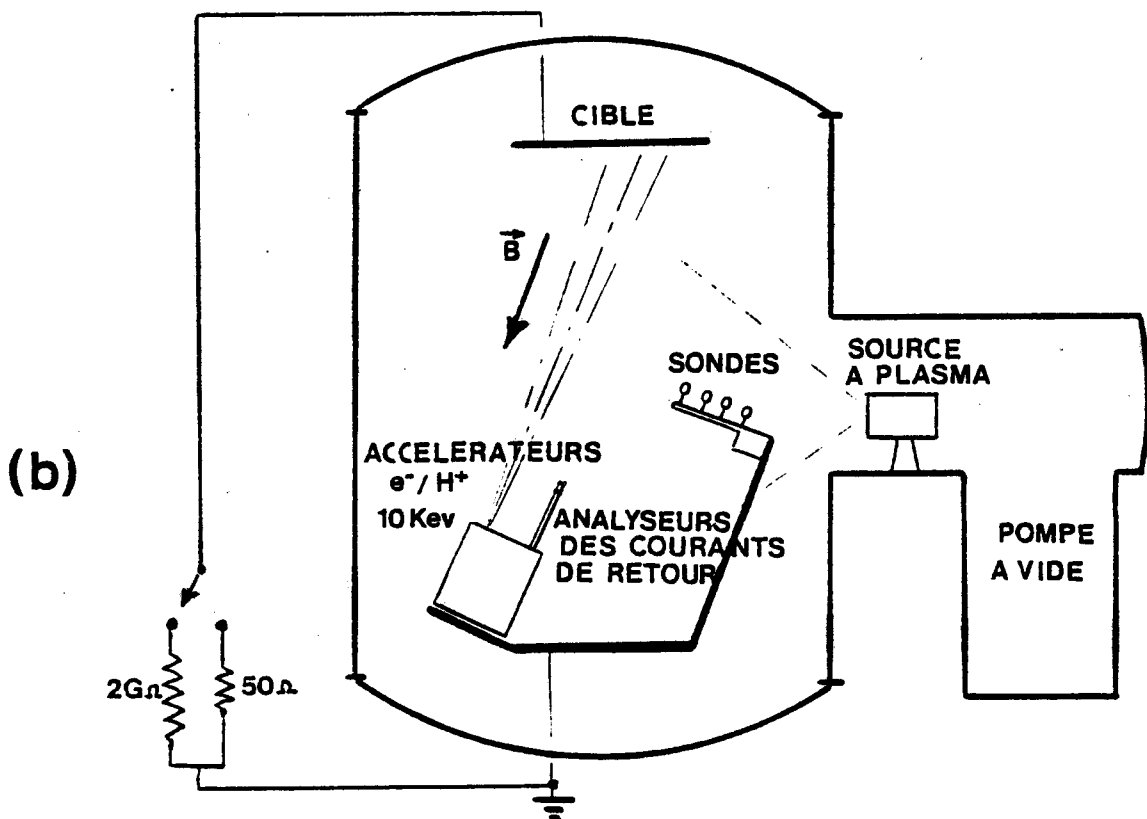
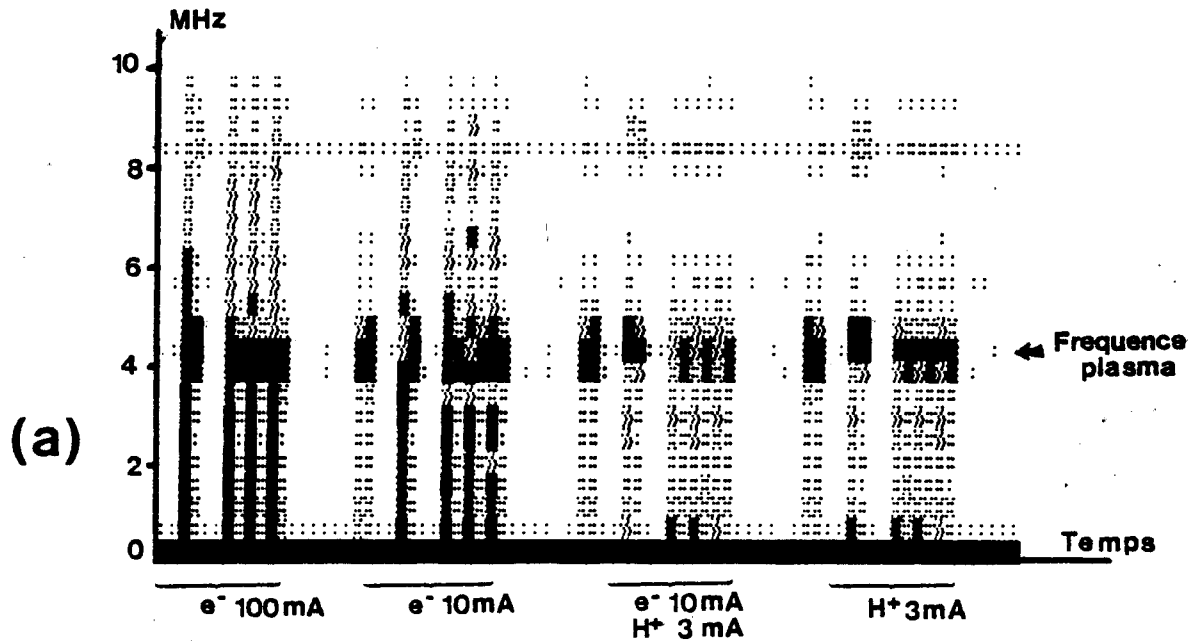
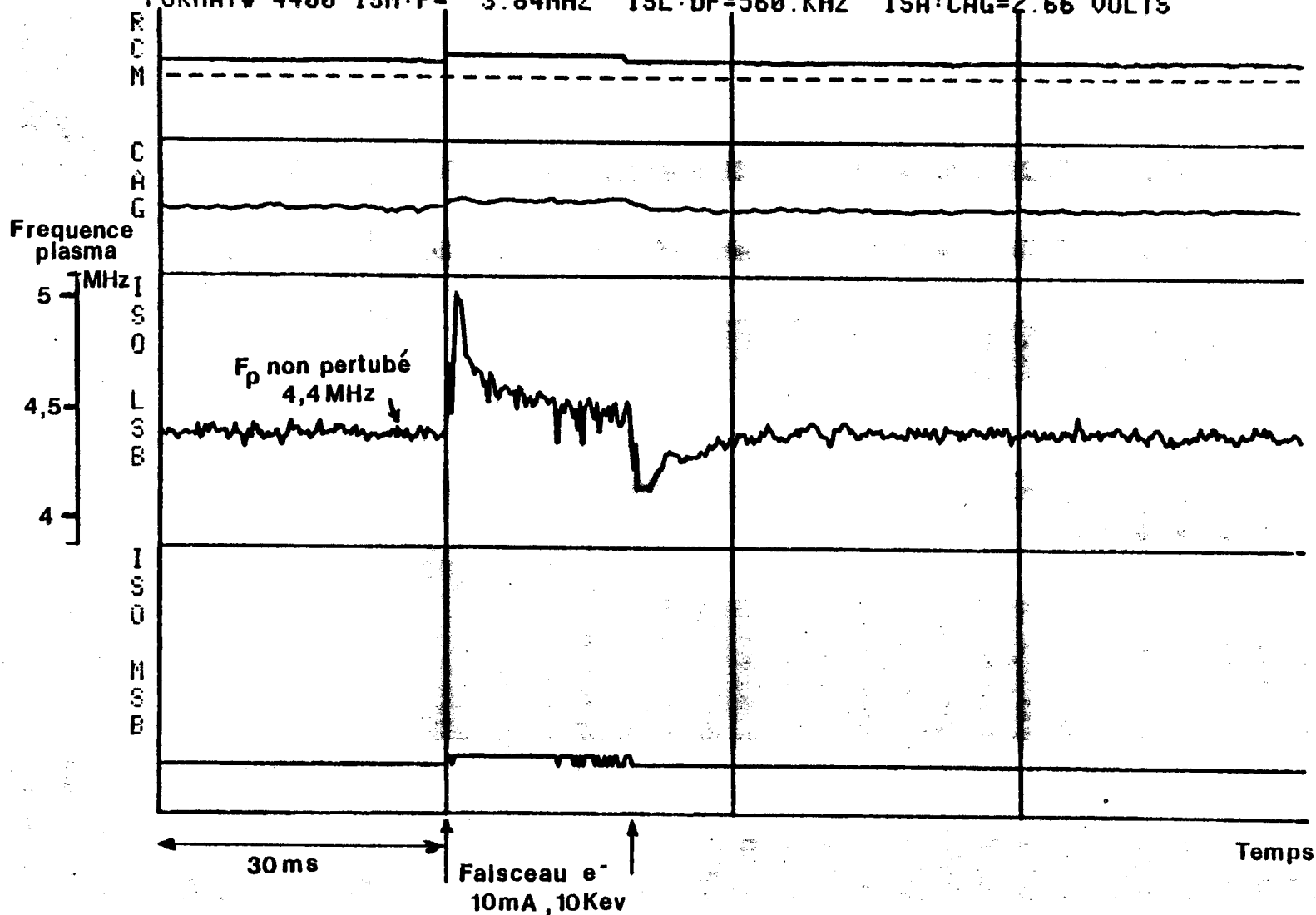


Figure X-1 (a) - Spectrogramme fortement condensé en temps du champ électrique HF déclenché par l'injection de différents faisceaux et mesuré à environ 2 m de l'axe de ces faisceaux.

(b) - Schéma du dispositif expérimental de l'expérience PICPAB dans l'enceinte SIMLES.

