

Simulation du plasma ionosphérique dans le caisson SIMLES de la SOPEMEA à Toulouse

Yves Arnal, D. Henry, J.F. Karczewski

▶ **To cite this version:**

Yves Arnal, D. Henry, J.F. Karczewski. Simulation du plasma ionosphérique dans le caisson SIMLES de la SOPEMEA à Toulouse. [Rapport de recherche] CRPE - Document de travail n° 1016, Centre de recherches en physique de l'environnement terrestre et planétaire (CRPE). 1977, 22 p. hal-02191407

HAL Id: hal-02191407

https://hal-lara.archives-ouvertes.fr/hal-02191407

Submitted on 23 Jul 2019

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

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

RP 1821 (23)

CENTRE NATIONAL D'ETUDES DES TELECOMMUNICATIONS

CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

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

CRPE

DOCUMENT DE TRAVAIL
CRPE /1016

BIBLIOTHEQUE DU CENTRE C.N.E.T. ISSY-LES-MOULINEAUX

simulation du plasma ionosphérique dans le caisson SIMLES de la SOPEMEA à Toulouse

par
Y. ARNAL,
D. HENRY,
J.-F. KARCZEWSKI.

10 JAN. 1978

CENTRE NATIONAL D'ETUDES
DES TELECOMMUNICATIONS

CENTRE NATIONAL DE
LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

CENTRE DE RECHERCHE EN PHYSIQUE DE

L'ENVIRONNEMENT TERRESTRE ET PLANETAIRE

DOCUMENT DE TRAVAIL/1016

SIMULATION DU PLASMA IONOSPHERIQUE

DANS LE CAISSON SIMLES DE LA SOPEMEA

A TOULOUSE

par

Y. ARNAL - D. HENRY - J.F. KARCZEWSKI

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

45045 - ORLEANS CEDEX

Le chef du Département PCE

C. BEGHIN

Le Directeur

J. HIEBLOT

Aout 1977

Ont participé, à la préparation de l'expérience

Messieurs FERGEAU, FROT, HAUSER, MICHAU,

et à son dépouillement

Messieurs BEGHIN, DEBRIE, LEBRETON.

-=-=-=-=-

REMERCIEMENTS

Ce travail a été mené à bien grâce à la collaboration et l'aide apportées par la SOPEMEA et le C.N.E.S. dans la préparation et le déroulement des essais.

Nous tenons à remercier en particulier toute l'équipe technique du SIMLES et son responsable Monsieur DUPRAT, ainsi que les personnels de la division "satellite" et son responsable Monsieur HAMEURY.

PLAN

I. INTRODUCTION

II. DESCRIPTION DU DISPOSITIF EXPERIMENTAL

III. RESULTATS EXPERIMENTAUX OBTENUS

III.1. Résultats généraux

III.2. Contrôle de la température électronique

III.3. Gradients de température et densité dans l'enceinte

III.4. Mesure avec les sondes H.F. isoprobes

IV. CONCLUSION

ILLUSTRATIONS

REFERENCES BILIOGRAPHIQUES

I. INTRODUCTION

Dans le cadre du projet franco-soviétique de satellite ARCAD-3, l'idée de tester la maquette du satellite en caisson dans une ambiance de plasma a été envisagée.

La maquette d'un diamètre de 2 m équipée de bras porte-sonde de taille réduite, présente un encombrement de 4 à 5 m de diamètre. Le simulateur (SIMLES) thermique, vide et solaire de la SOPEMEA ayant un diamètre de 6,2 m et un volume de 300 m^3 permet d'envisager favorablement cet essai. Il fallait cependant s'assurer qu'un plasma de type ionosphérique pourrait être produit dans ce caisson et définir les principales caractéristiques du milieu. Ce rapport décrit les essais et les résultats obtenus.

II. DESCRIPTION DU DISPOSITIF EXPERIMENTAL

La figure (1) donne les principales caractéristiques géométriques du SIMLES qui comprend

(1) Une enceinte principale verticale destinée aux essais thermiques où sont placés près des parois les écrans thermiques revêtus de peinture noire isolante.
Dans cette enceinte est monté un dispositif de simulation d'attitude et de spin (SIMAT), (Voir Figure 2) qui porte les satellites durant les essais.

(2) Une enceinte horizontale utilisée pour la simulation solaire et où sont connectées les différentes pompes à vide primaire et secondaire.

(3) Une porte en deux parties amovibles, optiquement étanche de 3,3 m de diamètre composée d'écrans thermiques peints en noir sépare les deux chambres. La porte est ouverte pour la simulation solaire, et fermée lors des essais thermiques. Celle-ci sera en position ouverte pour notre étude et nous verrons que l'absence de paroi sur un tel diamètre perturbe l'homogénéité du plasma.

Le vide secondaire est réalisé par deux pompes cryogéniques à hélium gazeux à 20° K, et deux sublimateurs de titane qui peuvent être alimentés en azote liquide. Cet équipement a été décrit par ailleurs |1|. Pour nos essais les deux pompes cryogéniques étaient en fonctionnement et présentaient une vitesse de pompage de 40.000 l/s pour le gaz utilisé à savoir l'argon. En outre l'alimentation en azote liquide des panneaux d'un sublimateur de titane assurait le pompage de la vapeur d'eau.

La source à plasma utilisée est une source de type KAUFMAN. Elle produit un plasma de synthèse par la neutralisation forcée d'un faisceau d'ions extrait d'un plasma de décharge |2|. La source est fixée à la bride supérieure du caisson vertical, et le faisceau de plasma est dirigé vers le bas suivant l'axe vertical (voir Figure (1)).

