



HAL
open science

Diagnostic de plasmas hors d'équilibre au moyen de mesures du microchamp aléatoire

I.L. Freeston, R. Pottelette, L.R.O. Storey

► **To cite this version:**

I.L. Freeston, R. Pottelette, L.R.O. Storey. Diagnostic de plasmas hors d'équilibre au moyen de mesures du microchamp aléatoire. [Rapport de recherche] Note technique CRPE n° 13, Centre de recherches en physique de l'environnement terrestre et planétaire (CRPE). 1975, 34 p. hal-02191389

HAL Id: hal-02191389

<https://hal-lara.archives-ouvertes.fr/hal-02191389v1>

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.

RF 182 (12)
**CENTRE NATIONAL D'ETUDES
DES TELECOMMUNICATIONS**

**CENTRE NATIONAL DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

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

CRPE

**NOTE TECHNIQUE
CRPE / 13**

*Diagnostic de plasmas
hors d'équilibre
au moyen de mesures
du microchamp aléatoire*



par

**I.L. FREESTON
R. POTTELETTE
L.R.O. STOREY**

15 AVR. 1977

B

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

NOTE TECHNIQUE CRPE/13

DIAGNOSTIC DE PLASMAS HORS D'EQUILIBRE
AU MOYEN DE MESURES DU MICROCHAMP ALEATOIRE

par

I.L. FREESTON, R. POTTELETTE, et L.R.O. STOREY

CRPE/PCE

45045 ORLEANS-LA-SOURCE, FRANCE

NOVEMBRE 1975

LE DIRECTEUR.



PLAN

1. INTRODUCTION

2. METHODOLOGIE

3. TRAVAUX THEORIQUES

3.1. Mode actif

3.2. Mode passif : plasma en équilibre

3.3. Mode passif : plasma hors d'équilibre

3.4. Problème inverse

4. TRAVAUX EXPERIMENTAUX

4.1. Construction d'appareils

4.2. Mode actif

4.3. Mode passif

5. CONCLUSION

REMERCIEMENTS

PUBLICATIONS

ILLUSTRATIONS

1. INTRODUCTION

Dans le présent rapport, on rend compte des travaux scientifiques effectués, dans le cadre de l'Action Thématique Programmée "Internationale 1974", au titre de la Décision n° 9201. Le sujet de ces travaux est le diagnostic de plasmas hors d'équilibre au moyen de mesures du microchamp aléatoire. Ils font partie d'un programme de recherches dont le but ultime est de mettre au point un nouvel instrument de mesure de la fonction de distribution des vitesses des électrons dans un plasma non-Maxwellien du type de celui qui existe dans l'ionosphère.

2. METHODOLOGIE

Pendant le jour, la fonction de distribution des électrons dans l'ionosphère comporte deux parties : une partie principale thermique, de forme maxwellienne, dans laquelle la densité d'électrons peut varier de 10^3 à 10^6 cm^{-3} environ, et leur énergie moyenne de 0,05 à 0,5 eV environ ; une queue d'électrons supra-thermiques (photoélectrons) dont la densité est typiquement de l'ordre de 10 cm^{-3} et l'énergie moyenne de 10 eV.

Or, la partie thermique peut être étudiée expérimentalement à l'aide de sondes de Langmuir classiques, tandis qu'à partir de 5 ou 10 eV la partie non-thermique peut être étudiée à l'aide d'analyseurs électrostatiques équipés de compteurs de particules. Le problème qui nous intéresse est de combler le fossé qui existe dans les mesures concernant des électrons dont l'énergie est comprise entre 0,5 et 5 eV environ. Son intérêt pour la géophysique provient du rôle important que jouent les photoélectrons dans le bilan du flux de chaleur du plasma dans l'ionosphère et dans la magnétosphère.

Pour simplifier ce problème, on s'est proposé de l'étudier en premier lieu dans le cas d'un plasma sans champ magnétique.

La partie expérimentale de l'étude s'est donc effectuée en plasma de laboratoire (où on a pu annuler le champ magnétique terrestre) plutôt que dans l'espace.

Le principe de la méthode de mesure proposée est fondé sur l'interaction entre les électrons supra-thermiques et les ondes électrostatiques longitudinales (ondes de Landau) se propageant dans le plasma avec les mêmes vitesses.

La partie "capteur" du dispositif expérimental comprend deux petites antennes électriques, du genre "dipole double-sphère" immergées dans le plasma et séparées d'une distance d'une ou plusieurs centaines de longueurs de Debye. Il s'agit, en effet, d'un type particulier de sonde quadripolaire.

Ce capteur a deux modes d'utilisation possibles, dits "actif" et "passif".

Dans le mode actif, on émet de l'une des antennes un courant alternatif I , et on mesure la tension V recueillie sur l'autre antenne en circuit ouvert. On fait varier la fréquence d'excitation f et on détermine, en fonction de cette fréquence, l'impédance de transfert $Z(f) = V/I$ entre les deux antennes.

Dans le mode passif, les antennes fonctionnent toutes les deux en réception, et recueillent uniquement des signaux aléatoires provenant des fluctuations du microchamp naturel dans le plasma. On détermine le spectre de la corrélation $S(f)$ des deux signaux. Cette méthode de diagnostic est l'analogue, pour le sondage local du plasma, de la méthode de diffusion incohérente pour le sondage à distance.

Or, lorsque le plasma est en équilibre thermique, de sorte que la fonction de distribution des vitesses électroniques est Maxwellienne, on peut démontrer à partir de considérations thermodynamiques fondamentales que la composante corrélée des signaux recueillis sur les deux antennes n'est autre que le bruit thermique engendré dans la partie résistive de l'impédance de transfert. Il existe donc une relation de simple proportionnalité entre $S(f)$ mesurée en mode passif et la partie réelle de $Z(f)$ mesurée en mode actif. Dans ces conditions, l'une ou l'autre de ces

fonctions peut être interprétée pour estimer les paramètres de la population d'électrons : densité et température électroniques.

Par contre, lorsque le plasma est hors d'équilibre, cette relation n'est plus valable. Il semble donc que le rapport $S(f)/\text{Re} \{Z(f)\}$ doive fournir un indice très sensible des écarts éventuels par rapport à l'état d'équilibre. C'est l'éventualité que nous avons entrepris d'étudier, à la fois sur le plan théorique et sur le plan expérimental.

3. TRAVAUX THEORIQUES

3.1. Mode actif :

La première étape des travaux théoriques a été consacrée au mode actif. Pour cela, on a mis au point la théorie de l'impédance mutuelle de deux petits dipôles dans un plasma chaud isotrope. La fonction de distribution des vitesses des électrons du plasma a été prise d'abord Maxwellienne, puis du type Cauchy d'ordre 12 ; cette dernière distribution se rapproche de la Maxwellienne pour des vitesses inférieures à la moyenne, mais à des vitesses supérieures, elle comporte une proportion de particules plus importante. On a trouvé que l'écart de la fonction de distribution par rapport à la Maxwellienne influe effectivement sur la fonction de transfert $Z(f)$, ceci surtout à des fréquences nettement (plus de 10 %) supérieures à la fréquence plasma f_p , et lorsque la distance entre les deux antennes est grande (de l'ordre de 100 longueurs de Debye). Ces résultats font l'objet d'une publication à paraître (POTTELETTE, ROOY et FIALA, 1975). Ils s'appliquent cependant à des cas où les écarts sont plus importants que ceux qui existent dans le plasma de l'ionosphère. Là, en effet, il semble que l'écart que constitue la population de photo-électrons ne devra guère se faire sentir sur le comportement de la sonde en mode actif.

3.2. Mode passif : plasma en équilibre :

Par conséquent, la deuxième étape des travaux théoriques a été consacrée au mode passif. Il a fallu d'abord compléter, en vue de les publier, les travaux antérieurs de thèse de 3ème Cycle de C. CHAULIAGUET (Faculté des Sciences de Paris, 1970) qui a étudié le spectre $S(f)$ de la corrélation des signaux induits par le microchamp sur deux petits dipôles placés dans un plasma. Notre apport principal a été d'éclaircir la relation qui existe, grâce au théorème de Nyquist, entre la fonction $S(f)$ qui caractérise le mode passif, et la partie réelle de l'impédance de transfert $Z(f)$

mesurée en mode actif ; cette relation ne s'applique qu'à un plasma en équilibre, en ce sens que la fonction de distribution des vitesses des électrons est Maxwellienne. D'autre part, on a examiné plusieurs problèmes pratiques, tels que la meilleure façon de rendre la sonde insensible à l'interférence électromagnétique. La rédaction d'un article exposant l'ensemble de ces travaux s'achève en ce moment (POTTELETTE et CHAULIAGUET, 1976).