ESSAI SIMLES STEP#120 FORMAT COUNT# 15654 MSB SCALE= 20.48MHZ  
 FORMAT# 4400 ISM:F= 3.84MHZ ISL:DF=560.KHZ ISA:CAG=2.66 VOLTS



**Figure X-2** - Exemple de variation de la fréquence plasma mesurée à 2 m d'un faisceau d'électrons de 10 mA à 10 KeV de 20 ms de durée. Mesure obtenue à partir de la sonde auto-oscillante ISOPROBE avec une résolution temporelle de 0,5 ms.

## X.2 INTERACTION PARAMETRIQUE PAR RADAR

Durant l'année 1979 une expérience monostatique d'interaction non linéaire entre deux ondes haute fréquence a été réalisée à Saint-Santin. Le principe consiste à exciter une résonance propre du plasma ionosphérique par battement entre deux ondes électromagnétiques de fréquence nettement supérieures aux fréquences caractéristiques du milieu. L'onde fille ainsi créée est de nature électrostatique et peut être détectée après propagation par une des deux ondes mère suivant le principe de diffusion cohérente. Un système monostatique éliminait les échos parasites (type troposphérique ou aéronef) par une inhibition temporelle des signaux reçus (300  $\mu$ s après la fin d'émission). Malheureusement l'émetteur de Saint-Santin n'a pas été prévu pour fonctionner en impulsion, on ne peut supprimer l'émission qu'en annulant la tension d'excitation au niveau des premiers étages tout en laissant la haute tension ; cela a pour conséquence la présence d'un fort niveau de bruit ( $\sim 10000^\circ\text{K}$ ) même en l'absence d'émission.

Malgré ces inconvénients la campagne de mesure a permis de mettre en évidence divers problèmes liés à la propagation de l'onde fille quand elle est proche de la fréquence plasma (déviation latérale, amortissement Landau), problèmes qui seront facilement pris en compte dans le cadre des installations EISCAT. En revanche des échos nets ont été obtenus lorsque l'onde fille est proche de la résonance oblique ( $\omega_c \cos \theta$ ). Une campagne complémentaire devrait être prévue en 1980 pour asseoir avec certitude l'origine non linéaire de ces échos.

Cette expérience a été réalisée en commun entre le LGE et le CRPE.

## X.3 EXPERIENCE BA-GEOS

Cette expérience faite en collaboration avec l'Observatoire Ionosphérique de Uppsala (Suède) et l'Université Cornell (U.S.A.) consistait en l'éjection d'un pot de Baryum à partir d'une fusée tirée de Kiruna le 24 septembre 1979. Le C.R.P.E. Issy-les-Moulineaux a participé aux expériences de détection à bord de la même fusée des ondes électromagnétiques Très Basses Fréquences engendrées lors de l'éjection. Les résultats, en cours de dépouillement, montrent une absorption intense dans toute la gamme (0-10 KHz) pendant quelques secondes après l'éjection, ainsi qu'une émission quasi-monochromatique dans la partie basse fréquence du spectre ( $\lesssim 300$  Hz).



#### X.4 INJECTION D'ONDES TBF A PARTIR DU SOL ET DETECTION A BORD DE GEOS

Le satellite GEOS a permis de détecter diverses ondes TBF artificielles injectées par de puissants émetteurs situés en divers endroits et d'analyser les temps de propagation, l'intensité et la polarisation de ces ondes. En particulier, les ondes reçues à partir de l'émetteur NKL de Jim Creek ont été étudiées (113), celles reçues à partir d'Andoya (collaboration du CRPE avec le Laboratoire de Physique de l'Exosphère, Pr. Garnier) et de Skiboten (collaboration avec l'Université de Sheffield, Dr. Woolliscroft) sont en cours d'analyse ainsi que les réceptions de l'émetteur OMEGA.

#### X.5 THEORIE DE L'ABSORPTION INDUITE PAR LE PASSAGE D'UNE ONDE MONOCHROMATIQUE DE FORTE AMPLITUDE DANS LA MAGNETOSPHERE

On a proposé l'interprétation (109, 110) du phénomène d'évanouissement des bruits naturels tels que le souffle TBF, qui est observé dans une bande d'une centaine de Hertz en dessous de la fréquence porteuse d'un émetteur TBF puissant (Siple Station en Antarctique).

#### X.6 ETUDE DES ACCELERATEURS D'IONS

Parallèlement au développement d'une source d'ions à électrons oscillants (533) pour l'expérience PICPAB, l'étude des performances de différents types de sources susceptibles de constituer les accélérateurs d'ions de futures expériences actives a été poursuivie en 1979. Le but est de réaliser des accélérateurs fournissant des faisceaux monoénergétiques, neutralisés, d'une dizaine de KeV, de forte intensité (10-50 mA) et adaptés aux contraintes spatiales. Les trois types de sources en cours d'étude sont : à électrons oscillants (Saddle Field), source à champ radio- fréquence et "surfatron".

## **XL ASTRONOMIE DES CORPS METEORIQUES**

L'étude en astronomie des météores s'est développée suivant trois directions :

1) Une étude expérimentale qui a permis d'obtenir les données relatives aux orbites et aux masses des petits corps météoriques. Entre autres conséquences, ces données montrent : en allant des grandes vers les petites masses, on observe un nombre croissant d'orbites de petites dimensions, de plus faibles excentricités et, point important, de plus grandes inclinaisons par rapport à l'écliptique. Ces caractéristiques s'opposent à celles des météores photographiques, plus grandes dimensions et surtout, forte prédominance des orbites directes peu inclinées. Ces données sont bien en accord avec celles acquises par l'importante équipe russe de Kharkov et sont encore confirmées dans un article récent de la même équipe. Ces résultats sont les seuls qui jusqu'à présent, montrent l'importance relative croissante des orbites rétrogrades pour les corps météoriques de plus petite masse.

2) Une étude d'un modèle dynamique avec lequel on s'est proposé d'analyser l'évolution à long terme des orbites, ceci afin de fournir des éléments de réponse au problème des origines possibles des petits corps météoriques. Dans ce modèle, on a considéré des corps soumis aux attractions gravitationnelles du Soleil et de Jupiter, à des forces non gravitationnelles dues au rayonnement électromagnétique et corpusculaire solaire et à une érosion due au vent solaire. Des résultats obtenus, on dégage les points suivants :

- Les excentricités observées peuvent être supérieures aux valeurs initiales, au moment de l'éjection de la comète, ce qui ne peut être expliqué par l'action de la seule force dissipative de Poynting-Robertson, comme l'ont proposé certains auteurs. Ainsi, le grand nombre de valeurs d'excentricités observées, comprises entre 0,7 et 1 est explicable pourvu que les inclinaisons initiales soient suffisamment grandes, compte tenu que les excentricités initiales, attribuées à des comètes de courte période, sont en moyenne de 0,6 à 0,7.

- L'évolution déterminée par les perturbations jovienne et Poynting-Robertson peut être plus rapide que l'évolution associée seulement à la force dissipative.
- La contribution astéroïdale ne peut être que très faible.
- La réalité des grandes inclinaisons oblige, pour le problème des origines, à ne pas se limiter aux seules comètes à courte période.

3) Une étude de mécanique céleste, devenue autonome, mais à l'origine conçue pour établir les bases théoriques nécessaires au modèle d'évolution dynamique discuté en 2). On s'est intéressé au problème restreint des trois corps, avec de grandes excentricités et inclinaisons. Les paramètres du développement de perturbations sont la masse relative de Jupiter et le rapport des grands axes  $\alpha$ . On a obtenu d'une manière rigoureuse :

- les amplitudes des variations à longue période des paramètres orbitaux pour des rapports dépassant 0,5, ceci pour les cinq premiers ordres du développement en  $\alpha$ .
- la loi temporelle de ces variations pour les deux premiers ordres en  $\alpha$ . Au deuxième ordre, la solution exacte s'exprime à l'aide des fonctions thêta-abéliennes qui généralisent d'une certaine manière les fonctions thêta-elliptiques utilisées pour le premier ordre.
- les solutions stationnaires du système différentiel pour les quatre premiers ordres en  $\alpha$ .

Enfin, à l'aide d'une approximation de nature géométrique, la loi temporelle a été étendue aux deux ordres suivants.

Les trois études sont achevées (mémoire de thèse en cours de rédaction). On a montré l'intérêt que présentent les résultats expérimentaux pour une meilleure compréhension de l'origine et de l'évolution du complexe météorique. Le modèle d'évolution à long terme des orbites héliocentriques perturbées par les forces gravitationnelles et dissipatives n'avait jamais été étudié jusqu'à présent (218). Enfin, on a apporté des résultats originaux dans l'étude de mécanique céleste citée en 3) (article à soumettre à *Celestial Mechanics*).

## **XII. ETUDES DIVERSES - QUELQUES REALISATIONS TECHNIQUES**

### **XII.1 CHARGE UTILE DE SATELLITE DE TELECOMMUNICATIONS**

Cette étude a été entreprise fin 1978 dans le cadre de l'évolution des programmes du CRPE vers des objectifs présentant un intérêt pour les Télécommunications. Après une étude prospective, un programme concernant l'Accès Multiple à Répartition dans le Temps avec commutation à bord du satellite a été élaboré (315). Il se décompose en deux phases principales :

Phase I : étude et réalisation d'une unité de commande pour une matrice de commutation hyperfréquence,

Phase II : commutation en bande de base et étude des problèmes de synchronisation.

En ce qui concerne la phase I qui devrait s'achever en 1980, les spécifications de l'unité de commande ont été définies et les travaux en laboratoire ont démarré au dernier trimestre 1979.

En parallèle avec cette activité un effort de réflexion a été fait en vue de définir des expériences de propagation sur les trajets "Terre-Satellites" aux fréquences 20 et 30 GHz qui pourraient être utilisées de manière opérationnelle à la fin de la décennie 80. Un projet d'étude de faisabilité est en cours de rédaction.