Les capteurs utilisés pour caractériser le plasma sont montés sur un bras horizontal de 3 m de diamètre (voir Figures (2) (3)), fixé en son centre sur un mat solidaire de la table tournante (mouvement de spin) du SIMAT. Le bras peut tourner autour de l'axe central et sa course totale verticale est de 3 m. Le volume total de plasma testé est représenté par la zone ombrée sur la Figure (1). La longueur des cables blindés de liaisons des capteurs aux sorties extérieures du caisson est de 20 mètres environ. Les préamplificateurs et amplificateurs étant près des capteurs, l'information analogique est transmise sous basse impédance et à fort niveau aux appareils d'enregistrement.

Les sondes de Langmuir employées et les précautions à prendre dans leur utilisation pour les mesures des faibles températures électroniques dans un faisceau de plasma ionosphérique, sont décrites dans une communication |3|.

Les sondes radiofréquences (Isoprobe) ont été développées au laboratoire pour différents projets spatiaux et en particulier pour le satellite ARCAD-3 |4|.

Enfin la sonde bifilaire à résonance |5| placée en haut de mat à une distance fixe par rapport à la source est utilisée pour étudier la stabilité temporelle du plasma.

III. RESULTATS EXPERIMENTAUX

III.1. Résultats généraux

A une distance de quatre mètres de la source nous avons vérifié les possibilités de simulation pour un plasma d'argon avec une vitesse ionique de 12 Km/s et une pression résiduelle de $7\ 10^{-6}$ Torr.

1) La température électronique peut être controlée entre 300 et 3000° K. Ceci n'est pas un résultat surprenant car dans les caissons à parois isolantes |6|, comme dans les chambres à parois métalliques |2| ce phénomène a été observé et expliqué |2|. Cependant du côté de la porte qui est ouverte pour les essais, les températures électroniques sont plus élevées que celles obtenues à l'opposé.

2) La densité peut varier dans une gamme comprise entre 10^4 et 10^6 cm^{-3} (soit une fréquence plasma de 1 à 10 MHz). Il existe aussi pour ce paramètre une inhomogénéité dans le plan horizontal due essentiellement à l'ouverture entre les deux caissons.

3) La stabilité temporelle des caractéristiques du plasma est remarquable. En effet, les informations recueillies par la sonde dipolaire à résonance qui est fixe par rapport à la source pendant les essais donne les résultats suivants :

t_o	f_p = 9,5 MHz
t_o + 2 heures	f_p = 9,7 MHz
$\Delta f_p/f_p$	$\simeq$ 1 % par heure
$\Delta n/n = 2\ \Delta f_p/f_p$	$\simeq$ 2 % par heure

Cette excellent stabilité est essentiellement due à la grande capacité de pompage de l'installation (40.000 l/s pour l'argon) qui assure un bon fonctionnement de la décharge dans la source à plasma, (flux d'argon 3 10^{-2} Torr.l.S^{-1}).

4) Le champ magnétique terrestre a été mesuré dans le caisson avec des capteurs montés sur le même dispositif utilisé pour les essais de plasma |7|. La composante horizontale B_H normale au faisceau est de l'ordre de 0,1 gauss et l'angle compris entre B_H et l'axe XX' du soleil est de l'ordre de 25°, voir Figure (1). Cette composante normale au faisceau d'ions de 12 Km s^{-1} de vitesse provoque une rotation du faisceau qui se traduit par un déplacement perpendiculaire à l'axe de 3,5 cm à une distance de 6 m. de la source. Cette faible déviation traduit le fait que le temps de vol des ions dans le caisson (0,5 ms) est négligeable devant la période cyclotronique ionique (260 ms. pour l'argon dans un champ de 0,1 gauss).

Le champ magnétique terrestre a donc une action négligeable sur le faisceau d'ions, et son influence sur les électrons est peu sensible car le rayon de giration des électrons (4,3 cm pour les électrons de 600° K de température dans un champ de 0,22 G) est bien supérieur à la longueur de debye (2 à 5 mm). L'aspect collectif du plasma est conservé et dans certaines zones la fonction de distribution en énergie des électrons est maxwellienne. Cependant un léger gradient du champ magnétique dans la zone face à l'ouverture |7| ainsi que l'absence de paroi dans cette zone qui interdit toute reflexion des électrons du plasma (des électrons peuvent donc diffuser vers l'enceinte horizontale en créant un gradient de densité) peuvent apporter des perturbations dans la fonction de distribution des électrons comme nous le verrons dans le chapitre suivant.

III.2. Contrôle de la température électronique

Les études en laboratoire sur les plasmas de synthèse |2|, |6| ont montré qu'on pouvait contrôler la température électronique du plasma par confinement électrostatique. La figure (4) représente pour trois plasmas différents les caractéristiques log $I_e(V)$ permettant de visualiser la nature de la fonction de distribution et de déterminer la température électronique. Ces caractéristiques ont été obtenues avec la sonde électrostatique repérée (L 1) sur la figure (3) située suivant l'axe XX'.

Ces courbes montrent ;

- que les plasmas sont maxwelliens, car les parties de courbe situées à gauche des potentiels plasma V_p présentent des zones linéaires. Les pentes de ces droites donnent les températures électroniques d'après la relation ci-dessous

$$T_e = 5040\ \Delta V \qquad (1)$$

où ΔV en volts correspond à une décade de variation du courant électronique I_e.

- que l'élévation de la température électronique est provoquée par une augmentation du potentiel plasma. Cette dernière est une conséquence de la diminution de la puissance dissipée dans le neutraliseur à chauffage direct |2|.

III.3. Gradients de températures et densités

Pour des conditions de plasma inchangées, nous avons enregistré les caractéristiques I(V) de la sonde repérée (L 1) sur la figure (3) en différents points de mesure situés dans le plan vertical défini par les axes XX' et YY' (voir figure (1)) et répartis symétriquement par rapport à l'axe YY' (côté porte et côté opposé).

La sonde repérée (L2) sur la figure 3) était munie d'un amplificateur 100 fois plus sensible que celui associé à la sonde (L1) et les caractéristiques I(V) obtenues sur la sonde (L2) sont inexploitables à cause d'une saturation rapide du courant de sonde. Nous avions prévu un recoupement de sensibilité en deux gammes 10^{-10} A 5 10^{-8} A et 10^{-8} A 5 10^{-6} A car nous ne savions pas à priori le type de plasma qui serait produit dans l'enceinte.

