

INT 143/88

ETUDE D'UN GYROTRON
DE 42 GHZ

André PERRENOUD

Juin 88

Centre de Recherches en Physique des Plasmas
Association Euratom - Confédération Suisse
Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne

TABLE DES MATIERES

1. Introduction	2
1.1 Spécifications	
2. Choix des paramètres principaux	3
2.1 Faisceau d'électrons	
2.2 Longueur d'interaction	
2.3 Rayon du résonateur	
2.4 Rayon du faisceau d'électrons	
2.5 Champ magnétique	
2.6 Efficacité électronique	
2.7 Courant du faisceau	
2.8 Facteur de qualité du résonateur	
2.9 Courant d'accrochage	
3. Bobines	8
3.1 Facteur de compression magnétique	
3.2 Géométrie des bobines	
3.3 Autres paramètres des bobines supraconductrices	
4. Canon d'électrons	11
4.1 Cathode	
4.2 Simulations numériques	
5. Résonateur	12
5.1 Forme	
5.2 Efficacité et courant d'accrochage	
5.3 Pertes ohmiques	
5.3 Autres modes	
6. Fenêtre	15
6.1 Contrainte due à la pression atmosphérique	
6.2 Transmission, réflexion, absorption	
6.3 Contraintes thermiques	
7. Collecteur	17
8. Conclusions	18
Références	19
Figures	20
Appendices	22
A) Liste des fichiers de données	

1. INTRODUCTION

Ce travail est la suite d'une première étude (INT 134/87) où 2 systèmes de bobines avaient été examinés: nouvelles bobines ou réutilisation d'Andromeda. Cette deuxième possibilité s'est avérée très peu pratique, voire impossible à cause du manque de place pour le collecteur et pour évacuer la chaleur. Le diamètre utile dans la zone d'impact des électrons n'est que de 6 cm, d'où une charge estimée à 6 kW/cm² pour un faisceau de 800 kW. A ce niveau de puissance, la durée de l'impulsion doit être inférieure à 3.5 ms (selon ABB), ce qui est incompatible avec les spécifications: 10 ms à l'époque.

La présente étude a donc pour but de poursuivre la conception d'un gyrotron en utilisant de nouvelles bobines.

1.1 Spécifications

Elles ont été légèrement modifiées par rapport à la 1ère étude:

- * Gyrotron classique pulsé de 42 GHz
- * Mode TE₀₂
- * Diamètre du tube de sortie: 6.35 cm (2.5")
- * Puissance HF: 300 kW avec un faisceau de 10 A et 80 kV
- * Durée maximale des impulsions: 20 ms
- * Charge maximum au collecteur: 0.5 kW/cm²
- * Utilisation: démarrage de TCA (tests) et TCV

Dans la 1ère étude, le faisceau d'électrons passait trop près du col d'entrée du résonateur. Dans ce nouveau design, la marge a été portée à 1 mm dans le but de faciliter l'alignement des composants.

2. CHOIX DES PARAMETRES PRINCIPAUX

Nous allons utiliser la théorie non linéaire généralisée du gyrotron dans la formulation du MIT. Cette théorie [1], [2], utilise des paramètres réduits qui facilitent grandement le design d'un nouveau gyrotron car ils réduisent considérablement l'espace possible des paramètres réels.

Pour la première harmonique ($n=1$), nous avons:

- la longueur d'interaction normalisée:

$$\mu = \pi \frac{\beta_{\perp 0}^2}{\beta_{\parallel 0}} \cdot \frac{L}{\lambda} \quad (1)$$

- la champ électrique normalisé

$$F = \frac{E_0}{c B_0} \beta_{\perp 0}^{-3} J_{m \pm 1}(k_{\perp} R_e) \quad (2)$$

- le désaccord fréquentiel normalisé (detuning)

$$\Delta = \frac{2\delta_0}{\beta_{\perp 0}^2} = \frac{2}{\beta_{\perp 0}^2} \left(1 - \frac{\Omega_0}{\gamma_0 \omega}\right) \quad (3)$$

A l'entrée du résonateur, le faisceau d'électrons est caractérisé par les vitesses parallèle $\beta_{\parallel 0}$ et perpendiculaire $\beta_{\perp 0}$ des électrons par rapport au champ magnétique statique B_0 dirigé selon l'axe z .