Par ailleurs, dans le cadre de la formation des chercheurs du CRPE aux techniques des télécommunications, un ingénieur du CRPE est parti en janvier 1979 dans un laboratoire de la COMSAT pour y effectuer un stage d'un an. Durant le premier semestre, il a participé à une expérience de transmission de données à fort débit (1,5 Mb/s) entre ordinateurs reliés par satellite (application au partage de charge entre ordinateurs). Lors du second semestre il s'est intéressé à la modélisation des canaux de transmissions par satellite. Ces travaux ont fait l'objet de deux documents de travail (509, 510).

### **XII.2 CARACTERISATION DES SURFACES PAR MICROSCOPIE AUGER ET MICROSCOPIE ELECTRONIQUE A MIROIR**

On étudie les cinétiques d'absorption de l'oxygène sur diverses surfaces métalliques en corrélant la hauteur du pic Auger de l'oxygène avec les variations du

potentiel de surface mesurées par un Microscope Electronique à Miroir (M.E.M.).

Au cours de l'année passée, les mécanismes d'oxydation sur les 3 faces (148, 202, 238) du Cuivre qui est un matériau de base des contacts électriques de relais téléphoniques ont ainsi été déterminés. Cette étude faite en collaboration avec la Laboratoire de Chimie des Solides de l'Université d'Orléans (Professeur J. Bardolle) s'inscrit dans le Cadre de l'Action coordonnée contacts électriques dirigée par le CNET LANNION.

L'oxydation à très basse pression et en fonction de la température de titane polycristallin dans le cadre de la RCP Titane a également été étudiée. Les résultats, qui seront prochainement communiqués à la 4ème Conférence Internationale sur le Titane (KYOTO, 19-22 mai), mettent en évidence une incorporation de l'oxygène sous la surface du titane dans les premiers instants de l'oxydation. L'importance et la durée de cette incorporation augmentent avec la température.

En collaboration avec le Centre d'Etudes Nucléaires de SACLAY (C. Legressus) et l'INSA de LYON (C. Guittard), on a enfin étudié l'interaction des électrons de basse énergie avec une surface d'aluminium polycristallin propre et oxydée. Cette étude qui se poursuit actuellement consiste à corréliser le spectre de pertes électroniques avec la courbe réponse du Microscope Electronique à Miroir pour mieux comprendre l'origine des différents pics de perte qui apparaissent pendant l'oxydation de l'aluminium. Il faut noter que cette méthode est beaucoup plus sensible que l'analyse Auger classique.

### XII.3 COMPRESSION DE DONNEES

Dans le cadre d'une étude de compression de données de télédétection, il a été développé une méthode d'analyse spectrale en temps réel des signaux d'un radar à synthèse d'ouverture et de génération en temps quasi-réel d'une estimation de l'imagerie radar. Des dispositifs utilisant cette méthode pourront être embarqués, à bord de satellites de télédétection, comme interfaces entre un radar à synthèse d'ouverture et un canal de transmission de capacité relativement réduite (141).

Cette technique, qui a fait l'objet d'une demande de dépôt de brevet, permettra d'éviter la transmission de données aux débits très élevés que requiert généralement le radar à synthèse d'ouverture.

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

Directeur : J. HIEBLOT

Secrétaire : J. PERROT

Directeur Adjoint : I. REVAH

Secrétaire : N. ADANE

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

Secrétaire : J. GUITTARD

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

Groupe MOYENS GENERAUX CRPE (MGC)

Chef du groupe : M. MARTINEZ

Echelon Issy-les-Moulineaux

M. LANGERMAN

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

Echelon d'Orléans

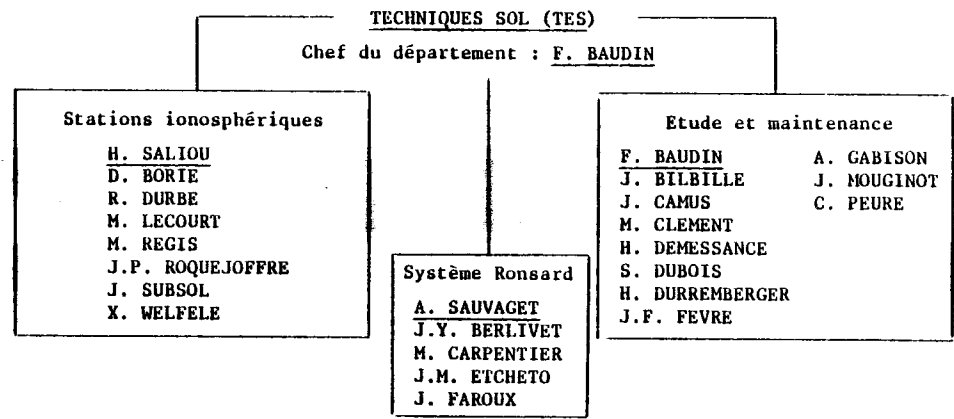
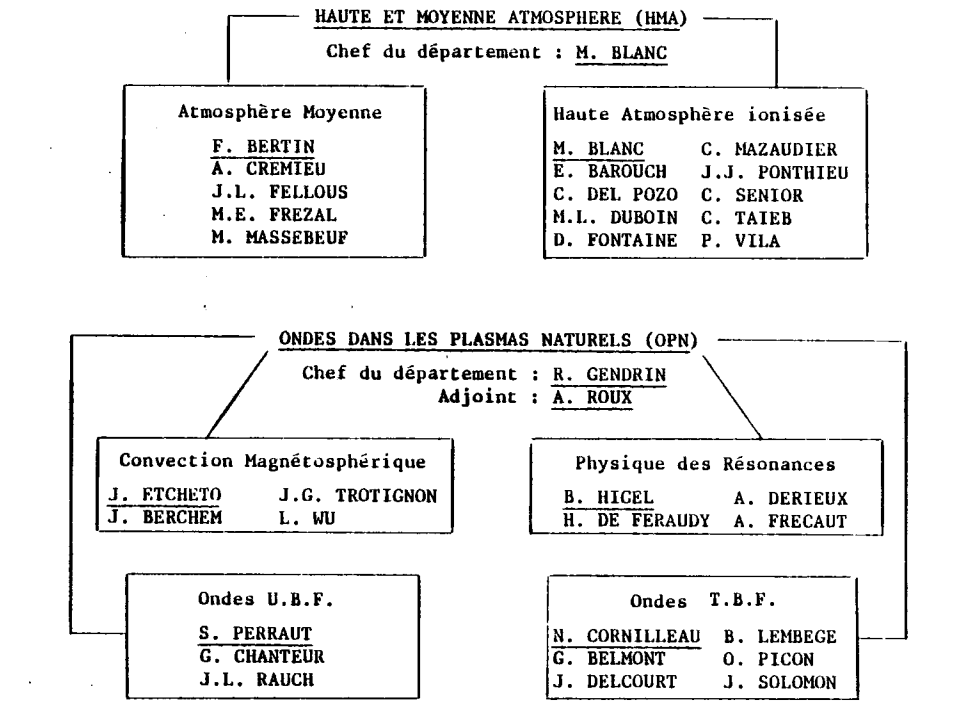
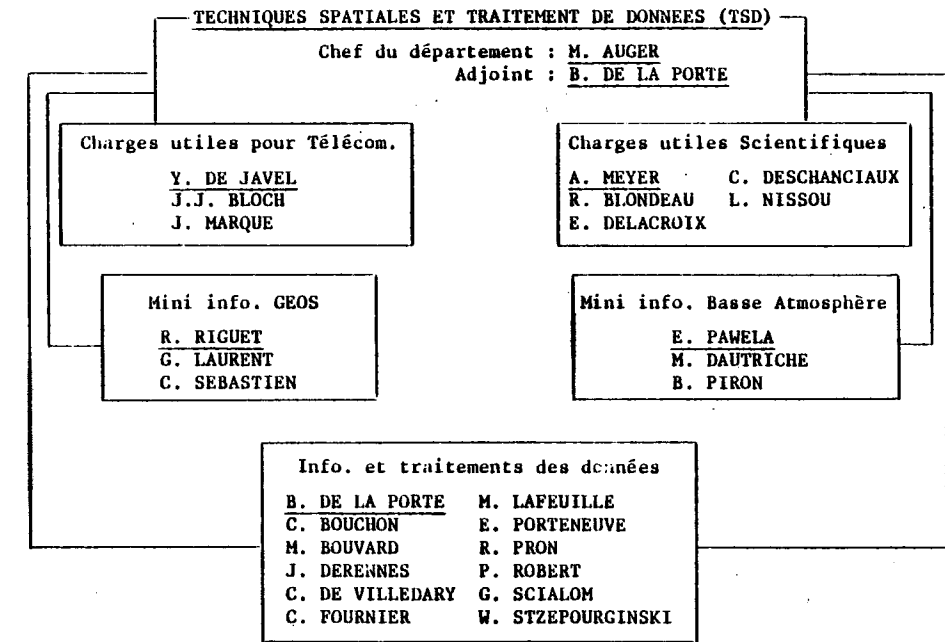
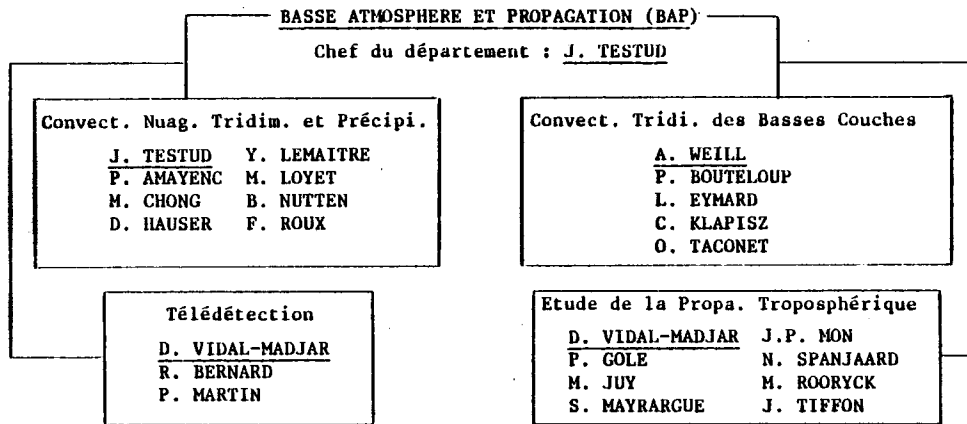
D. ROSSIGNOL