3.3. Mode passif : plasma hors d'équilibre :

Parallèlement on a abordé la troisième étape, qui consiste à étudier le mode passif dans le cas d'un plasma hors d'équilibre du type qui existe dans l'ionosphère de jour. Il s'agit -à ce stade- simplement de s'assurer que le spectre $S(f)$ est sensible à la présence des photoélectrons. Pour cela, il n'est pas nécessaire de connaître très exactement la fonction de distribution de ces derniers : il suffit de la caractériser approximativement, ce que nous avons fait en prenant une deuxième Maxwellienne, de densité plus faible (facteur 10^{-3} par exemple) et de température plus forte (facteur 10^2) que celle caractérisant les électrons thermiques. On constate que la présence des électrons supra-thermiques a pour effet d'augmenter $S(f)$, à la fréquence plasma f_p , dans un rapport égal à celui des températures, et ceci quel que soit le rapport des densités. Ce dernier paramètre n'influe que sur la largeur du pic de $S(f)$, pour une forme donnée de la fonction de distribution des électrons supra-thermiques. En somme, l'effet des photo-électrons sur $S(f)$ est très important et doit être facile à mettre en évidence expérimentalement. Ces résultats théoriques ont fait l'objet d'une communication présentée à la 18ème Assemblée Plénière du C.O.S.P.A.R. à Varna (Bulgarie) au mois de juin 1975, et l'article correspondant paraîtra en 1976 dans le compte-rendu (POTTELETTE, 1976) ; une publication plus conséquente est en cours de rédaction.

3.4. Problème inverse :

Dans une quatrième étape, il va falloir s'attaquer au problème inverse : c'est-à-dire, en partant d'un spectre $S(f)$ expérimental, dans quelle mesure -et comment- peut-on déterminer la fonction de distribution lorsque celle-ci est quelconque ? Une telle étude est toutefois prématurée, tant que l'on ne sera pas capable de mesurer un spectre correctement. C'est pourquoi on a préféré laisser en suspens cette dernière étape, et rapporter tout l'effort disponible sur le programme expérimental.

4. TRAVAUX EXPERIMENTAUX

4.1. Construction d'appareils :

Les travaux expérimentaux ont été effectués dans le caisson de simulation du plasma ionosphérique du C.P.P.E. à Orléans (fig.4.1.). Ce caisson est doté d'un système de bobines (fig. 4.2.) permettant de compenser le champ magnétique terrestre, afin de rendre le plasma isotrope ; on parvient ainsi à réduire le champ magnétique à moins de 10 milligauss dans la zone utile du plasma (fig. 4.3.). D'autre part, on a installé à côté du caisson un ensemble de commande et contrôle automatique, et de centralisation de mesures, basé sur un mini-ordinateur du type Télémécanique T 2000.

Aux fins du présent programme de recherches, il a fallu d'abord construire le dispositif expérimental, comprenant d'une part un ensemble de capteurs, et d'autre part un ensemble électronique.

Les capteurs sont des antennes dipôles du type double-sphère. On en a construit trois, dont une d'émission et deux de réception. Mécaniquement, tous les trois sont semblables : la distance entre les deux sphères est réglable, dans une plage de 0 à 15 cm environ ; d'autre part, les sphères sont dévrouillables, de façon à permettre le remplacement d'une paire de sphères d'un diamètre donné par une paire d'un autre diamètre. Sur le plan électronique, il y a les différences suivantes : l'antenne d'émission comporte les circuits nécessaires pour injecter dans le plasma un courant H.F. à peu près constant, indépendamment de l'état du plasma, tandis qu'une antenne de réception comporte un préamplificateur différentiel à très haute impédance d'entrée. Chaque expérience nécessite la mise en oeuvre de deux antennes, soit une d'émission et une de réception (en mode actif), soit deux de réception (en mode passif).

Pour faciliter l'expérimentation en caisson, on a construit un chariot permettant de faire varier la distance entre les deux antennes, dans une plage de 0 à 50 cm, par télécommande et sans détruire le vide. Le mouvement mécanique déplace les deux antennes en même temps, symétriquement par rapport à l'axe du caisson

afin de profiter autant que possible de la zone de plasma relativement homogène située sur l'axe. On ne peut malheureusement pas s'affranchir du gradient de la densité du plasma le long de l'axe ; ce gradient existe parce qu'on emploie une source qui fournit du plasma sous la forme d'un jet (fig. 4.4.). On essaie de minimiser son influence sur les mesures en orientant la sonde de telle façon que la ligne joignant les centres des deux antennes soit perpendiculaire à l'axe.

L'ensemble électronique, dont le rôle est de mesurer les caractéristiques de l'ensemble de capteurs ci-dessus lorsque celui-ci est placé dans le plasma, comprend deux parties : l'une sert à étudier le mode actif, et l'autre le mode passif. Cet ensemble est relié au mini-ordinateur T 2000, qui commande le déroulement des séquences de mesure et gère les données recueillies.

La première partie comporte un émetteur, un récepteur, et un transféromètre qui mesure l'atténuation et le déphasage du signal reçu par rapport au signal émis (fig. 4.5.) . Du côté émission, un synthétiseur de fréquence Hewlett-Packard 3320 B, commandé par le T 2000, produit un signal dont la fréquence f varie de 0 à 13 MHz.

Du côté réception, on mélange le signal à la fréquence f issu de la sonde avec une oscillation locale à la fréquence $f + 20$ MHz. Après filtrage par un amplificateur accordé, seule la fréquence intermédiaire 20 MHz est prise en compte. Pour la rendre compatible avec la gamme de fonctionnement du transféromètre HP 3575 A, on abaisse la fréquence à 1 MHz. Le signal de référence est fourni par la sortie 1 MHz du synthétiseur. Les données de gain et de phase sont envoyées au T 2000.

Cette partie de l'ensemble, utilisée pour le mode actif, a été achevée sous forme de prototype et fonctionne correctement ; elle a servi aux expériences décrites au § 4.2. ci-dessous, pour lesquelles il a fallu fournir en outre un effort important de programmation du T 2000.

En mode passif, les deux antennes du capteur recueillent le bruit naturel dans le plasma. La deuxième partie de l'ensemble

électronique calcule, pour chaque fréquence, les coefficients de corrélation en phase et en quadrature de ce bruit (fig. 4.6.). Cette partie est au stade de l'assemblage des capteurs et de l'électronique ; les essais vont commencer prochainement.

4.2. Mode actif :

Comme il a été déjà mentionné, les travaux expérimentaux dans le caisson ont été effectués avec les antennes de la sonde disposées suivant l'une ou l'autre des deux configurations illustrées dans la figure 4.7. Dans l'une, dite "parallèle", les deux antennes sont parallèles à la ligne qui joint leur centres. Dans l'autre, dite "perpendiculaire", les antennes sont perpendiculaires à cette ligne. Dans les deux cas, les deux antennes sont parallèles l'une à l'autre, et leur ligne des centres est perpendiculaire à l'axe du caisson.

Pour une configuration donnée, la géométrie de la sonde est caractérisée par trois paramètres : la distance d entre les centres des deux antennes ; la longueur électrique l d'une antenne, égale à la distance entre les centres des deux sphères ; le diamètre d'une sphère, qui était de 1 cm dans toutes les expériences décrites ci-dessous.

Plusieurs dizaines d'expériences ont été effectuées, mettant en oeuvre les sondes avec des configurations et des dimensions variées et dans des plasmas de caractéristiques diverses, afin de se rendre compte de la mesure dans laquelle les résultats expérimentaux sont en accord avec la théorie, et d'identifier les causes des éventuels désaccords. Plutôt que de présenter l'ensemble de ces expériences, on se bornera ci-dessus à donner les résultats issus de trois cas typiques.

Le premier d'entre eux avait pour but d'étudier, en fonction de la fréquence, la qualité de la réponse de la sonde à différents niveaux d'excitation, c'est-à-dire son immunité vis-à-vis des diverses sources d'erreurs. La sonde a été employée dans sa configuration parallèle, avec les dimensions suivantes : $l = 5,5$ cm ;

$d = 11,0$ cm. La densité du plasma était de $2,5 \cdot 10^5 \text{ cm}^{-3}$, correspondant à une fréquence plasma de l'ordre de 4,5 MHz. La figure 4.8. présente les résultats obtenus ; l'abscisse est la fréquence d'excitation f , tandis que l'ordonnée est la tension V mesurée à la sortie du récepteur, divisée par la tension V_0 mesurée en l'absence du plasma, au niveau d'excitation de 0dB. (Il s'agit des amplitudes des tensions en question : les phases ont été mesurées également, mais pour abrèger on limitera la discussion aux amplitudes). Les cinq courbes correspondent à cinq niveaux d'excitation différentes, séparés par des intervalles de 10 dB. En réalité, ce "niveau d'excitation" est le réglage de l'amplitude A (en décibels) de la tension issue du synthétiseur de fréquence (voir la fig. 4.5.). Pour une amplitude donnée, le courant émis dans le plasma est approximativement proportionnel à la fréquence : pour l'amplitude $A = 0$ dB, il est de $1,7 \mu\text{A}$ efficace à 5 MHz. Si la réponse du plasma était parfaitement linéaire, les cinq courbes seraient de formes identiques, hormis la séparation de 10 dB de l'une à l'autre. Dans la fig. 4.7., on constate deux principaux types d'écart par rapport à ce comportement idéal. En premier lieu, les courbes pour $A = 20$ dB et $A = 10$ dB présentent chacune une nette saturation aux environs du pic principal de la réponse, à la fréquence plasma. Au sommet du pic, la tension mesurée est même indépendante du niveau d'excitation dès que celle-ci dépasse 0 dB. On croit qu'il s'agit là entièrement de la non-linéarité de la réponse du plasma, bien qu'on ne soit pas encore en mesure de faire la part d'une éventuelle non-linéarité du récepteur. En deuxième lieu, la courbe pour $A = -20$ dB est moins régulière que les autres, surtout à la limite inférieure de la gamme de fréquences explorée ; cet écart est dû au bruit interne du récepteur. D'autres écarts mineurs, comme par exemple les petites variations d'une courbe à une autre de la fréquence du pic principal, sont vraisemblablement attribuables aux variations temporelles des caractéristiques du plasma pendant les mesures. Cette première expérience a permis de se faire une idée des niveaux d'excitation qu'il convenait d'employer.