Munis des informations recueillies par la sonde (L1) nous avons pu déterminer pour tous les points de mesures, la température électronique et la densité de plasma que nous présentons ci-dessous.

La figure (5, A) représente les variations de la température en fonction de l'éloignement par rapport à la source ; la courbe (a) correspond aux positions situées du côté opposé de la porte et la courbe (b) à celles du côté de l'ouverture (voir figure 1).

Nous pouvons constater sur ces résultats :

1) la dissymétrie déjà signalée qui se traduit par une plus forte température électronique dans le plasma situé vers la porte et une variation sensible de température aux environs de l'axe de l'ouverture.

2) la décroissance de la température avec l'éloignement par rapport à la source qui est caractérisée sur les courbes (a) et (b). C'est un résultat classique obtenu dans les caissons de simulation |2| |6|.

Notons que dans la zone perturbée la détermination de la température n'est pas facile car la fonction de distribution en énergie des électrons n'est pas très maxwellienne ; ce qui explique les barres d'erreurs importantes correspondant à ces mesures.

La figure (6) représente les courbes $\log I''_e(V) = f(V)$ dérivées secondes des courants électroniques en fonction du potentiel de sonde, pour quatre points de mesure situés dans un même plan horizontal distant de 4,5 m de la source. Ces courbes donnent une idée des fonctions de distribution en énergie des électrons F(E) qui seraient obtenues dans l'espace des potentiels par la relation

$$F_{(E)} \alpha I''_e \cdot V^{1/2} \qquad (2)$$

Les dérivées secondes $I''_e(V)$ ont été calculées par un programme numérique développé au laboratoire |8|.

Ces courbes montrent bien l'influence de la porte où par diffusion, les électrons les plus rapides vont vers l'enceinte horizontale et un nouvel équilibre dans la fonction de distribution est maintenue en permanence dans cette zone.

Nous avons essayé de fermer la porte en n'occultant pas totalement les écrans de sorte que le pompage soit assuré. Nous n'avons pas noté d'amélioration fondamentale des mesures effectuées. Notons que les écrans qui sont électriquement isolés du caisson présentent une structure discontinue (chevrons d'un baffle).

La figure (5, B) représente les variations de densité en fonction de l'éloignement par rapport à la source. Les densités n_e ont été calculées par la formule

$$I_p = \frac{1}{4} n_e . S . e . \left(\frac{8 kT_e}{\pi m}\right)^{1/2} \qquad (3)$$

où tous les éléments sont conus. T_e(°K) température électronique, $S(m^2)$ surface collectrice, I_p(A) courant au potentiel V_p, k constante de Boltzmann, m et e masse et charge de l'électron.

La difficulté pour déterminer la température électronique dans la zone perturbée entraîne une imprécision sur la mesure de la densité dans cette zone.

En revanche pour les positions symétriques, les mesures de densité et température à partir de la sonde électrostatique sont beaucoup plus fiables car le plasma est quasi-maxwellien.

On note sur ces courbes une dissymétrie des densités surtout lorsque l'on est près de la porte, et une décroissance de la densité avec l'éloignement par rapport à la source. Ce dernier résultat est classique |2|.

III.4. Mesures avec les sondes radiofréquences (isoprobes)

Les essais des sondes isoprobes consistaient à étudier leur condition d'auto-oscillation, et en particulier voir si les deux sondes distantes de 3 m pouvaient auto-osciller simultanément sur leur fréquence propre ou sur une fréquence unique à cause du couplage des capteurs par le plasma. Les essais dans le caisson du C.R.P.E. où les sondes isoprobes étaient seulement distantes de 50 cm, avaient montré que les sondes auto-oscillantes "accrochaient" sur une fréquence unique.

La figure (7) présente les courbes de réponses V f(Hz) des deux sondes oscillant simultanément. L'écart en fréquence $\Delta f \simeq 600$ kHz (soit 10 %) est du à la dissymétrie du plasma et la dissymétrie du montage des sondes S_1 et S_2 dont les positions des récepteurs et émetteurs sont opposées (voir figure 7).

Ces résultats sont positifs car ils montrent que les sondes auto-oscillent à la fréquence plasma du plasma local et qu'il n'y a pas de couplage entre les modes d'oscillations.

La dissymétrie des sondes était prévue car nous espérions mesurer la vitesse de dérive du plasma par mesure du déplacement d'une anti-résonance caractéristique (déplacement que l'on peut expliquer succintement comme étant dû à un effet doppler). Les résultats n'ont pas été concluant dans ce premier essai car il aurait fallu pouvoir retourner les sondes autour de l'axe support. Toutefois un écart a été détecté en effectuant une rotation d'un demi-tour ce qui revenait à remplacer les sondes entre elles.

IV. CONCLUSION

Les résultats présentés ci-dessus montrent qu'un plasma de type ionosphérique peut être simulé dans le caisson SIMLES, et les plages de variations des principaux paramètres ;

- température 300 à 3000° K
- densité 10^4 à 10^6 cm^{-3} soit 1 à 10 MHz de fréquence plasma
- longueur de debye 1 mm à 1 cm
- vitesse de faisceau 10 km/s

sont satisfaisantes.

Les gradients de température et densité obtenus dans un plan perpendiculaire au faisceau et la présence d'un champ magnétique terrestre non uniforme, empêchent des études quantitatives précises de physique des plasmas. Cependant, l'importance du volume de plasma produit (30 à 40 m^3) autorise l'étude du comportement de plusieurs capteurs fonctionnant simultanément afin de tester leur cohabitation, l'étude qualitative d'un capteur de grande dimension (1 à 2 m) difficilement réalisable dans d'autres caissons. Le mouvement d'ensemble du plasma permet de voir l'influence des structures d'un satellite ou d'une fusée et les perturbations apportées dans leurs propres entourages.