J.P. BUREAU  
C. CHUDY  
MH. DERVILLERS  
J. DUMUIDS  
D. LHUILLIER  
C. MARCADET

Divers et Détachés

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

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

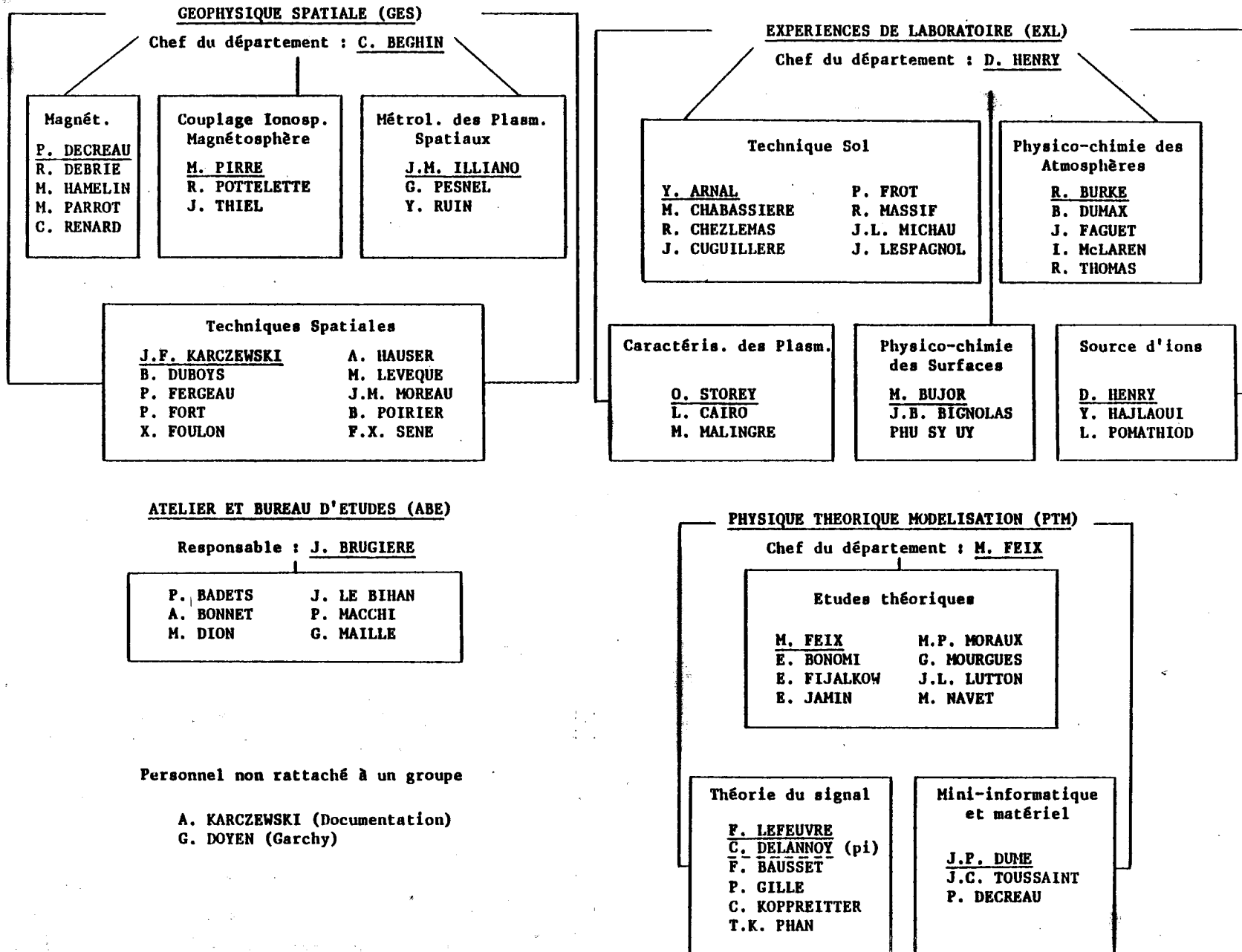


Personnel non rattaché à un groupe

J. JABOIN    Documentaliste  
 M. LE FLOCH    "

ECHELON D'ORLEANS

Conseiller Scientifique : O. STOREY





**BIBLIOGRAPHIE**

REVUES ET OUVRAGES COLLECTIFS

- (101) ALCAYDE D., FONTANARI J., KOCKARTS G., BERNARD R., BAUER P., Temperature, molecular nitrogen concentration and turbulence in the lower thermosphere inferred from incoherent scatter data, Ann. Géophys., 35, 41-51, 1979.
- (102) BEGHIN C., Plasma Physics Investigations on the First Spacelab Payload, ESA J., 3, 123-133, 1979.
- (103) BLANC M., Electrodynamics of the ionosphere from incoherent scatter: A review, J. Geomagn. Geoelect., 31, 137-164, 1979.
- (104) BLANC M., AMAYENC P., Seasonal variations of the ionospheric  $E \times B$  drifts above St-Santin on quiet days, J. Geophys. Res., 84, 2691-2704, 1979.
- (105) BONOMI E., E. JAMIN, M. NAVET and M.R. FEIX, Wall effects in one-dimensional jellium, Phys. Lett., 70A, 199-201, 1979.
- (106) BURGAN J.R., M.R. FEIX, E. FIJALKOW and A. MUNIER, Solution of multidimensional quantum harmonic oscillator with time-dependent frequencies through Fourier, Hermite and Wigner transforms, Phys. Lett., 74A, 11-14, 1979.
- (107) CHANG J.S. and K. KODERA, Theory of mass-discrimination effects in ion extraction from a plasma of wide pressure range, Int. J. Mass Spectr. Ion Phys., 29, 261-267, 1979.
- (108) 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 relationship with plasma parameters, in Advances in Magnetospheric Physics with GEOS-1 and ISEE, Eds. KNOTT K., DURNEY A. & OGILVIE K., 63-80, D. Reidel, 1979.
- (109) CORNILLEAU-WEHRLIN N., GENDRIN R., VLF transmitter-induced quiet bands: A quantitative interpretation, J. Geophys. Res., 84, 882-890, 1979.

- (110) CORNILLEAU-WEHRLIN N., GENDRIN R., Quenching of natural cyclotron instability by large amplitude monochromatic waves propagating in an inhomogeneous medium, in Waves Instabilities in Space Plasmas, Eds. PALMADESSO P. & PAPADOPOULOS K., 217-223, D. Reidel, 1979.
- (111) CORNILLEAU-WEHRLIN N., GENDRIN R., LEFEUVRE F., PARROT M., GRARD R., JONES D., BAHNSEN A., UNGSTRUP E., GIBBONS W., VLF electromagnetic waves observed onboard GEOS-1, in Advances in Magnetospheric Physics with GEOS-1 and ISEE, Eds. KNOTT K., DURNEY A. & OGILVIE K., 51-62, D. Reidel, 1979.
- (112) CORNILLEAU-WEHRLIN N., GENDRIN R., TIXIER M., VLF waves : conjugated ground-satellite relationships, In Advances in Magnetospheric Physics with GEOS-1 and ISEE, Eds. KNOTT K., DURNEY A. & OGILVIE K., 99-111, D. Reidel, 1979.
- (113) CORNILLEAU-WEHRLIN N., GENDRIN R., PEREZ R., Reception of the NKL (Jim Creek) transmitter onboard GEOS-1, in Advances in Magnetospheric Physics with GEOS-1 and ISEE, Eds. KNOTT K., DURNEY A. & OGILVIE K., 123-131, D. Reidel, 1979.
- (114) DEBRIE R. and J. PIGNARD, Continuous measurement of electron density in unmagnetised plasmas by a self-oscillating probe, Electron. Lett., 15, 799-800, 1979.
- (115) DECREAU P.M.E., Physique de la magnétosphère, Symbioses, XI, 39-46, 1979.
- (116) DECREAU P.M.E., C. BEGHIN and M. PARROT, Electron density and temperature, as measured by the mutual impedance experiment onboard GEOS-1, in Advances in magnetospheric physics with GEOS-1 and ISEE, Eds. KNOTT K., DURNEY A. & OLGIVIE K., 261-275, D. Reidel, 1979.
- (117) DECREAU P.M.E., ETCHETO J., KNOTT K., PEDERSEN A., WRENN G.N., YOUNG D.T., Multi-experiment determination of plasma density and temperature in Advances in Magnetospheric Physics with GEOS-1 and ISEE, Eds. KNOTT K., DURNEY A. & OGILVIE K., 313-325, D. Reidel, 1979.