La deuxième expérience, dont le but était de comparer les formes expérimentale et théorique de la réponse en fréquence, a eu lieu dans des conditions très semblables à celles de la première : la configuration et les dimensions de la sonde étaient les mêmes, et la densité du plasma était presque inchangée. Les mesures ont été effectuées aux niveaux d'excitation $A = 0$ dB et -10 dB seulement. Les résultats sont présentés dans la figure 4.9. L'abscisse est la fréquence d'excitation, normalisée par rapport à la fréquence plasma. L'ordonnée est la tension V reçue lorsque la sonde est dans le plasma, normalisée par rapport à la tension V_v reçue lorsque la sonde est dans le vide et portée au même niveau d'excitation. Des deux courbes expérimentales, celle dessinée par les croix est pour $A = 0$ dB, et celle en trait interrompu est pour $A = -10$ dB. La courbe théorique a été tracée en trait plein ; on l'a calculée après avoir ajusté les paramètres du plasma de façon à la faire coïncider au mieux possible avec les résultats : les valeurs ainsi obtenues sont de 4,45 MHz pour la fréquence plasma et de 3,66 mm pour la longueur de Debye. La comparaison de ces trois courbes suggère les remarques suivantes :

- la courbe théorique comporte, à la fréquence plasma, un creux étroit et profond qui ne se retrouve pas dans les résultats expérimentaux. Or, la théorie suppose que le plasma est à la fois Maxwellien et homogène. Quelques travaux théoriques faits pour des cas de plasmas homogènes mais non-Maxwelliens ont montré qu'il suffit parfois d'un petit écart par rapport à la Maxwellienne pour que ce creux disparaisse. Toutefois, on n'a pas d'autres preuves que le plasma utilisé dans cette expérience présentait un écart du type requis. En revanche, on sait que le plasma n'est pas très homogène (voir § 4.1.), mais il n'existe pas de théorie permettant de prédire l'influence de l'inhomogénéité sur la réponse en fréquence de la sonde. Ainsi l'explication de l'absence du creux est suspendu à des développements futurs, à la fois expérimentaux et théoriques.

- au pic (ou "résonance") de la réponse, la courbe pour $A = 0$ dB tombe nettement en-dessous de celle pour $A = -10$ dB. Il s'agit probablement de la non-linéarité de la réponse, encore sensible à 0 dB dans les conditions de cette expérience.

- de même, c'est probablement en raison du bruit interne du récepteur que le creux (ou "anti-résonance") vers $f = 1.22 f_p$ que prédit la théorie, et qu'on observe dans la courbe pour $A = 0$ dB, est beaucoup moins marqué dans celle pour $A = -10$ dB.

- hormis l'absence du creux à la fréquence plasma, il y a accord qualitatif entre les courbes expérimentale et théorique. Or, après que la densité électronique ait été ajustée pour faire coïncider les deux valeurs de la fréquence de la résonance, il ne reste que l'unique paramètre température électronique pour ajuster la forme de la courbe. Ce paramètre influe à la fois sur la hauteur de la résonance et sur la fréquence de l'anti-résonance. Le fait qu'on obtienne un accord raisonnable entre la théorie et l'expérience pour ces deux aspects de la courbe est un motif de satisfaction, et autorise la supposition qu'on pourrait obtenir un accord encore meilleur par des efforts purement technologiques, visant à éliminer les différentes sources d'erreurs.

La troisième et dernière expérience a donc été conçue de façon à vérifier certaines des hypothèses émises ci-dessus concernant la nature de ces sources d'erreurs. La sonde a été utilisée dans sa configuration perpendiculaire (fig. 4.7 B), avec les dimensions suivantes : $l = 5,5$ cm comme avant ; $d = 6,5$ cm, au lieu des 11,0 cm précédents. La réduction de la distance entre les deux antennes était censée permettre l'emploi de niveaux d'excitation plus faibles, sans être gêné par le bruit. On a employé les niveaux $A = -20$ dB et -10 dB, en espérant s'affranchir ainsi des effets non-linéaires. Les résultats obtenus à ces deux niveaux sont représentés respectivement, dans la figure 4.10, par les croix et par la courbe en trait interrompu. La courbe

théorique est en trait plein. A vue de ces trois courbes, les remarques suivantes s'imposent :

- dans les résultats expérimentaux, le pic principal de la courbe de réponse est dédoublé. C'est un effet de l'inhomogénéité du plasma à la grande échelle, effet qui avait été prédit antérieurement sur les bases d'une théorie à plasma froid avec collisions (J.M. CHASSERIAUX, "Potentiel crée par une charge ponctuelle pulsante dans un plasma inhomogène", Plasma Phys. 14, 763-781, 1972) ; la théorie pour le cas plus pertinent d'un plasma chaud sans collisions n'a pas encore été faite, mais il y a motif de penser que la prévision concernant le dédoublement du pic de résonance n'y sera pas modifiée. En gros, les deux pics correspondent à deux valeurs particulières de la fréquence plasma, la plus haute à celle au niveau des deux sphères les plus proches de la source de plasma, la plus basse à celle au niveau des deux sphères les plus éloignées. L'existence du dédoublement confirme que, dans les conditions de cette série d'expériences, l'inhomogénéité du plasma a eu un effet néfaste sur la qualité des mesures. Evidemment, toute en conservant la configuration rectangulaire des quatre sphères (fig. 4.7B), on pourrait réduire l'effet de l'inhomogénéité en orientant le plan du rectangle perpendiculairement à l'axe du caisson. On est en train de modifier le dispositif porte-antennes pour permettre cette réorientation, mais celle-ci ne sera jamais qu'un palliatif : pour que l'accord entre la théorie et l'expérience soit vraiment meilleur, il faut rendre plus homogène le plasma.

- aux alentours du pic de résonance, l'accord entre les deux courbes expérimentales est nettement meilleur que dans l'expérience précédente. Toutefois, la courbe pour $A = -10$ dB tombe un peu en-dessous de celle pour $A = -20$ dB, ce qui laisse croire que, même à -10 dB, la réponse n'est pas encore parfaitement linéaire.

- autour de l'anti-résonance, l'accord entre la courbe expérimentale pour $A = -10$ dB est en meilleur accord avec la courbe théorique que dans le cas précédent. Avec $A = -20$ dB, les mesures sont perturbées par le bruit du récepteur.

- malgré l'effet de l'inhomogénéité, plus sérieux que dans le cas précédent, il est toujours possible d'ajuster la température électronique dans le calcul de la courbe théorique pour qu'il y ait bon accord avec les courbes expérimentales en ce qui concerne à la fois la hauteur de la résonance et la fréquence de l'anti-résonance.

Ainsi déterminées, les caractéristiques moyennes du plasma pendant cette troisième expérience étaient les suivantes : fréquence de plasma 3,9 MHz ; longueur de Debye 4,06 mm.

La conclusion générale de cette série d'expériences est que l'accord avec la théorie n'est qu'approximatif. Dans leur rôle propre d'instruments de mesure des caractéristiques du plasma, les sondes quadripolaires H.F. n'offrent pour l'instant que des performances médiocres, quoique tout-à-fait comparables à - sinon meilleures que - celles des sondes électrostatiques (sondes de Langmuir). Fort heureusement, plusieurs raisons de cet état de choses ont pu être identifiées, et se sont révélées être de nature purement technique ; elles ne mettent point en cause le principe de fonctionnement des sondes. Le progrès dans le développement des sondes exige donc l'amélioration des conditions techniques des expériences. Il faut à la fois améliorer la technologie du caisson à plasma, et celle de l'électronique des sondes, ce qui paraît parfaitement faisable.

Dans le caisson, il faut surtout rendre le plasma plus homogène. Pour cela, on est en train d'installer un système de confinement du plasma au moyen d'un champ magnétique multipolaire. Ce système, qui a été conçu et mis au point aux Etats-Unis, a été utilisé plus récemment avec succès à l'Ecole Polytechnique en France. Au C.R.P.E., l'installation dans le caisson des aimants de confinement vient d'être achevée, mais les essais de mise au point du système risquent de durer encore plusieurs mois. Quelques essais préliminaires ont mis en évidence une réduction d'environ 10 fois des gradients de densité du plasma sur l'axe du caisson ; il semble que le caractère Maxwellien de la fonction de distribution des vitesses électroniques s'est aussi amélioré.

Accessoirement, et compte tenu du temps nécessaire pour faire chaque expérience, il faut veiller sur la stabilité du plasma dans le temps. Or, celle-ci dépend principalement de l'équilibre thermique de la source du plasma, équilibre qui est perturbé lorsqu'on coupe la source afin de pouvoir faire des mesures avec les sondes dans le vide ; ces mesures sont nécessaires pour la normalisation de celles faites dans le plasma. On envisage donc l'installation d'un volet mécanique, permettant d'interrompre le jet de plasma sans modifier l'état de fonctionnement de la source ; l'action du volet serait programmable à partir du T 2000.