En conclusion, l'adjonction d'une source à plasma au SIMLES permettrait de tester une maquette de satellite (ou même le satellite lui-même) dans des conditions très proches des conditions réelles de vol, vide, contrainte thermique, flux solaire, plasma. Cet essai global est prévu pour le satellite franco-russe ARCAD 3 et peut être envisagé favorablement à la suite de ces premiers essais.

BIBLIOGRAPHIE

|1| F. PREVOT et coll., Le Vide supplément au n° 139, 169-174, 1969.

|2| Y. ARNAL, Thèse Docteur-Ingénieur, Université d'ORLEANS, 1977.

|3| J.M. ILLIANO, L.R.O. STOREY, Planet Space Sci., 22, 873-878, 1974.

|4| C. BEGHIN, J.F. KARCZEWSKI, Note Technique 1005, C.R.P.E., 1975.

|5| C. RENARD, ELDO/ESRO, 4, 309, 1972.

|6| P. PIGACHE, AIAA Journal, Vol 11, 2, 129-130, 1973.

|7| BENEZET, Note Technique 33-18, SOPEMEA, 1977.

|8| D. HENRY, Thèse, Université Paris VII, 1974.

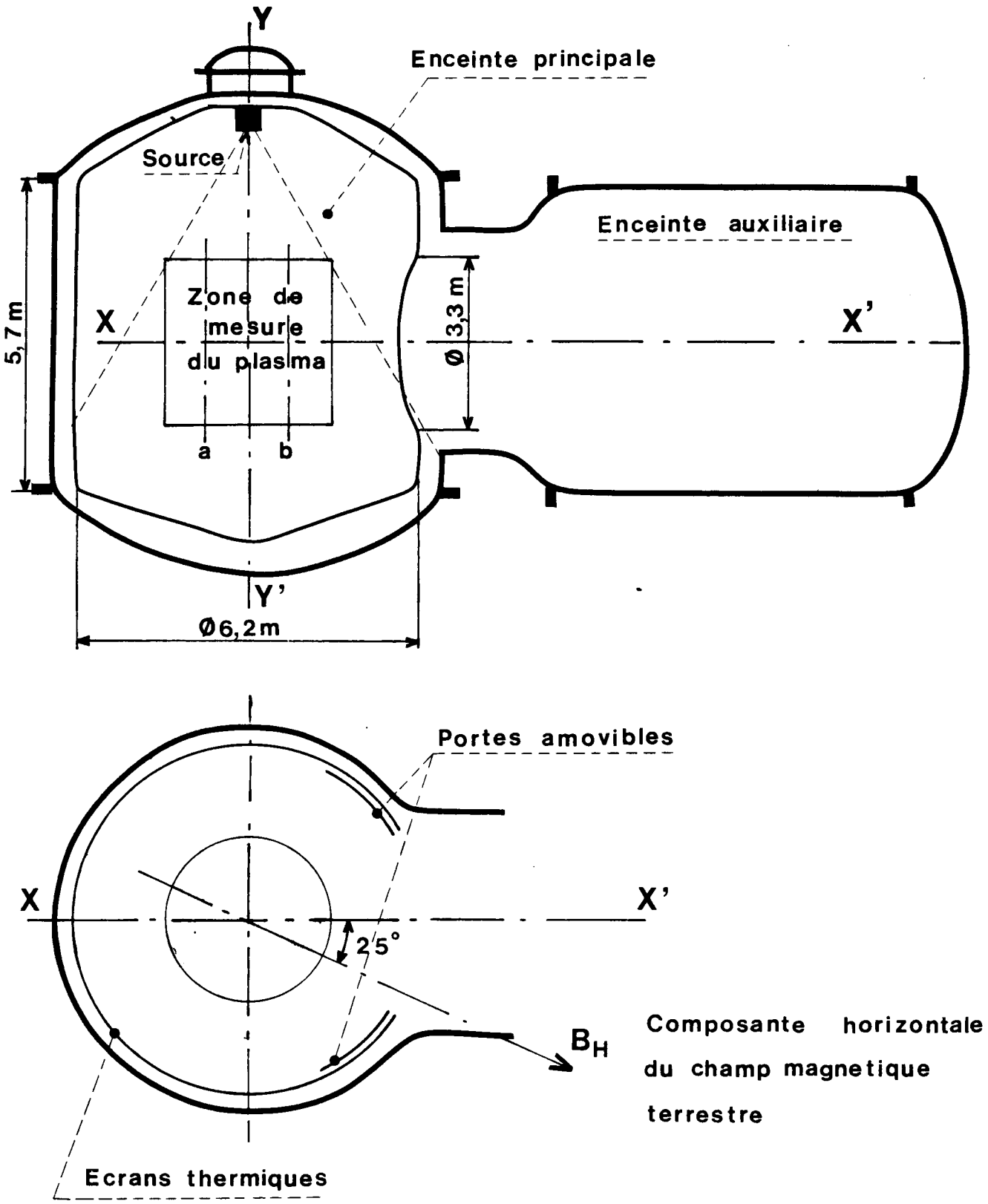