- (118) ETCHETO J., BLOCH J.J., Plasma density measurements from the GEOS-1 relaxation sounder, in Advances in Magnetospheric Physics with GEOS-1 and ISEE, Eds. KNOTT K., DURNEY A. & OGILVIE K., 277-290, D. Reidel, 1979.
- (119) EYMARD L., WEILL A., A study of gravity waves in the planetary boundary layer by acoustic sounding, Bound. Layer Meteor., 17, 231-245, 1979.
- (120) FAYNOT J.M., VILA P., F-region strata at the magnetic equator, Ann. Géophys., 35, 1-9, 1979.
- (121) FIJALKOW E. and G. MOURGUES, Radiation potential of a point antenna immersed in drifting cold or hot (hydrodynamical) plasma. Comput. Phys. Comm., 18, 297-304, 1979.
- (122) GABISON A., GENDRIN R., 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., 34, 158-165, 1979.
- (123) GENDRIN R., Wave & Plasma diagnostic with the European geostationary satellite GEOS, in Proceedings of the International Workshop on selected Topics of Magnetospheric Physics, ed. T. Obayashi, Tokyo, 193-197, 1979.
- (124) GENDRIN R., LAURENT G., Investigation of the chevron structure of some Pc 1 pulsations, Geophys. Res. Lett., 6, 197-200, 1979.
- (125) GENDRIN R., S. PERRAUT, A. ROUX, GEOS observations of ULF waves, in Proceedings of the International Workshop on selected Topics of Magnetospheric Physics, ed. T. Obayashi, Tokyo, 139-142, 1979.
- (126) GENDRIN R., PERRAUT S., FARGETTON H., GLANGEAUD F., LACOUME J.L., ULF waves : conjugated ground-satellite relationships, in Advances in Magnetospheric Physics with GEOS-1 and ISEE, Eds. KNOTT K., DURNEY A. & OGILVIE K., 113-122, D. Reidel, 1979.
- (127) GENDRIN R., VILLEDARY de C., Unambiguous determination of fine structures in multicomponent time-varying signals, Ann. Télécomm., 34, 122-130, 1979.

- (128) GENDRIN R., VILLEDARY de C., Apparent and real fine structures in magnetospheric ULF or VLF emissions, J. Geophys. Res., 84, 5839-5849, 1979.
- (129) GUTIERREZ J., A. MUNIER, J.R. BURGAN, M.R. FEIX, E. FIJALKOW, Non-linear transport equations : properties deduced through transformation groups, in : Non linear problems in theoretical physics, Ed. RAÑADA A.S., 151-204, Springer-Verlag, 1979.
- (130) HARVEY C.C., ETCHETO J., MANGENEY A., Early results from the ISEE density experiment, Space Sci. Rev., 23, 39-58, 1979 ; and in Advances in Magnetospheric Physics with GEOS-1 and ISEE, Eds. KNOTT K., DURNEY A. & OGILVIE K., 533-552, D. Reidel, 1979.
- (131) HIGEL B., Small scale structure of magnetospheric electron density through on-line tracking of plasma resonances, in Advances in Magnetospheric Physics with GEOS-1 and ISEE, Eds. KNOTT K., DURNEY A. & OGILVIE K., 291-311, D. Reidel, 1979.
- (132) ILJICHEV Y.D., PORTNYAGIN Y.I., GLASS M., FELLOUS J.L., Quelques aspects de la structure verticale du champ de vent dans la zone météorique, Ann. Géophys., 35, 97-102, 1979.
- (133) ILLIANO J.M. and R. POTTELETTE, Measurement of the collective motion of the electrons deduced from the shift of the lower oblique resonance frequency, Phys. Lett., 70A, 315-316, 1979.
- (134) LEFEUVRE F. and C. DELANNOY, Analysis of a random electromagnetic wave field by a maximum entropy method, Ann. Télécomm., 34, 204-213, 1979.
- (135) LEFEUVRE F. and M. PARROT, The use of the coherence function for the automatic recognition of chorus and hiss observed by GEOS-1, J. Atmos. Terr. Phys., 41, 143-152, 1979.
- (136) LEMBEGE B., Method for predicting the properties of cyclotron harmonic waves from the perpendicular dispersion relation, J. Plasma Phys., 22, 231-244, 1979.

- (137) LEMBEGE B., Theoretical method for predicting the properties of cyclotron harmonic waves from the perpendicular dispersion relation, XIV<sup>e</sup> Conférence Internationale sur les Phénomènes d'Ionisation dans les Gaz, Grenoble, France, 9 - 13 juillet 1979, (J. Phys., C 7, 615-616, 1979).
- (138) LEMBEGE B., Antenna radiation pattern of cyclotron harmonic waves in a hot magnetoplasma, Radio Sci., 14, 487-502, 1979.
- (139) LOISIER G., CORNILLEAU-WEHRLIN N., GENDRIN R., Détermination des directions de normale d'onde de signaux variant dans le temps. Application aux émissions naturelles TBF détectées à bord de satellites, Ann. Télécomm., 34, 214-219, 1979.
- (140) MALINGRE M., Rayonnement d'ondes acoustiques ioniques par une source ponctuelle pulsante dans un magnétoplasma chaud, C.R. Acad. Sc. Paris, 289B, 257-260, 1979.
- (141) MARTIN Ph., An application oriented processing scheme for Sar data specialized in the determination of the wave directional spectrum, in Seasat-Sar Processor, ESA SP/154 Preprint, 75-80, 1979.
- (142) MASSEBEUF M., BERNARD R., FELLOUS J.L., GLASS M., The mean zonal circulation in the meteor zone above Garchy (France) and Kiruna (Sweden), J. Atmos. Terr. Phys., 41, 647-655, 1979.
- (143) MOBIUS E., R.B. BOSWELL, A. PIEL and D. HENRY, A Spacelab experiment on the critical ionization velocity, Geophys. Res. Lett., 6, 29-31, 1979.
- (144) MUNIER A., M. FEIX, E. FIJALKOW, J.R. BURGAN and J. GUTIERREZ, Time dependent solution for a self-gravitating star system, Astron. Astrophys., 78, 65-74, 1979.
- (145) NUTTEN B., AMAYENC P., CHONG M., HAUSER D., ROUX F., TESTUD J., The Ronsard Radars: A versatile C-band dual Doppler facility, IEEE Trans., GE-17, 281-288, 1979.

- (146) NUTTEN B., HAUSER D., ROUX F., SCIALOM G., The Ronsard Radars : Internal calibration techniques using coherent and noise sources, IEEE Trans., GE-17, 288-295, 1979.
- (147) OHNUMA T., LEMBEGE B., Determination of magnetic field lines by measuring trajectories of lower hybrid cones, IEEE Trans., PS-7, 234-235, 1979.
- (148) PANTEL R., M. BUJOR and J. BARDOLLE, Oxygen absorption on various vicinal faces close to the (0001) basal plane of rhenium, Surface Sci., 83, 228-242, 1979.
- (149) PERRAUT S., GENDRIN R., ROBERT P., ROUX A., Magnetic pulsations observed onboard GEOS-2 in the ULF range during multiple magnetopause crossings, in Magnetospheric Boundary Layers, ESA SP/148, 113-122, 1979.
- (150) PERRAUT S., GENDRIN R., ROBERT P., ROUX A., VILLEDARY de C., JONES D., ULF waves observed with magnetic and electric sensors on GEOS-1, in Advances in Magnetospheric Physics with GEOS-1 and ISEE, Eds. KNOTT K., DURNEY A. & OGILVIE K., 27-49, D. Reidel, 1979.
- (151) PIRRE M., M. HAMELIN, T.R. SANDERSON and G.L. WEBB, A method to measure the D.C. electric field in the vicinity of a spacecraft using artificially injected charged particles, Ann. Géophys., 35, 177-188, 1979.
- (152) POTTELETTE R., Measurement of the cross spectrum of random linear electrostatic waves in an isotropic Maxwellian plasma, Phys. Fluids, 22, 534-541, 1979.
- (153) ROBERT P., KODERA K., PERRAUT S., GENDRIN R., VILLEDARY de C. Amplitude et polarisation des ondes UBF détectées à bord du satellite GEOS-1. Méthodes d'analyse, problèmes rencontrés et solutions pratiques, Ann. Télécomm., 34, 179-186, 1979.
- (154) ROORYCK M., Validity of two-path model for calculating quality of digital radio links ; determination of model from measurements on analogue links, Electron. Lett., 15, 783-784, 1979.

- (155) ROUX A., PELLAT R., POLY.), Coherent generation of the auroral kilometric radiation by nonlinear heatings between electrostatic waves, J. Geophys. Res., 84, 5189-5198, 1979.
- (156) S-300 EXPERIMENTERS, Measurements of electric and magnetic wave fields and of cold plasma parameters onboard GEOS-1 - Preliminary results, Planet. Space Sci., 27, 317-339, 1979.
- (157) 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, 255-269, 1979.
- (158) THOMAS R., J. BARASSIN et A. BARASSIN, Mobilités et coefficients de diffusion longitudinale des ions :  $\text{Ar}^+$  et  $\text{CH}_x^+$  dans l'hélium, Int. J. Mass Spectrom. Ion Phys., 31, 227-236, 1979.
- (159) VAN GRUNDERBEECK P., LE BERRE P., WEILL A., DUBOSCLARD G., ITIER I., Mouvements convectifs de la couche limite atmosphérique observés au moyen de sondeurs acoustiques Doppler et d'instruments portés par un ballon captif, C.R. Acad. Sc. Paris, 288B, 209-212, 1979.
- (160) VIDAL-MADJAR D., Medium scale gravity waves and their nonlinear interaction with the mean flow : a numerical study, J. Atmos. Terr. Phys., 41, 279-292, 1979.