Du côté de l'électronique, le point essentiel est l'amélioration de la sensibilité du récepteur grâce à une réduction du niveau du bruit interne, et de là l'augmentation de sa dynamique. Il est également souhaitable qu'on améliore la précision des mesures au moyen d'une séquence sophistiquée d'étalonnage automatique, commandée par le T 2000. Un tel étalonnage permettrait de distinguer entre la non-linéarité de la réponse du plasma, et celle due éventuellement à l'électronique.

Enfin, il va falloir modifier la partie de l'électronique associée directement aux antennes, de façon à permettre à chacune d'elles de fonctionner soit en émission, soit en réception. Il serait alors possible d'effectuer alternativement, dans le même plasma, des expériences en mode actif et en mode passif, ainsi qu'il le faut pour déterminer la fonction de distribution électronique d'un plasma hors d'équilibre.

4.3. Mode passif :

Pendant que les travaux de modification du caisson suivent leur cours, de sorte que nous ne pouvons plus faire d'expériences scientifiques, nous dirigeons notre effort du côté technique. Là, un choix s'impose : soit on apporte, à l'ensemble pour le mode actif, les améliorations dont le besoin a été noté ci-dessus ; soit on complète l'ensemble pour le mode passif, jusqu'à ce que ses performances soient semblables à celles du mode actif.

C'est cette dernière ligne de conduite que nous avons choisie.

Les travaux correspondants comportent la mise au point du deuxième dipole de réception ainsi que de la deuxième partie de l'ensemble électronique (voir § 4.1.). A ces divers travaux mécaniques et électroniques s'ajoute la programmation du T 2000 pour faire fonctionner le dispositif expérimental en mode passif.

Ces travaux sont en cours en ce moment, et nous espérons que nous les aurons achevés à l'époque où le caisson rentrera en service. Dans ce cas, les premiers essais expérimentaux devront pouvoir se faire dans le courant du mois de décembre 1975.

5. CONCLUSION

Le but ultime de ce programme -à savoir, la mise au point d'un nouvel instrument de mesure de la fonction de distribution des électrons supra-thermiques- paraît toujours réalisable et s'est nettement rapproché à la suite des travaux décrits ci-dessus. La majeure partie des travaux théoriques nécessaires ayant été accomplie, ce but doit pouvoir être atteint en passant par trois étapes expérimentales :

1) La démonstration, dans un plasma de laboratoire en équilibre, de l'accord entre les formes théoriques et expérimentales de chacune des fonctions $Z(f)$ et $S(f)$, moyennant l'ajustement des seuls paramètres physiques, densité et température électroniques.

2) La mesure en laboratoire de la fonction de distribution des électrons supra-thermiques dans un plasma mis hors d'équilibre artificiellement.

3) La véritable expérience spatiale, où l'on répète les deux étapes précédentes dans le plasma ionosphérique, en équilibre de nuit et hors d'équilibre de jour.

Cependant, les travaux expérimentaux décrits dans le présent rapport ne constituent qu'une partie de l'étape 1) ci-dessus. On s'est limité au mode actif, et l'accord constaté avec la théorie n'est qu'approximatif. On attend à ce qu'il en soit de même pour les prochaines expériences en mode passif. Ainsi la majorité de ce programme expérimental reste à effectuer.

Tout d'abord, pour en achever la première étape, il faudra procéder aux améliorations techniques prévues, à la fois sur le caisson à plasma et sur le dispositif expérimental. En suite, il faudra répéter les mesures en modes actif et passif dans les conditions expérimentales ainsi améliorées. C'est notre programme de travail pour 1976, qui a fait l'objet d'une proposition soumise

au C.N.E.S. au printemps 1975, et récemment approuvée par son groupe ad hoc "Haute atmosphère neutre et ionisée".

Vers la fin 1975 ou le début 1976, nous espérons recevoir l'appel d'offres de l'Agence Spatiale Européenne concernant la première occasion d'effectuer des expériences de ce type à bord de la navette spatiale de la N.A.S.A. Il s'agit du premier vol du laboratoire spatial ("Spacelab"), construit par l'A.S.E., dans le cadre du programme AMPS ("Atmosphère, Magnétosphère, and Plasmas in Space") ; ce vol - le dix-neuvième pour la navette - est prévu en 1981. En même temps que nous répondons à cet appel d'offres, nous adresserons au C.N.E.S. la proposition de programme correspondante, en y prévoyant que l'étude de l'instrument embarquable - version améliorée de celui qu'on utilise actuellement - commence en 1977. Le prototype de cet instrument pourrait servir d'abord à l'étape 2) des expériences en laboratoire, avant l'étape 3) où le modèle de vol sera mis en oeuvre dans l'espace. Pour préparer cette dernière étape, il faudra étendre la théorie de façon à tenir compte de la présence du champ magnétique terrestre.

Tout ce programme s'insère dans un ensemble plus vaste de recherches, menées au C.R.P.E. depuis plusieurs années, sur des méthodes nouvelles pour la métrologie des plasmas spatiaux. Un article de synthèse sur ce sujet est en cours de rédaction (STOREY, 1976).

REMERCIEMENTS

Pour terminer, il convient de remercier le personnel technique ayant participé à ce programme. Monsieur PHAN TAN KHUE a été responsable du dispositif expérimental. Monsieur P. GILLE, responsable du T 2000, a prêté sa main à la mise au point du logiciel. L'équipe du caisson à plasma - Messieurs Y. ARNAL et P. FROT - ont bien voulu le mettre en oeuvre et l'adapter à nos fins.

Les travaux mécaniques ont été effectués dans les ateliers du C.R.P.E. à Orléans et du Laboratoire de Géophysique Externe (ex-G.R.I.) à Saint-Maur.

PUBLICATIONS

POTTELETTE R., ROOY B. et V. FIALA, 1975, "Theory of the mutual impedance of two small dipoles in a warm isotropic plasma", J. Plasma Phys. 14 (Part 2), 209-243, 1975.

POTTELETTE R. et C. CHAULIAGUET, 1976, "Theoretical cross-spectrum of the microfield measured by two small dipoles in a warm isotropic plasma", en cours de rédaction, pour soumission au J. Plasma Phys.

POTTELETTE R., 1976, "A diagnostic method for weak electrostatic turbulence in the ionosphere", à paraître dans "Space Research XVI".

STOREY L.R.O., 1976, "The quantitative study and metrological use of ionospheric plasma resonances", en cours de rédaction, pour soumission à Space Sci. Rev.

ILLUSTRATIONS

- 4.1. Vue générale de l'enceinte de simulation, avec les bobines qui permettent de compenser le champ magnétique terrestre.
- 4.2. Configuration des bobines compensatrices.
- 4.3. Variation suivant l'axe du champ magnétique compensé.
- 4.4. Nouvelle source de plasma du type Kaufman.
- 4.5. Schéma de l'ensemble utilisé pour l'étude du mode actif.
- 4.6. Schéma de l'ensemble utilisé pour l'étude du mode passif.
- 4.7. Configurations d'antennes : (A) parallèle ; (B) perpendiculaire.
- 4.8. Réponse en fréquence de la sonde, en configuration parallèle, à plusieurs niveaux d'excitation.
- 4.9. Fonctions de transfert théorique et expérimentale, en configuration parallèle :

————— courbe théorique
----- points expérimentaux (A = -10 dB)
x x x x x points expérimentaux (A = 0 dB)

- 4.10. Fonctions de transfert théorique de expérimentale, en configuration perpendiculaire :

————— courbe théorique
----- points expérimentaux (A = -10 dB)
x x x x x points expérimentaux (A = -20 dB)