Fig.1 Schéma du caisson SIMLES

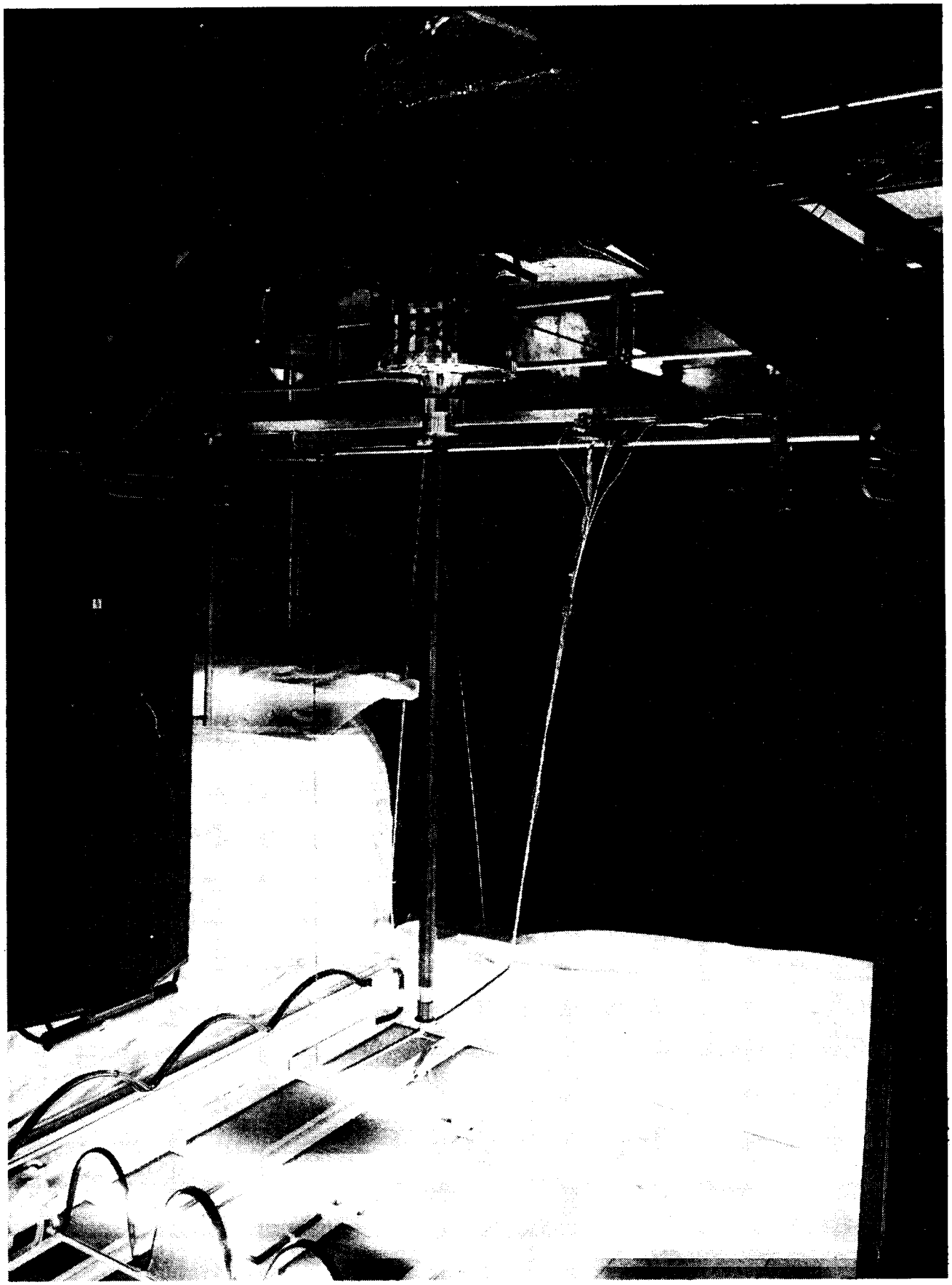


Fig. 2 Simulateur d'attitude équipé des sondes

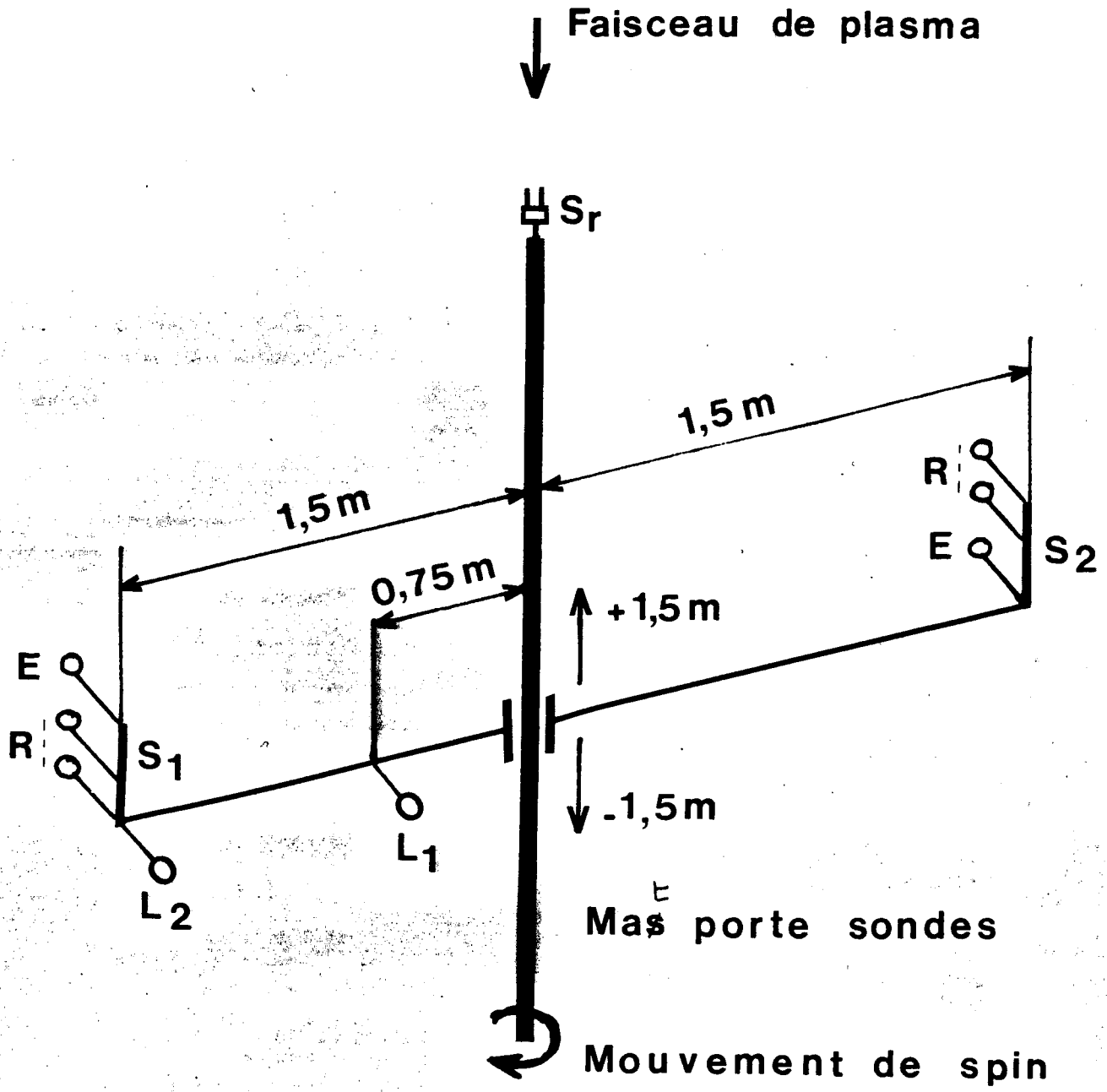


Fig.3 Schema de montage des capteurs

- L_1, L_2 Sondes électrostatiques
- S_1, S_2 ------- HF isoprobes | E émetteur R récepteur
- S_r _____ HF auto-oscillante

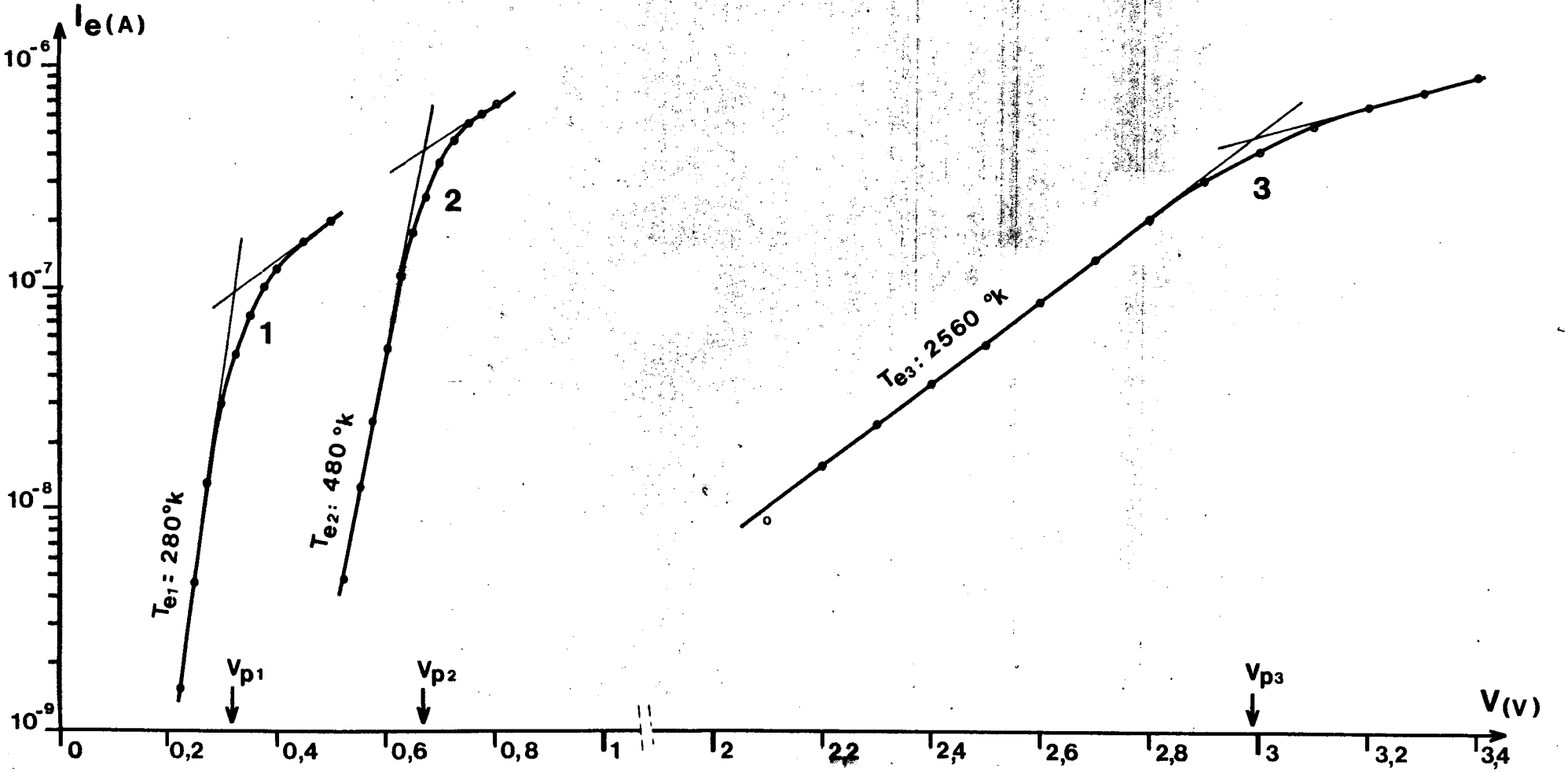


Fig.4 Contrôle de la température électronique par la puissance du neutraliseur P_N