COMMUNICATIONS A DES COLLOQUES

- (201) ARNAL Y., D. HENRY et L. POMATHIOD, Développement d'un injecteur d'ions à partir d'une source du type à "électrons oscillants" pour une expérience embarquée sur la première navette spatiale, Assemblée Annuelle de la Société Française de Physique, Toulouse, France, 25-30 juin 1979.
- (202) BARDOLLE J., SIMON D., et M. BUJOR, Contribution à l'étude de la contamination dans diverses atmosphères, de l'argent, du cuivre et d'alliages AgCu et AgPd utilisés dans les contacts électriques, Journées d'Etudes "Contacts Electriques", ESE, Plateau du Moulon, Gif/Yvette, France, 1-8 juin 1979.
- (203) BAROUCH E., Incident auroral electron spectra derived from incoherent scattering measurements, Vith Annual E.G.S. Meeting, Vienne, Autriche, 11-14 septembre 1979.
- (204) BAUER P., Earlier work with incoherent scatter above St-Santin, Proceedings of the EISCAT Winter School, Oberstdorf, R.F.A., janvier, 1979.
- (205) BERTIN F., Transfert d'énergie et mouvements organisés dans l'atmosphère moyenne, Colloque MAP, Palaiseau, France, 26 avril 1979.
- (206) BLANC M., Investigation of the dynamics of the equatorial ionosphere with an incoherent scatter radar, COSPAR XXIIInd Plenary Meeting, Bangalore, Inde, 29 mai - 09 juin 1979.
- (207) BLANC M., Electric fields at thermospheric heights derived from backscatter measurements, XVIIth I.U.G.G. General Assembly, Canberra, Australie, 02-15 décembre 1979.
- (208) BLANC M., Coupling of high and middle latitudes in the thermosphere and ionosphere, XVIIth I.U.G.G. General Assembly, Canberra, Australie, 02-15 décembre 1979.
- (209) BLANC M., DUBOIN M.L., PONTHEIU J.J., Particle and Joule heating deduced from high latitude soundings, Vith Annual E.G.S. Meeting, Vienne, Autriche, 11-14 septembre 1979.



- (210) BLANC M., RICHMOND A.D., The ionospheric disturbance dynamo, XVIIth I.U.G.G. General Assembly, Canberra, Australie, 02-15 décembre, 1979.
- (211) BURGAN R., M. FEIX, E. FIJALKOW, M.P. MORAUX, A. MUNIER and J. GUTIERREZ, Group theory methods and partial derivative equations, International Conference on Mathematical Physics, Lausanne, Suisse, 19-26 août 1979.
- (212) BURKE R., Agrégation de  $(H^+) H_2O_n$  avec  $H_2O$  vers 150 K, Séminaire présenté au Groupe Physique des Plasmas, Orsay, France, 31 mai 1979.
- (213) BURKE R., Study of the  $CH_3^+ + NH_3$  reaction in the selected ion drift-tube, Research Colloquium, Liverpool, Grande-Bretagne, 4-5 avril 1979.
- (214) BURKE R., FAGUET J., and WAYNE R.P., Clustering of  $H^+(H_2O)$  with  $H_2O$  at low temperatures, 8th International Mass Spectrometry Conference, Oslo, Norvège, 12-18 août 1979.
- (215) CORNILLEAU-WEHRLIN N., GENDRIN R., Electrostatic ELF waves amplitude modulated by ULF waves, XVIIth I.U.G.G. General Assembly, Canberra, Australie, 02-15 décembre 1979.
- (216) CORNILLEAU-WEHRLIN N., SOLOMON J., KORTH A., KREMSER G. Comparison between the quasi linear theory and measurements of ELF waves and particles onboard GEOS-1, XVIIth I.U.G.G. General Assembly, Canberra, Australie, 02-15 décembre 1979.
- (217) DECREAU P.M.E., C. BEGHIN and M. PARROT, Properties of the thermal plasma observed on the satellites GEOS 1 and 2 by the mutual impedance experiment, First International Symposium IMS results, SCOSTEP-IAGA, Melbourne, Australie, 27 nov. - 1er déc. 1979.
- (218) DELCOURT J., Experimental and theoretical study of radiometers, International Astronomical Union Symposium, n° 90, Ottawa, Canada, 27-30 août 1979.
- (219) ETCHETO J., HARVEY C., MANGENEY A., DOBROWOLNY M., MORENO G., BONIFAZI C., CATTANEO M.B., ORSINI S., Plasma and turbulence in the solar wind from ISEE 1 and 2 experiments, VIth Annual E.G.S. Meeting, Vienne, Autriche, 11-14 septembre 1979.

- (220) ETCHETO J., HARVEY C., OLGIVIE K.W., SCUDDER J.D., Wave particle interactions onboard ISEE 1, a study of electron burst noise in the solar wind, Vith Annual E.G.S. Meeting, Vienne, Autriche, 11-14 septembre 1979.
- (221) FEIX M., Cours sur la physique des plasmas Consejo Superior de Investigaciones Cientificos, Madrid, Espagne, 5-12 novembre 1979.
- (222) GOUGH M.P., CHRISTIANSEN P.J., JONES D., ETCHETO J., CORNILLEAU N., Strong electronic waves and related phenomena detected by the GEOS 1 and 2 satellites, Vith Annual E.G.S. Meeting, 11-14 septembre 1979.
- (223) JONES D., KORTH A., PERRAUT S. RONNMARK K., YOUNG D., Electrostatic waves associated with harmonics of the He<sup>+</sup> cyclotron frequency observed on GEOS-1 at 6-7 RE, Vith Annual E.G.S. Meeting, Vienne, Autriche, 11-14 septembre 1979.
- (224) JONES D., CHRISTIANSEN P.J., GOUGH M.P., CORNILLEAU N., ETCHETO J., Non thermal continuum radiation in the earth's magnetosphere, Vith Annual E.G.S. Meeting, Vienne, Autriche, 11-14 septembre 1979.
- (225) JONES D., E. FIJALKOW, J.P. LEBRETON and G. MOURGUES, Measurement of the drift velocity in a space simulation plasma with a two electrodes probe, Waves and instabilities in space plasma, Denver, Colorado, U.S.A., 7-9 août 1979.
- (226) KARCZEWSKI J.F., Les fluxmètres, Exposé de synthèse, Colloque Magnétisme, Grenoble, France, 15 novembre 1979.
- (227) KLAPISZ C., Interprétation des mesures Sodar, Journées d'Etude sur la Couche Limite Atmosphérique, Marseille, France, 19-21 mars 1979.
- (228) MARTIN Ph., Image spectra from raw data, 2nd Seasat-Sar Processing Workshop, Frascati, Italie, 10-12 décembre 1979.
- (229) MAZAUDIER C., The circulation of electric currents above St-Santin: A preliminary study, XVIIth I.U.G.G. General Assembly, Canberra, Australie, 02-15 décembre 1979.

- (230) MORAUX M.P., Group transformation and applications to equations of mathematical physics, Institut de Physique des Plasmas (FOM), Jutphaas, Hollande, 29 novembre 1979.
- (231) NAVET M., Intérêts et difficultés des plasmas denses à une composante, Séminaire Turbulence, Paris, France, 22 novembre 1979.
- (232) NAVET M., M. FEIX and E. JAMIN, Classical one component plasma International Conference on Mathematical Physics, Lausanne, Suisse, 19-26 août 1979.
- (233) PERRAUT S., ROUX A., ROBERT P., GENDRIN R., KORTH A., KREMSEK G., JONES D., YOUNG D.T. BORG A., Generation of magnetosonic waves above the proton gyrofrequency by energetic protons during the injection events, Vith Annual E.G.S. Meeting, Vienne, Autriche, 11-14 septembre 1979.
- (234) PETITDIDIER M., J.L. FELLOUS, J. CHRISTOPHE, J. TAPIA, H. TEITELBAUM and M. MASSEBEUF, Comparison between green light nightglow variations and simultaneous radar wind measurements, 7th Annual Meeting on Upper Atmosphere Studies by Optical Methods, Tromsø, Norvège, juin 1979.
- (235) PRANGE R., VIDAL-MADJAR A., CAZES S., EMERICH C., BAUER P., TAIEB C., Interaction between hydrogen atoms and ions in the upper atmosphere, XVIIth I.U.G.G. General Assembly, Canberra, Australie, 02-15 décembre 1979.
- (236) RICHMOND A.D., BLANC M., WAND R.H., FEJER B.G., WOODMAN R.F., BEHNKE R.A., EMERY B.A., An electric field model for the middle and low latitude ionosphere on quiet days, XVIIth I.U.G.G. General Assembly, Canberra, Australie, 02-15 décembre 1979.
- (237) SENIOR C., BLANC M., The distribution of ionospheric conductivities in the auroral zone and their influence on the time constant of magnetospheric convection, Vith Annual E.G.S. Meeting, Vienne, Autriche, 11-14 septembre 1979.
- (238) SIMON D., J. BARDOLLE and M. BUJOR, Study of the reactivity of silver, copper, silver-copper and silver-palladium alloys used in telephone relay contacts, Holm Seminar, Chicago, U.S.A., september 1979.

- (239) STOREY L.R.O. and L. CAIRO, Kinetic theory of the boundary layer between a flowing isotropic plasma and a magnetic field, Magnetospheric boundary layers, Alpbach, Autriche, 11-15 June 1979.
- (240) STOREY L.R.O. and MALINGRE M., Preliminary results from the enhanced resistivity experiment in the Substorm-GEOS programme, 3rd Workshop on IMS Observations in Northern Europe, Skoksster, Suède, 3-7 septembre 1979.
- (241) THOMAS R., J. BARASSIN et A. BARASSIN, Réaction  $\text{CH}_3^+ + \text{NH}_3$ . Evolution des produits en fonction de la concentration de  $\text{NH}_3$ , 14è Conférence Internationale sur les phénomènes d'ionisation dans les gaz, Grenoble, France, 9-13 juillet 1979.
- (242) THOMAS R., J. BARASSIN and A. BARASSIN, Mobility and longitudinal diffusion coefficients of  $\text{CH}_x^+$  ions in helium. Reaction of  $\text{CH}_3^+ + \text{NH}_3$ , 4th International Symposium of Plasmas Chemistry (International Union of Pure and Applied Chemistry), Zurich, Suisse, 27 août - 1er septembre 1979.
- (243) THOUVENIN J.P. and J.C. TROTIGNON, Automatic resonances recognition method in solar wind, Vith Annual E.G.S. Meeting, Vienne, Autriche, 11-14 septembre 1979.
- (244) THUILLIER G., DUBOIN M.L., CONNES P., BARLIER F., ALCAYDE D., Michelson interferometer for auroral observations, 7th Annual Meeting on Upper Atmospheric Studies by Optical Methods, Tromsøe, Norvège, juin 1979.
- (245) WEILL A., Paramétrisation des résultats dans la C.L.P., Journées d'Etude sur la Couche Limite Atmosphérique, Marseille, France, 19-21 mars 1979.
- (246) WEILL A., Modélisations phénoménologiques, Journées d'Etude sur la Couche Limite Atmosphérique, Marseille, France, 19-21 mars 1979.
- (247) WEILL A., Les travaux coopératifs menés par le C.R.P.E. et l'E.E.R.M., Journées d'Etude sur la Couche Limite Atmosphérique, Marseille, France, 19-21 mars 1979.