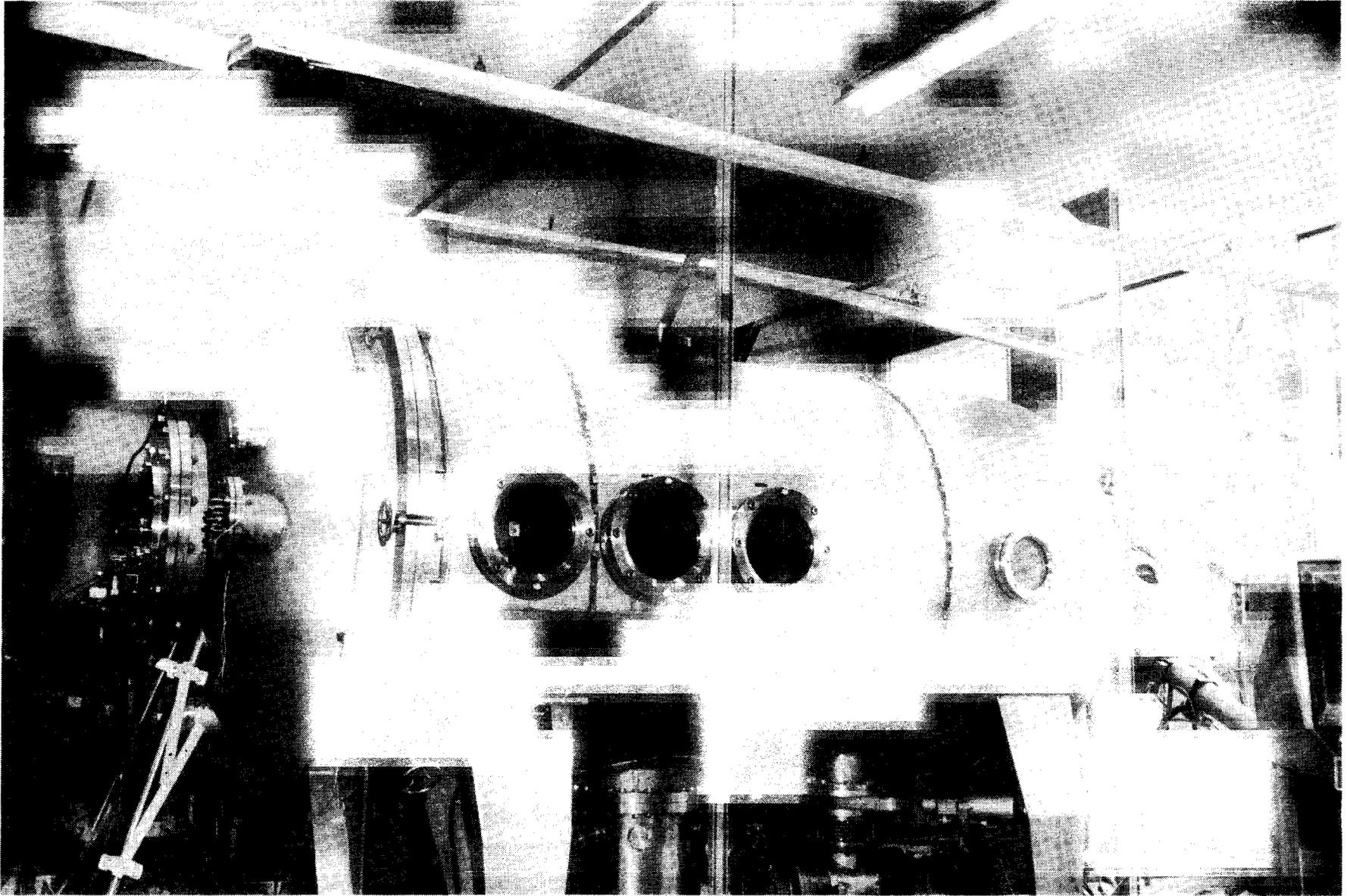


FIG. 4.1.

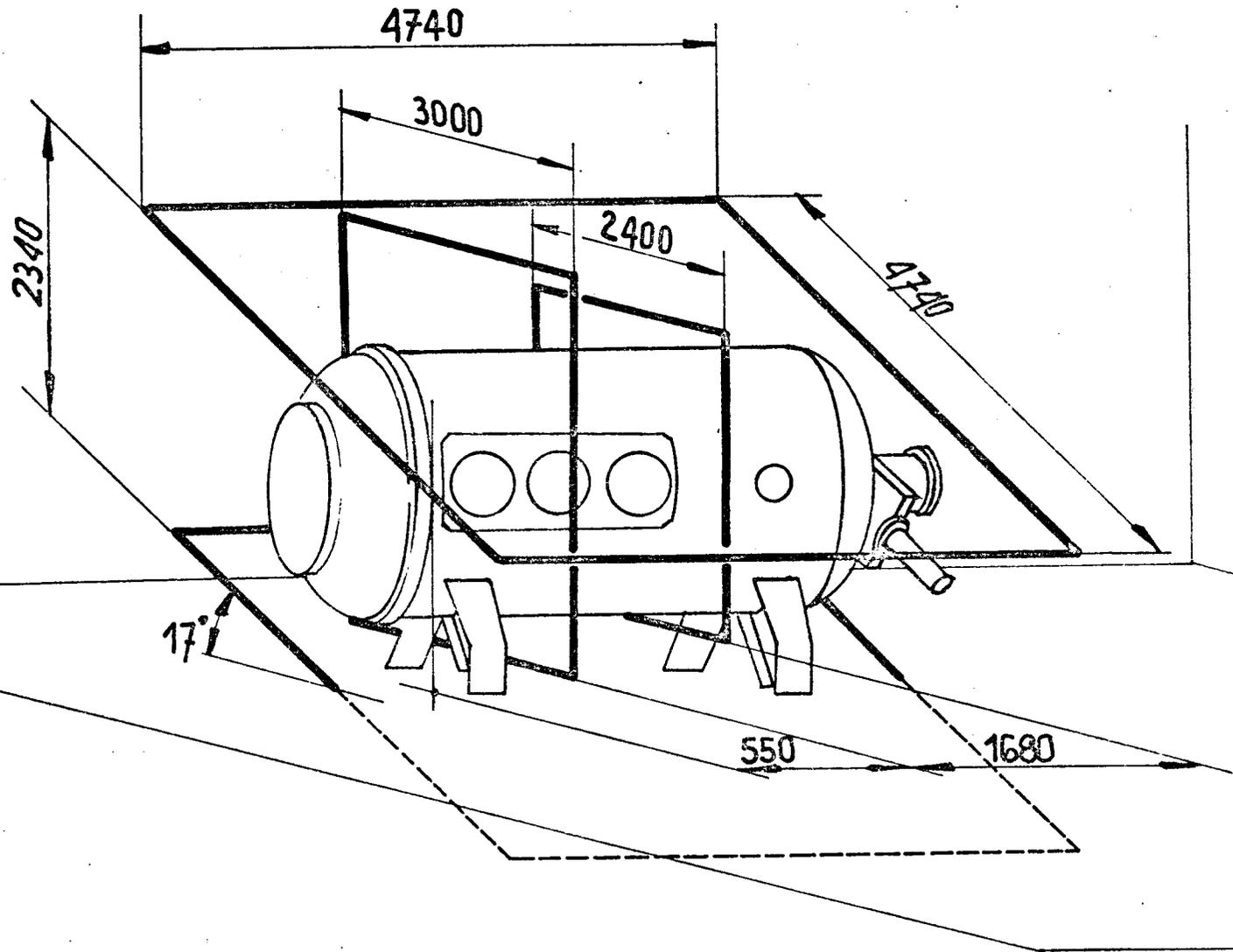


FIG.4.2

Configuration des bobines compensatrices

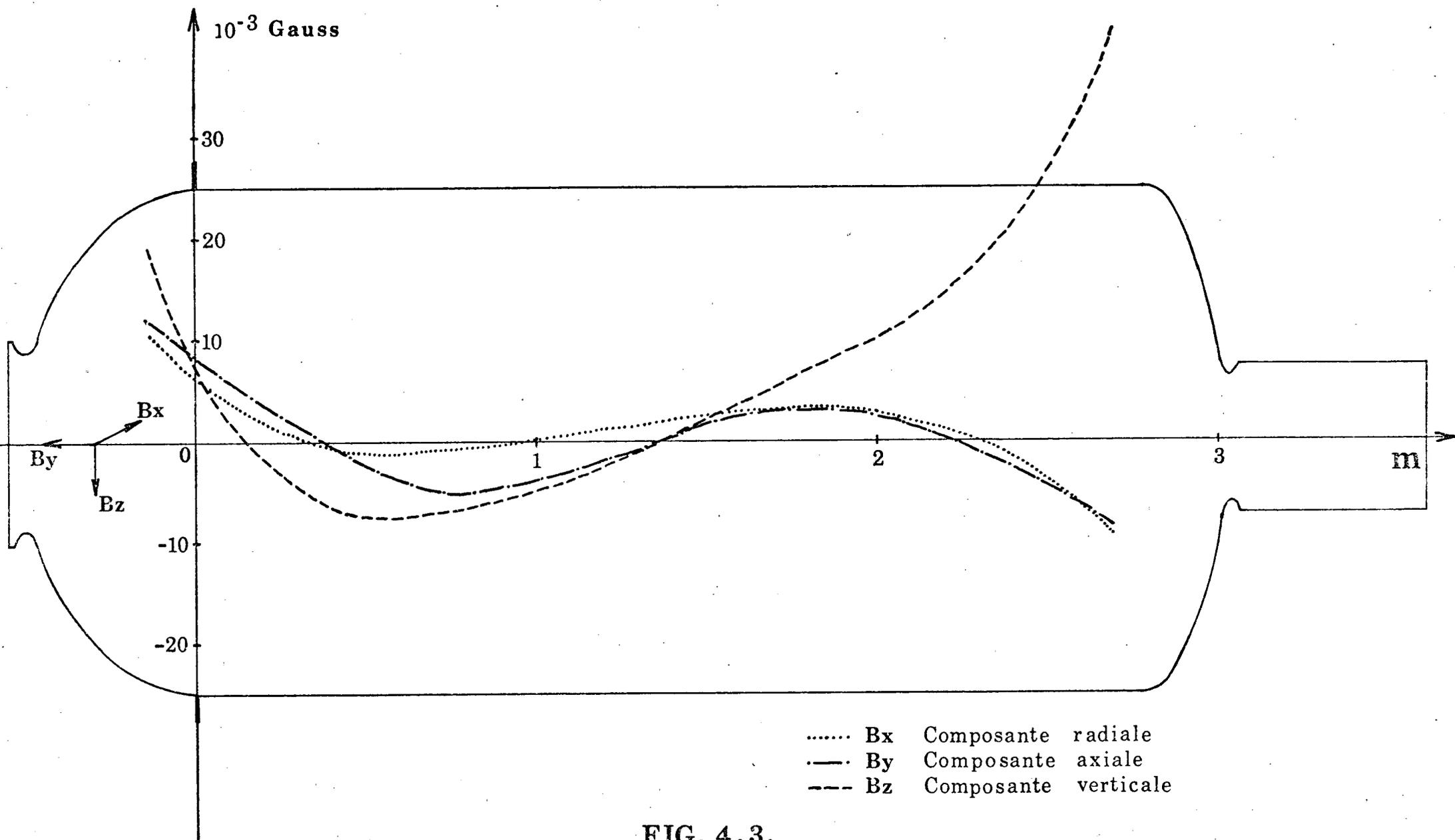


FIG. 4.3.