1. P_N : 119 w
2. P_N : 98 w
3. P_N : 67 w

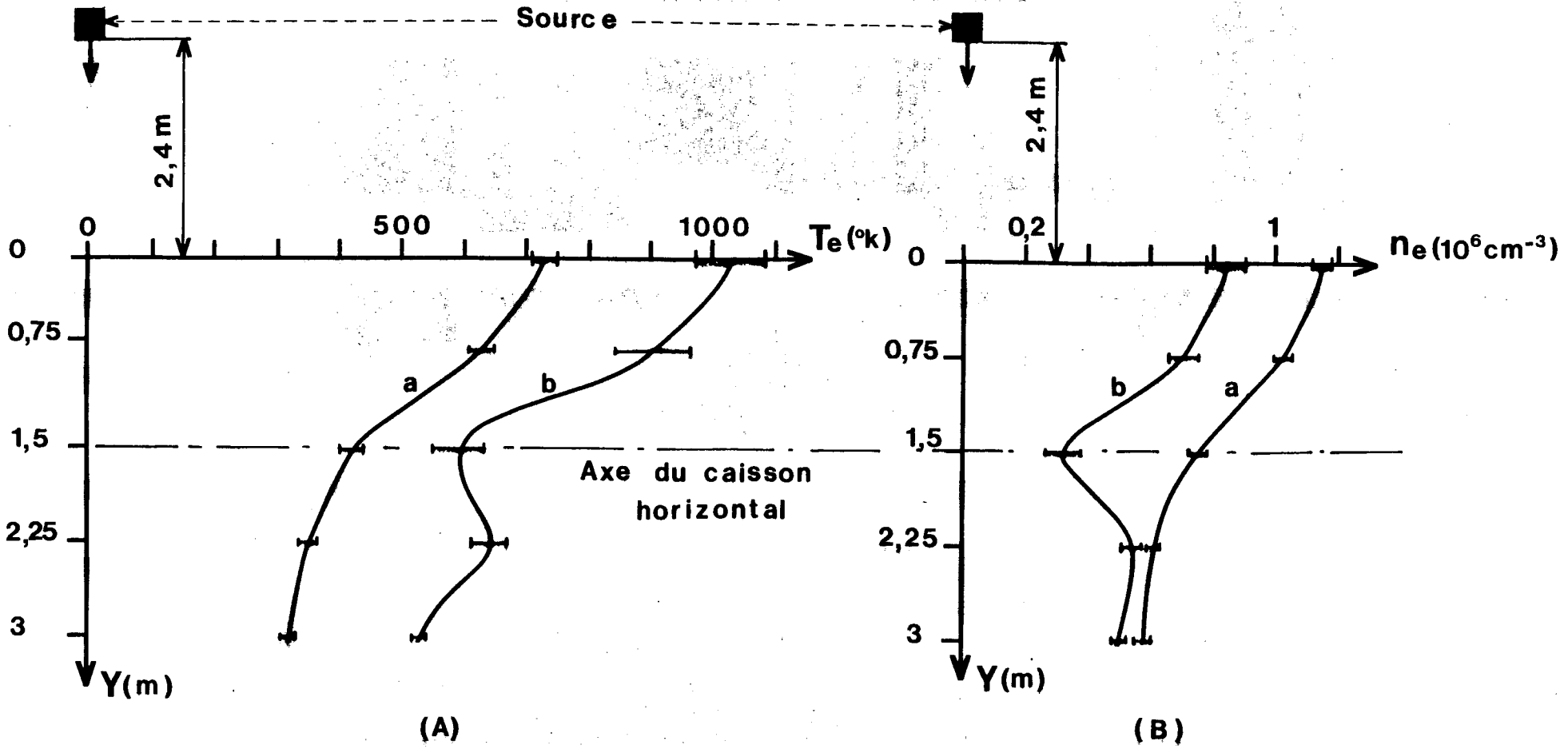


Fig.5 (A) Variation de température en fonction de la distance par rapport à la source Y