- (248) YOUNG D.T., VILLEDARY de C., GENDRIN R., PERRAUT S., ROUX A., JONES D., KORTH A., KREMSEK G. Observations of ULF wave-particle interactions in helium-rich magnetospheric plasma, Vith Annual E.G.S. Meeting, 11-14 septembre 1979.
- (249) YOUNG D.T., VILLEDARY de C., GENDRIN R., PERRAUT S., ROUX A., JONES D., KORTH A., KREMSEK G. Observations of waves below the proton gyrofrequency in helium-rich magnetospheric plasma, XVIIth I.U.G.G. General Assembly, Canberra, Autriche, 02-15 décembre 1979.

DOCUMENTS INTERNES

- (301) ARNAL Y., R. CHEZLEMAS, D. HENRY, L. POMATHIOD, Développement d'une source d'ions embarquable sur la navette spatiale. 1er rapport semestriel contrat DRET 78/1036, Document de travail CRPE/PCE/1040, 1979.
- (302) ARNAL Y., R. CHEZLEMAS, D. HENRY et L. POMATHIOD, Développement d'une source d'ions embarquables sur la navette spatiale. 2è rapport semestriel contrat DRET 78/1036, Document de travail CRPE/PCE/1047, 1979.
- (303) ARNAL Y., J.P. LEBRETON, R. DEBRIE et J.F. KARCZEWSKI, Simulation du plasma ionosphérique dans le caisson SIMLES en présence de la maquette du satellite ARCAD 3, Document de travail CRPE/PCE/1042, 1979.
- (304) AUGER M., Convertisseur d'alimentation DC/DC embarqué sur satellite. Applications aux projets ARCAD 3 et PICPAB, Note Technique CRPE/ETE/77, 1979.
- (305) BERNARD R., P. MARTIN, D. VIDAL-MADJAR, La télédétection active en hyperfréquences : - Application à l'humidité des sols ; - Traitement des données, Note Technique CRPE/ETE/72, 1979.
- (306) BERTIN F., M. PETITDIDIER, Le Sondeur Eiscat et les expériences associées Françaises, Rapport MAP, 1979.
- (307) BLANC M., P. AMAYENC, Seasonal variations of the ionospheric ExB drifts above Saint-Santin on quiet days, Note Technique CRPE/ETE/66, 1979.
- (308) BLANC M., A.D. RICHMOND, The ionospheric disturbance dynamo, Note Technique CRPE/ETE/79, 1979.
- (309) BEGHIN C., Rapport national sur les travaux français exécutés de 1975 à 1978 dans la discipline "ionosphère-magnétosphère", Document de travail CRPE/PCE/1039, 1979.
- (310) BLOCH J.J., Rapport de stage aux Laboratoires de la COMSAT (Clarksburg, Maryland, U.S.A.), Document de travail CRPE/ETE/1049, 1979.

- (311) BUCHALET L.J., Analyse de champs d'ondes électromagnétiques à partir de modèles à une ou deux directions privilégiées, Note Technique CRPE/PCE/76, 1979.
- (312) FERGEAU P. et A. HAUSER, Spécification relative aux circuits imprimés avec dorure électrolytique, Document de travail CRPE/PCE/1053, 1979.
- (313) GILLE P., PICPAB telemetry processing guide, Document de travail CRPE/PCE/1043, 1979.
- (314) GILLE P., Spécification d'une interface d'acquisition de télémessure rapide, Document de travail CRPE/PCE/1046, 1979.
- (315) JAVEL de Y., M. AUGER, Projet d'études de sous-systèmes pour charge utile de satellites de télécommunications, Note Technique CRPE/ETE/74, 1979.
- (316) LOTTE P., Détermination de la température d'un plasma à l'aide d'un corrélateur à large bande, Document de travail CRPE/PCE/1050, 1979.
- (317) MEYER A., Expérience magnétique "Joconde" du satellite NASA "GALILEO". Cahier des clauses techniques particulières. 1ère Partie : Dispositions d'ensemble. 2ème Partie : Dispositions particulières à l'étude thermique, Document de travail CRPE/ETE/1051, 1979.
- (318) MEYER A., Expérience magnétique "Joconde" du satellite NASA "GALILEO". Cahier des clauses techniques particulières. Dispositions d'ensemble, Document de Travail CRPE/ETE/1055, 1979.
- (319) MON J.P., Projet d'études de propagation associant des sondeurs acoustiques ou des radars météorologiques à des liaisons radioélectriques, Note Technique CRPE/ETE/65, 1979.
- (320) MUSSON C., Etude et réalisation d'un séquenceur de test destiné à simuler le fonctionnement de l'expérience PICPAB ESO 20A embarquée sur le premier SPACELAB, Document de travail CRPE/PCE/1048, 1979.

- (321) NUTTEN B., Radars Ronsard : Détermination de la température effective de bruit des récepteurs, Document de Travail CRPE/ETE/1052, 1979.
- (322) NUTTEN B., P. AMAYENC, M. CHONG, D. HAUSER, F. ROUX, J. TESTUD, The Ronsard radars : a versatile C Band dual Doppler facility, Note Technique CRPE/ETE/69, 1979.
- (323) NUTTEN B., D. HAUSER, F. ROUX, G. SCIALOM, The Ronsard radars : internal calibration techniques using coherent and noise sources, Note Technique CRPE/ETE/70, 1979.
- (324) NUTTEN B., G. SCIALOM, P. AMAYENC, Etalonnage des radars Ronsard : 1ère Partie : Etude théorique générale et mesure des fonctions de transfert internes, Note Technique CRPE/ETE/75, 1979.
- (325) PIGNARD J., Etude expérimentale des instabilités et mouvements de dérive du plasma ionosphérique en zone polaire, Note Technique CRPE/PCE/78, 1979.
- (326) PIRRE M., M. HAMELIN, T.R. SANDERSON, and G.L. WEBB, A method to measure the D.C. electric field in the vicinity of a spacecraft using artificially injected charged particles, Note Technique CRPE/PCE/68, 1979.
- (327) PIRRE M., Interaction entre un faisceau d'ions injectés artificiellement et l'atmosphère neutre. Applications à la mesure du champ électrique parallèle, Document de travail CRPE/1052, 1979.
- (328) POMATHIOD L. et D. HENRY, Etude d'un injecteur d'ions hydrogène embarquable sur satellite. Rapport de synthèse final, Document de travail CRPE/PCE/1044, 1979.
- (329) Rapport d'activité CRPE pour l'année 1978, Note Technique CRPE/PCE/73, 1979.
- (330) ROBERT P., Intensité et polarisation des ondes UBF détectées à bord de GEOS-1. Méthode d'analyse numérique du signal et production en routine de sommaires expérimentateurs. Problèmes rencontrés et solutions pratiques, Note Technique CRPE/ETE/71, 1979.



- (331) TESTUD J., G. BREGER, P. AMAYENC, M. CHONG, B. NUTTEN, A. SAUVAGET,  
A Doppler radar observation of a cold front: three-dimensional air  
circulation, related precipitation system and associated wave like motions,  
Note Technique CRPE/ETE/67, 1979.
- (332) TROTIGNON J.G. et J.P. THOUVENIN, Vers une reconnaissance automatique des  
résonances de l'expérience sondeur ISEE A, Document de travail  
CRPE/PCE/1041, 1979.
- (333) WEILL A., KLAPISZ C., (Eds.), Edition des données de la campagne de VOVES 77  
(15 Volumes), C.N.E.T., 1979.

THESES

- (401) BUCHALET L.J., Analyse de champs d'ondes électromagnétiques à partir de modèles à une ou deux directions privilégiées, Thèse de 3ème cycle, Orléans, 18 septembre 1979.
- (402) DEL POZO, Mesure de la variation en latitude des vitesses de convection en zone aurorale, Rapport de stage DEA, Paris VI, 1979.
- (403) FREZAL-LE QUERE M.E., Etude expérimentale de la direction de de propagation et de répartition en latitude des ondes de gravité observées par deux radars météoriques, Thèse de 3ème cycle, Paris VI, 20 décembre 1979.
- (404) LOTTE P., Détermination de la température d'un plasma à l'aide d'un corrélateur à large bande, Rapport de stage DEA, juillet 1979.
- (405) PASQUET M., Etude expérimentale d'ondes atmosphériques de la basse thermosphère à partir des données du sondeur à diffusion incohérente de Saint-Santin, Rapport de stage DEA, Paris VI, septembre 1979.
- (406) PIGNARD J., Etude expérimentale des instabilités et mouvements de dérive du plasma ionosphérique en zone polaire, Thèse de 3ème cycle, Orléans, 26 septembre 1979.
- (407) PONTHEIU J.J., Calcul du chauffage de l'atmosphère en région aurorale, Rapport de stage DEA, juin 1979.