Variation suivant l'axe du champ magnétique compensé

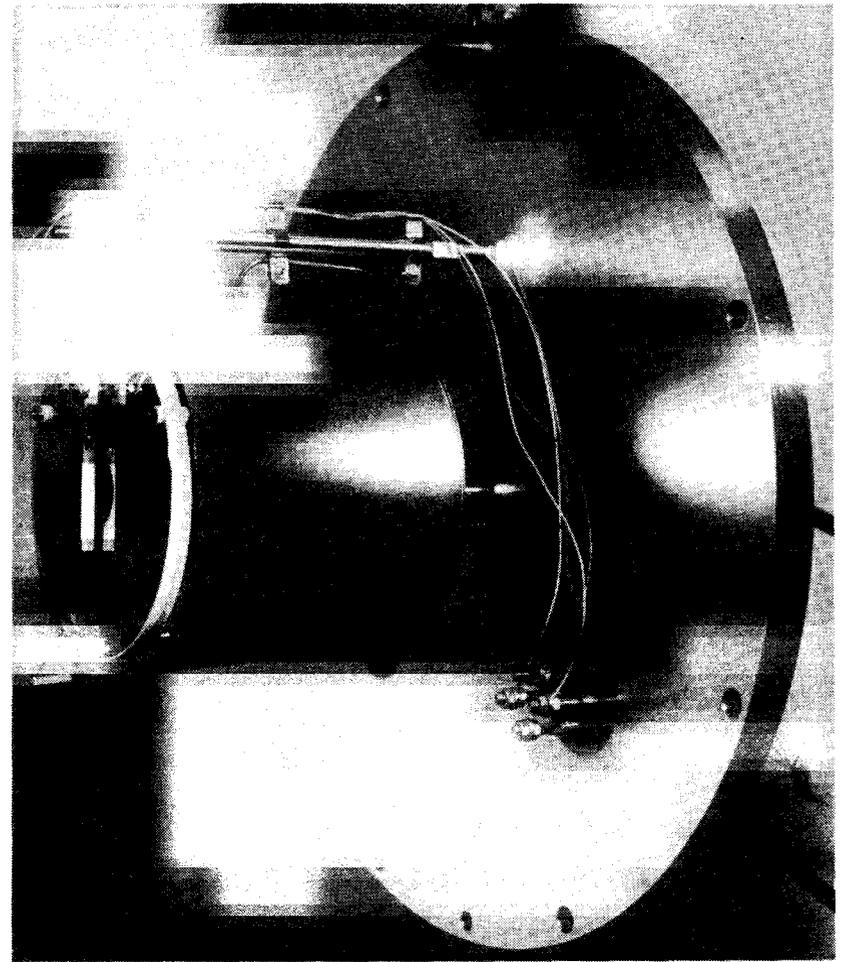
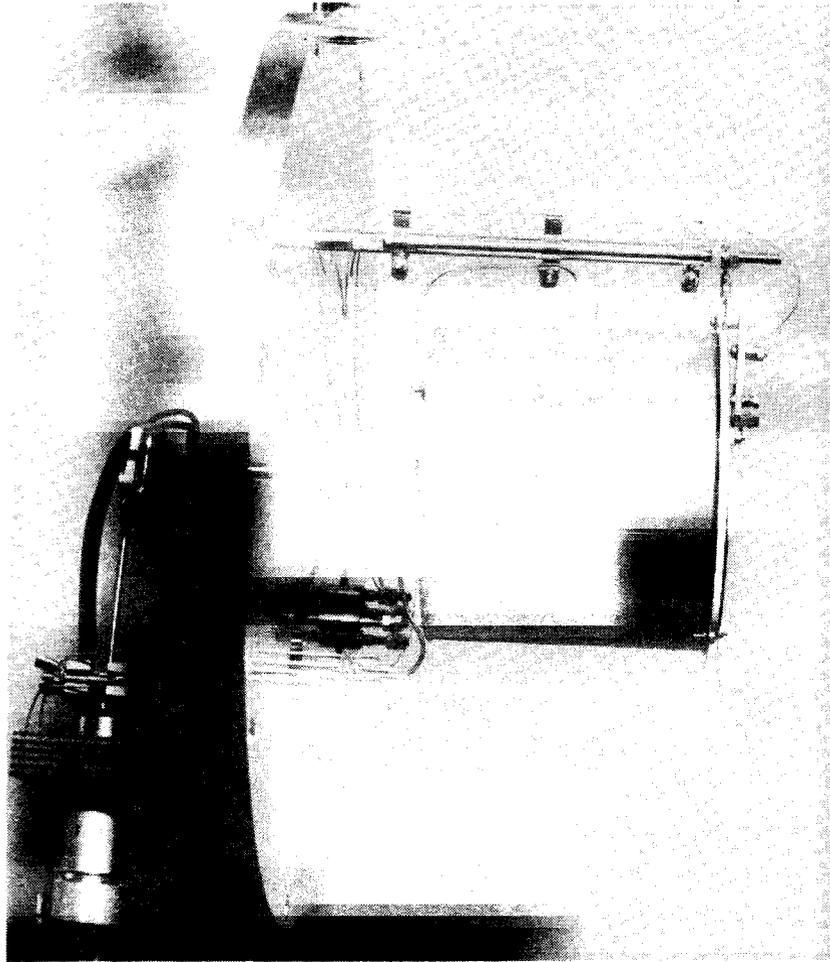


FIG. 4.4.