(B) ———— la densité ---- ---------- ---------- ----------

(a) sonde L_1 positionnée a l'opposé de la porte

(b) ---------- du coté de la porte

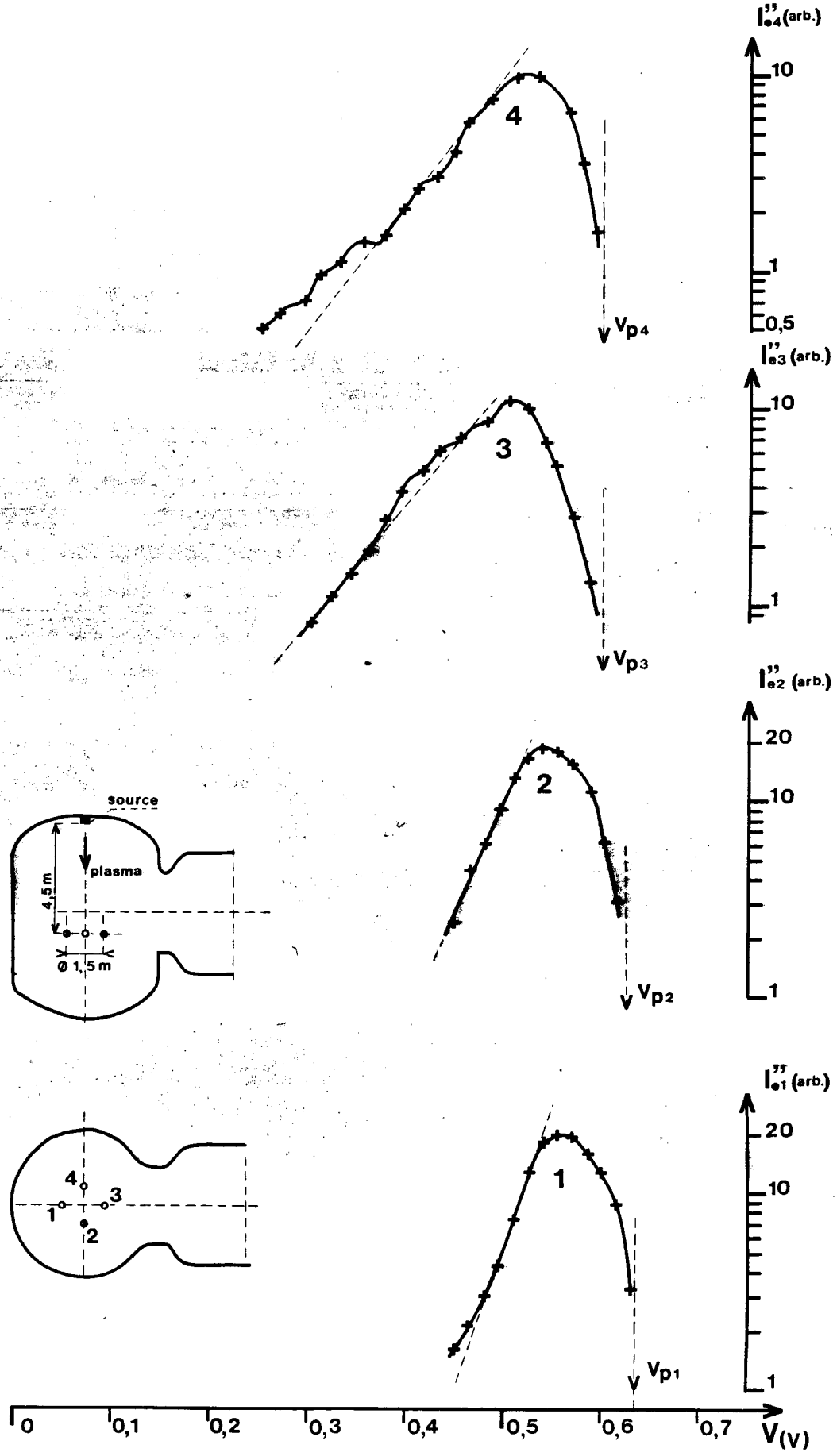


Fig.6 Courbes $I''_{e(V)} = f(V)$ pour quatre points de mesure dans un plan horizontal et un plasma constant

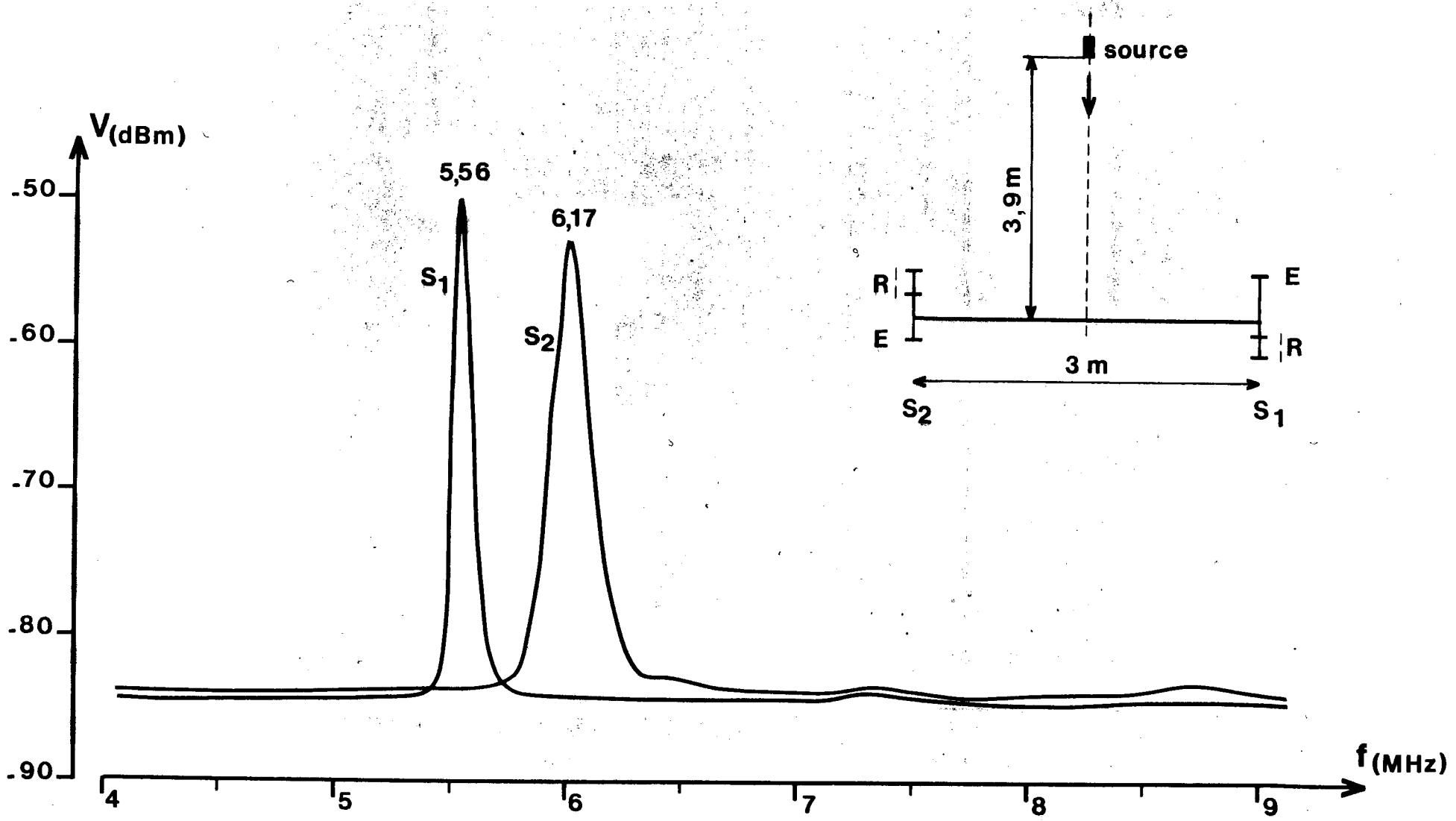


Fig.7 Réponses dans le plasma des sondes isoprobes fonctionnant simultanément

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

CNET imp 75/1163