REVUES A PARAITRE EN 1980

- (501) ALTMAN C. and E. FIJALKOW, The horizontal propagation of Pc 1 pulsations in the ionosphere, Planet. Space Sci., 1980.
- (502) BAUER P., Etude de l'ionosphère par diffusion incohérente dans la perspective du projet EISCAT, J. Phys., 1980.
- (503) BERCHEM J., Contribution à l'étude de la convection magnétosphérique : vérification expérimentale de modèles de champ électrique par l'étude de la dynamique de la plasmasphère, Thèse de 3ème cycle, Paris VI, 1980.
- (504) BERTRAND P., NGUYEN VAN TUAN, M. GROS, B. IZRAR, M. FEIX and J. GUTIERREZ, Classical Vlasov plasma description through quantum numerical methods, J. Plasma Phys., 1980.
- (505) BARASSIN J., R. THOMAS and A. BARASSIN, Ternary association reactions leading to formation of  $\text{CH}_3^+(\text{H}_2\text{O})_n$  in the energy range 0,04 - 0,1 eV, J. Chem. Lett., 1980
- (506) BERNARD R., Seasonal variation of semi-diurnal tide. Comparison of meteor radar observations and of results from an excitation source model, J. Atmos. Terr. Phys. 1980.
- (507) BLANC M., Convection du plasma dans l'ionosphère et la magnétosphère : un circuit électrique et son schéma de résolution, Ann. Géophys., 1980
- (508) BLANC M., A.D. RICHMOND, The ionospheric disturbance dynamo, J. Geophys. Res. 1980.
- (509) BLOCH J.J., Rapport de stage (seconde partie) aux laboratoires de la COMSAT, Document de travail CRPE/1056, 1980.
- (510) BONOMI E., M.R. FEIX, et G. HEBUTERNE, Théorie de l'information. Structure et modélisation d'un réseau de connexion, Ann. Télécomm., 35, 39-59, 1980.

- (511) CORNILLEAU N., A new ULF-modulated electrostatic wave detected in the extremely low frequency range onboard GEOS, J. Geophys. Res., 1980.
- (512) DELANNOY C. et F. LEFEUVRE, Logiciel de résolution d'un problème inverse à une variable I. Exposé des méthodes, Note Technique CRPE/80, 1980.
- (513) DELANNOY C., Logiciel de résolution d'un problème inverse à une variable II. Documentation d'utilisation, Note Technique CRPE/81, 1980.
- (514) GLANGEAUD F., LACOUME J.L., FARGETTON H., GENDRIN R., PERRAUT S. and TROITSKAYA V.A., Cross-spectral analysis of Pc 1 emissions recorded at different stations, J. Geophys. Res., 1980.
- (515) GENDRIN R., General relationships between wave amplification and particle diffusion in a magnetoplasma, Rev. Geophys. Space Phys., 1980.
- (516) GENDRIN R. and ROUX A., Energization of helium ions by proton-induced hydromagnetic waves, J. Geophys. Res., 1980.
- (517) Groupe technique ARCAD 3, CRPE-LGE-CNES, Résultats des essais de calibration de l'expérience TBF-ARCAD 3-MQ, Document de travail, CRPE/1058, 1980.
- (518) HAMELIN M., Excitation of LHR electrostatic waves in a warm magnetoplasma by current pulses : application to the VLF echoes excited by the ISIS 2HF transmitter, Radio Science, 15, 1980.
- (519) HAUSER D., Granulométrie des hydrométéores précipitants et vitesse verticale de l'air. Etude à partir d'un radar Doppler en tir vertical, Thèse de 3ème cycle, Paris VI, 31 janvier 1980.
- (520) HENRY D., Phénomènes induits par des faisceaux de particules chargées dans l'espace, Document de travail CRPE/1059, 1980.
- (521) JUY M., M. ROORYCK, Première analyse des mesures de propagation oblique effectuées à Gometz-La-Ville sur le signal du satellite SIRIO 1, Ann. Télécomm., 35, 3-14, 1980.

- (522) LAVERGNAT J., J.M. ILLIANO, J.Y. DELAHAYE and R. NEY, Non linear effects in the vicinity of a radiofrequency probe, Plasma Phys., **22**, 57-68, 1980.
- (523) LEBRETON J.P. and D. HENRY, Electrostatic waves in a drifting ionospheric simulation plasma in the vicinity of the plasma frequency, Phys. Lett., **76A**, 49-52, 1980.
- (524) LEMBEGE B., Theoretical study of backward propagating cyclotron harmonic waves for frequencies  $\omega$  around  $\omega_{cyl}$ , Plasma Phys., 1980.
- (525) LEMBEGE B., Experimental study of backward propagating cyclotron harmonic waves in the direction parallel to the magnetic field, Phys. Fluids, 1980.
- (526) MOURGUES G., E. FIJALKOW and M.R. FEIX, Forced oscillations generated by a point antenna in a drifting plasma, Plasma Phys., 1980.
- (527) MUNIER A., Groupes d'invariance et de quasi-invariance. Applications aux équations d'évolution, Thèse d'Etat, Orléans, 21 avril 1980.
- (528) MUNIER A., J.R. BURGAN, M. FEIX and E. FIJALKOW, Self similar analysis of Vlasov-Einstein equations in spherical symmetry, Astrophys. J., **236**, 970-989, 1980.
- (529) MUNIER A., J.R. BURGAN, J. GUTIERREZ, E. FIJALKOW and M.R. FEIX, Group transformations and the non linear heat diffusion equation, Siam J. Appl. Math. A, 1980.
- (530) NAVET M., E. JAMIN and M.R. FEIX, "Virial" pressure of the classical one component plasma, J. Phys. Lett., **41**, L69-L73, 1980.
- (531) PICON O., Influence de l'échange de charge  $H^+$ , H sur les interactions entre protons et ondes d'ultra-basse fréquence dans la magnétosphère, Thèse de 3ème cycle, Orsay, 20 mai 1980.

- (532) POMATHIOD L., Etude des phénomènes physiques responsables du fonctionnement d'une source d'ions du type "à électrons oscillants". Application à la conception et au développement d'un injecteur d'ions embarqué sur le premier laboratoire spatial "Spacelab", Thèse d'Ingénieur-Docteur, 29 avril 1980. /
- (533) POMATHIOD L., D. HENRY, Y. ARNAL and R. BOSWELL, Development of an ion source for Space, Space Sci. Instr., 5, 55-65, 1980.
- (534) RENARD C. et A.A. POKHOUNKOV, Caractéristiques d'ondes de gravité observées dans l'ionosphère polaire, C.R. Acad. Sc. Paris, 290 B, 39-42, 1980.
- (535) ROUX F., Etude de la convection dans l'atmosphère terrestre par un système à deux radars Doppler, Thèse de 3ème cycle, Paris VII, 1980.
- (536) SHEPHERD G.G., R. BOSTROM, H. DERBLOM, C.G. FALTHAMMAR, R. GENDRIN, K. KAILA, A. KORTH, A. PEDERSEN, R. PELLINEN and G. WRENN, Plasma and field signatures of propagating impulsive precipitation observed at the foot of GEOS 2 field line, J. Geoph. Res., 1980.
- (537) STOREY L.R.O. and F. LEFEUVRE, The analysis of 6-component measurements of a random electromagnetic wave field in a magnetoplasma II. The integration field in a magnetoplasma, Geoph. J.R. Astr. Soc., 1980.
- (538) STOREY L.R.O., J. THIEL and R.W. BOSWELL, Location of the interference structure near the lower oblique (whistler) resonance cone, Phys. Fluids, 23, 654-655, 1980.
- (539) TESTUD J., G. BREGER, P. AMAYENC, M. CHONG, B. NUTTEN, A. SAUVAGET, A Doppler radar observation of a cold front: Three-dimensional air circulation, related precipitation system and associated wave-like motions, J. Atmos. Sci., 37, 78-98, 1980.
- (540) THOMAS R., J. BARASSIN, A. BARASSIN, Etude cinétique du système réactionnel  $\text{CH}_3^+ - \text{NH}_3$  dans le domaine d'énergie compris entre 0,04 eV et 1 eV, Int. J. Mass Spectrom. Ion. Phys., 33 383-391, 1980.

- (541) WEILL A., C. KLAPISZ, R. STRAUSS, F. BAUDIN, C. JAUPART, Measuring Heat Flux and structure functions of temperature fluctuation with an acoustic Doppler Sodar, J. Appl. Meteor., 19, 199-205, 1980.

**COMPLEMENT A LA BIBLIOGRAPHIE 1979 DU C.R.P.E.**

- (A-1) DUPUIS Ph., M. JOINDOT, A. LECLERC and M. ROORYCK, Fade margin of high capacity digital radio system, International Conferences on Communications, Boston, 3, 48.6.1 - 48.6.5, 1979.
- (A-2) JUY M. et M. ROORYCK, Analyse des mesures de propagation oblique effectuées à Gometz sur le signal du satellite Sirio, Note Technique CNET NT/TCR/APH/56, 1979.
- (A-3) MARTIN L., J.P. MON et M. ROORYCK, Projet d'études de propagation associant des sondeurs acoustiques ou des radars météorologiques à des liaisons radioélectriques, Note Technique CRPE/65, 1979.
- (A-4) ROORYCK M., Détermination de la qualité de liaisons hertziennes numériques à l'aide d'un modèle de propagation à deux rayons, Note Technique CNET NT/TCR/APH/59, 1979.
- (A-5) ROORYCK M., Projet de mesures pour l'étude de l'effet de la propagation sur la transmission numérique, Note Technique CNET NT/TCR/APH/64, 1979.
- (A-6) TIFFON J. et L. FLEURY, Etude de liaisons hertziennes maritimes, Note Technique CNET NT/TCR/APH/69, 1979.



**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*