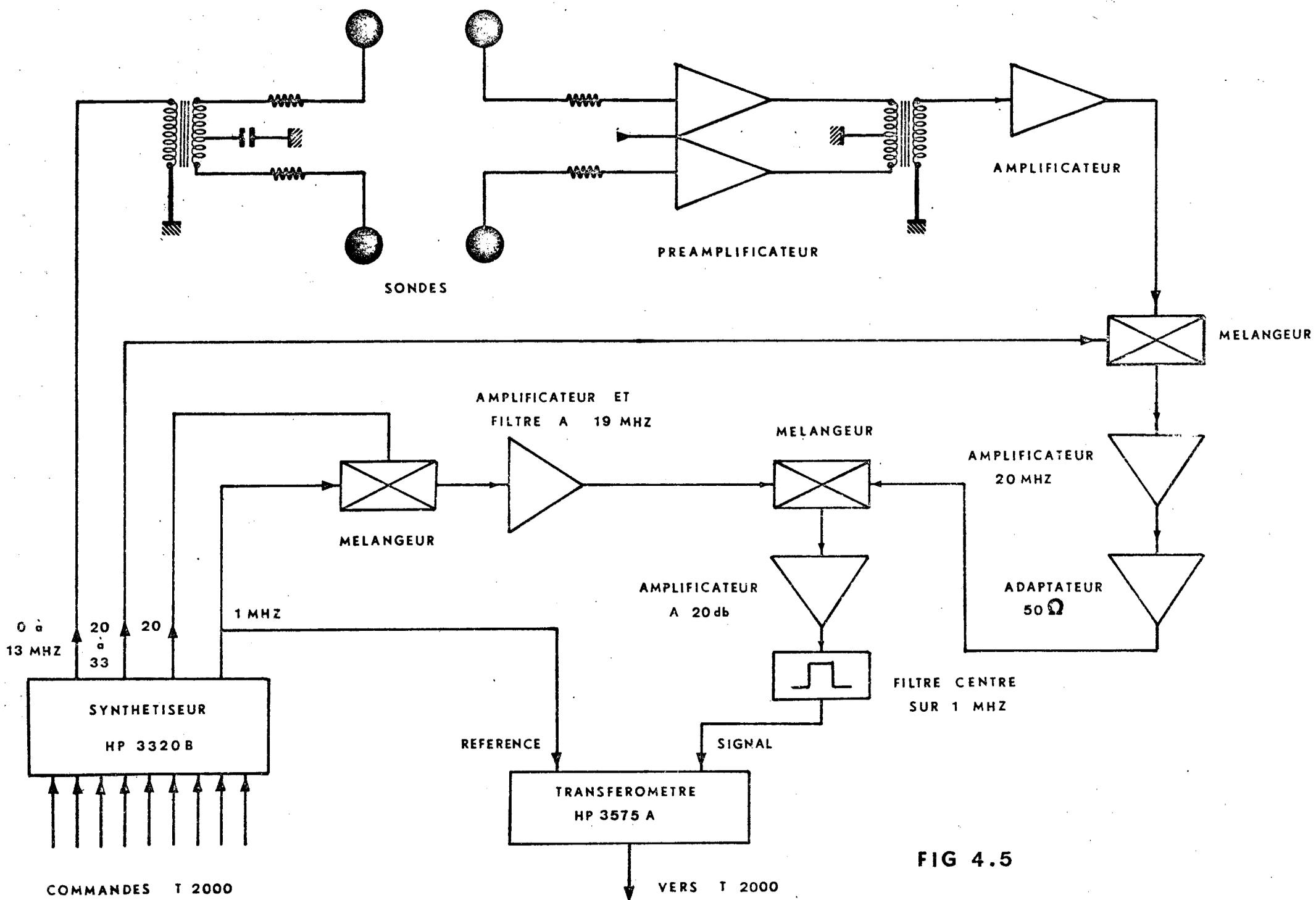


FIG 4.5

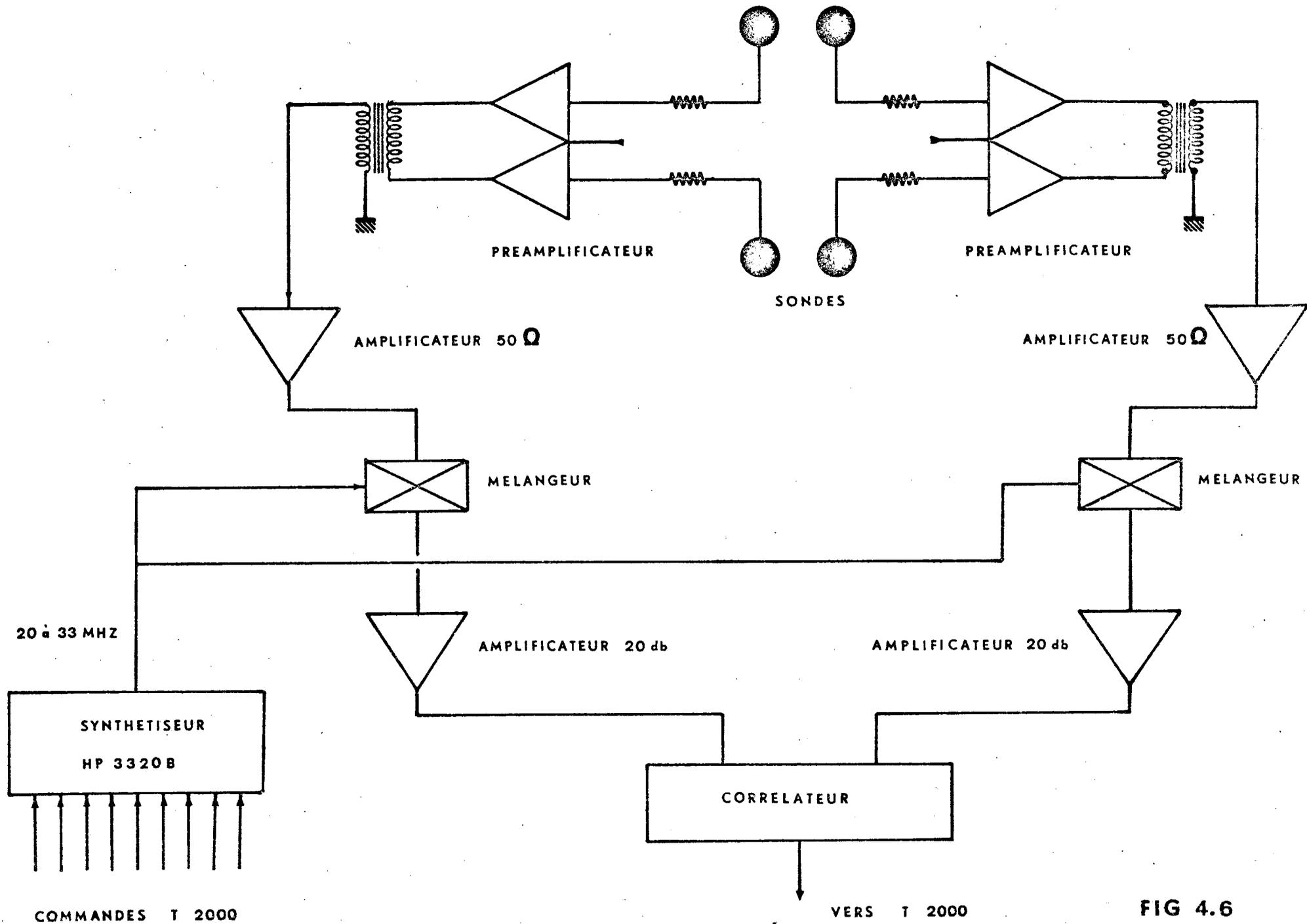


FIG 4.6

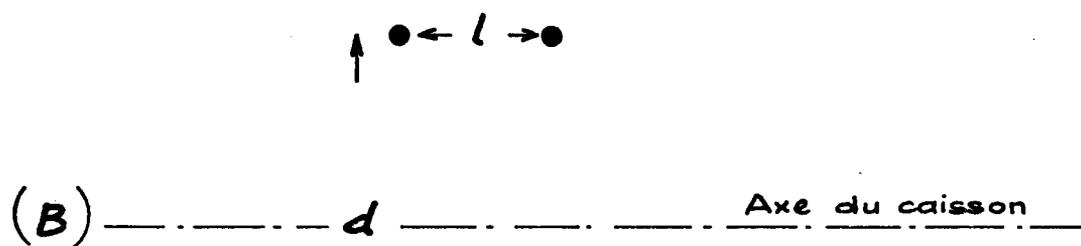
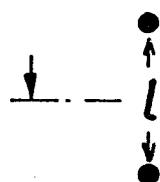
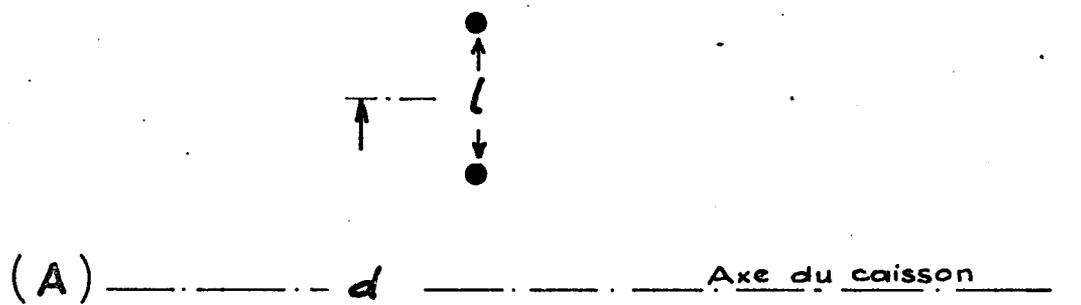


FIG. 4.7. Configurations d'antennes

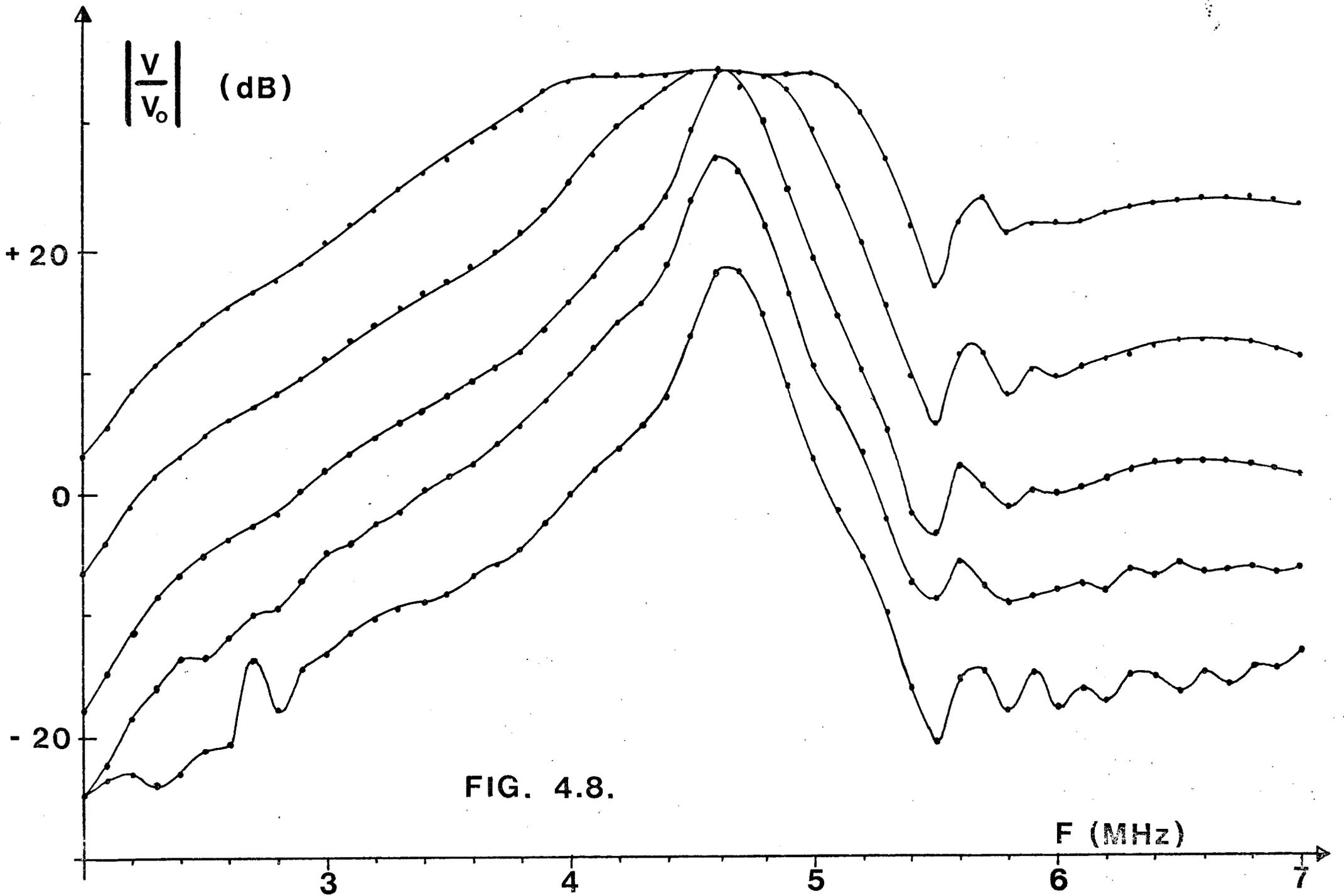


FIG. 4.8.

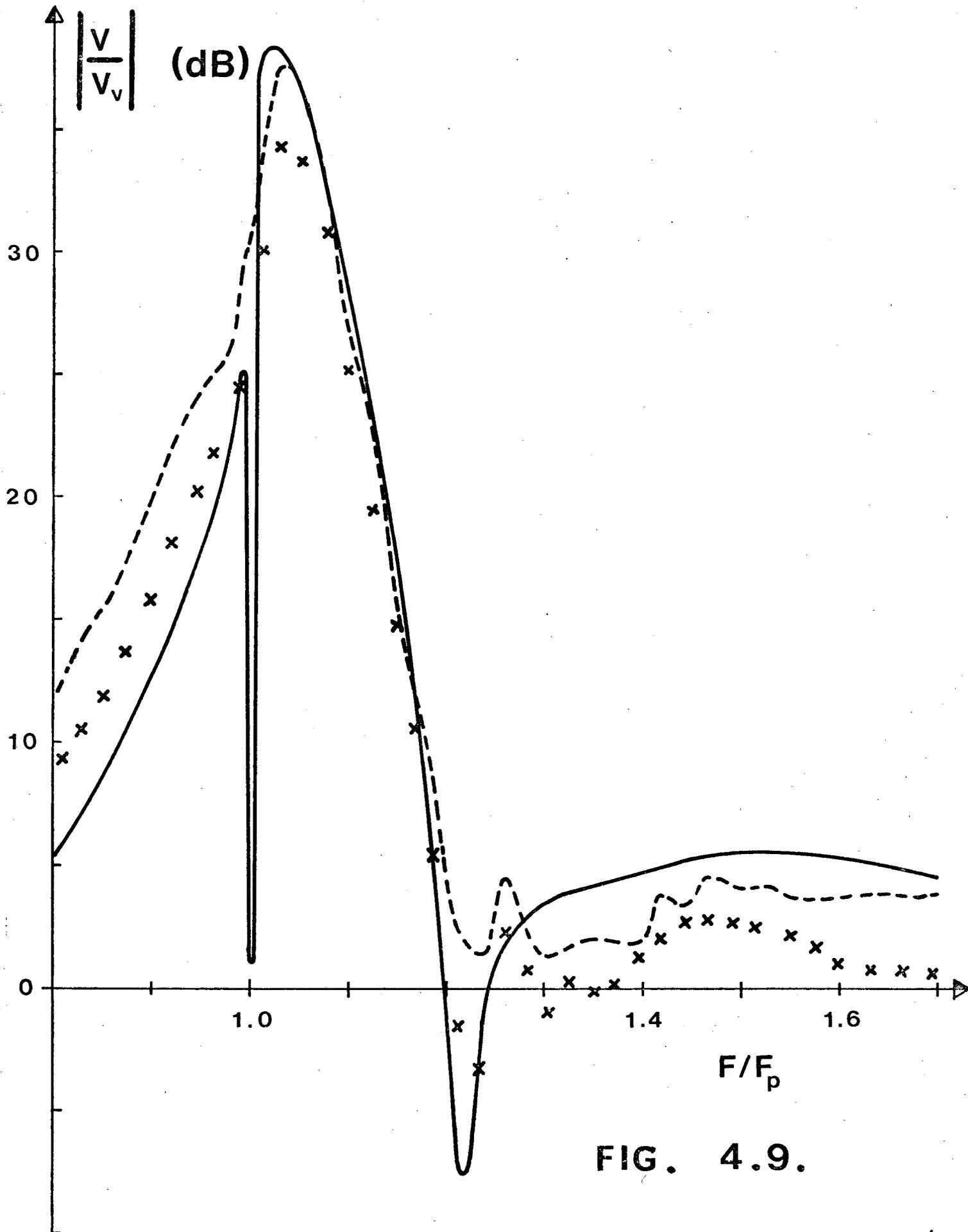


FIG. 4.9.

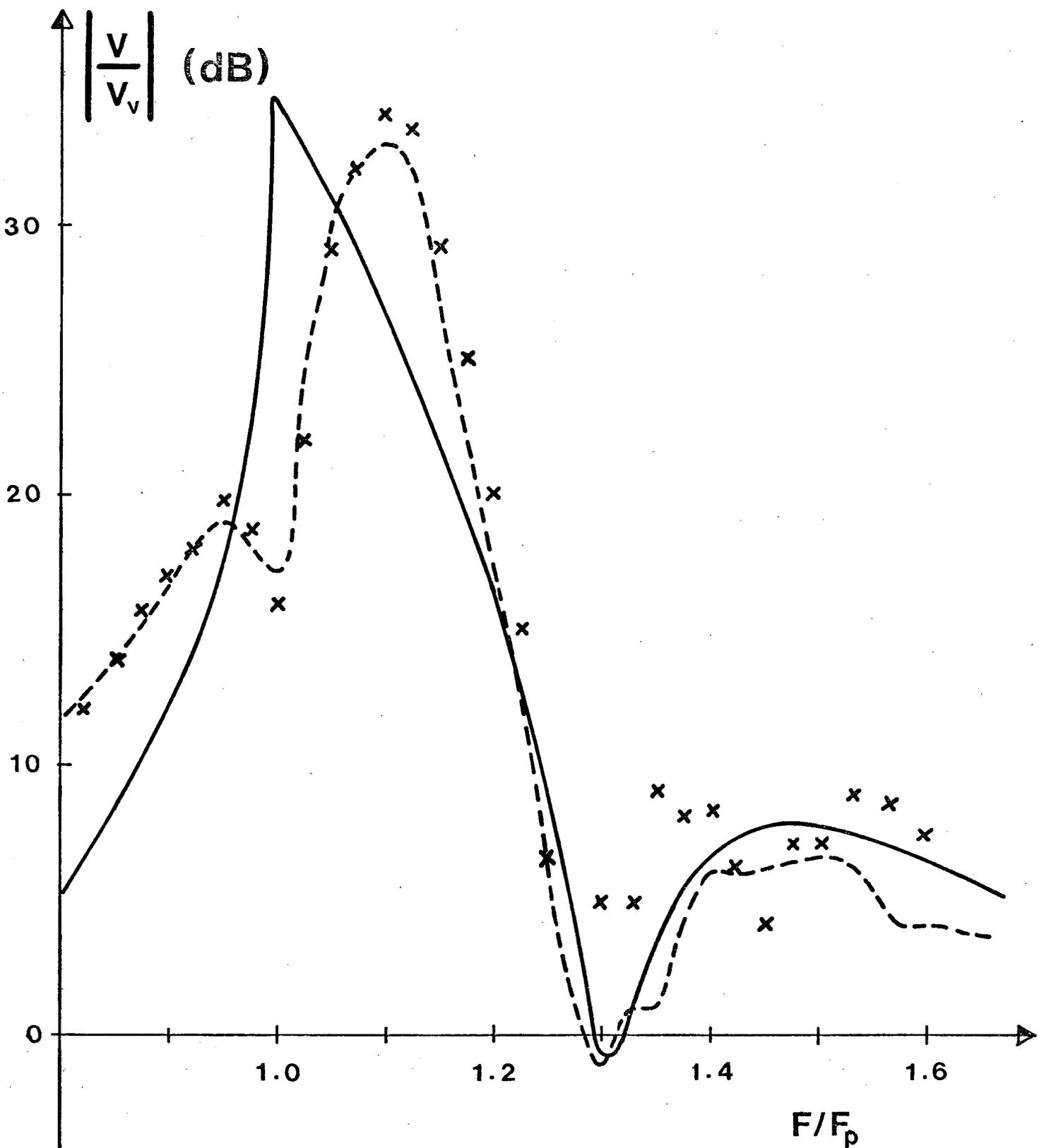


FIG. 4.10.

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*