Le facteur γ_0 relativiste est donné par:

$$\gamma_0 = \left(1 - \beta_{\perp 0}^2 - \beta_{\parallel 0}^2\right)^{-\frac{1}{2}} = 1 + \frac{V [kV]}{511} \quad (4)$$

où V est la tension d'accélération. On fait abstraction de la chute de potentiel due à la charge d'espace pour l'instant.

Selon l'axe z , la dépendance du champ électrique E_0 est en

$$f(z) = \exp\left[-\left(\frac{2z}{L}\right)^2\right] \quad (5)$$

L = longueur d'interaction.

$$\lambda = \text{longueur d'onde dans le vide} = \frac{c}{f} = \frac{2.99792 \cdot 10^8}{42 \cdot 10^9} = 7.138 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$\omega = 2\pi f$$

$$\Omega_0 = \frac{e B_0}{m_e c} = 2\pi \cdot (\text{fréquence de Larmor non relativiste})$$

En coordonnées cylindriques, le champ électrique dans le résonateur est supposé être un mode TE_{0p} ($m=0$):

$$\underline{E} = E_{\phi} e^{i(\omega t + \psi)} \cdot \hat{\phi} \quad (6)$$

$$E_{\phi} = E_0 \cdot f(z) J'_0(k_{\perp} r)$$

avec $k_{\perp} = \frac{\gamma_0 \rho}{a}$ où $\gamma_0 \rho$ est le $p^{\text{ième}}$ zéro non nul de $J'_0(x)$, et a le rayon intérieur du résonateur.

R_e = rayon du faisceau (annulaire) des électrons = rayon du cercle des centres de guidages.

2.1 Faisceau d'électrons

Le modulateur H.T. existant sera utilisé. La puissance maximum vaut:

$$P_e = V_{\max} \cdot I_{\max} = 80 \cdot 10 = 800 \text{ kW}$$

Prenons $V = 80 \text{ kV}$, d'où $\underline{\gamma_0} = 1.157$

Toute la suite du design dépend de l'anisotropie du faisceau $\alpha = \frac{\beta_{\perp 0}}{\beta_{\parallel 0}}$.

Pour les gyrotrons existants, ce rapport varie entre 1 et 2. Comme la puissance "utile" des électrons réside dans leur vitesse perpendiculaire, on a intérêt à faire en sorte que α soit le plus grand possible. Toutefois l'effet "miroir", certains électrons pouvant être réfléchis vers la cathode émissive, limite α en pratique.

Autre considération pratique: faut-il choisir un canon à 2 ou 3 électrodes? Une électrode supplémentaire offre l'avantage de commander le faisceau avec une fraction seulement de la tension totale d'accélération ($\sim 30 \text{ kV}$ au lieu de 80 kV), d'où des temps de commutation plus courts. Cet avantage a pour conséquence une diminution de α , la dispersion du faisceau étant par ailleurs égale.

Tout cela pour dire qu'il est raisonnable de prendre $\alpha = 1.5$ comme dans la première étude (INT 134/87).

$$\beta_{\parallel 0} = \sqrt{\frac{1 - \gamma_0^{-2}}{1 + \alpha^2}} = \underline{0.279}, \quad \beta_{\perp 0} = \underline{0.418}$$

2.2 Longueur d'interaction

D'après la Fig.1, on serait tenté choisir les paramètres normalisés (F, μ, Δ) de manière à optimiser l'efficacité électronique perpendiculaire η_{\perp} . Au premier maximum $\eta_{\perp} = 0.72$ pour:

$$F_{\text{opt}} = 0.13, \quad \mu_{\text{opt}} = 18, \quad \Delta_{\text{opt}} = 0.5 \quad (7)$$

d'où $L = \mu \frac{\beta_{\parallel 0} \lambda}{\pi \beta_{\perp 0}^2} = 9.138 \lambda = 6.523 \text{ cm}$, où l'éq. (1) a été utilisée.

Cependant on ne peut faire varier L arbitrairement en jouant sur la forme du résonateur (sect. 5). Le calcul du champ électrique dans le résonateur donne finalement une valeur environ deux fois plus petite, soit $L \approx 3.2$ cm, d'où:

$$\underline{\mu = 9}, \quad F = 0.1 \text{ à } 0.2, \quad \Delta = 0.5 \text{ à } 0.6, \quad \eta_{\perp} = 0.6$$

2.3 Rayon du résonateur

Le mode TE₀₂ étant en coupure, on a immédiatement:

$$k_{\perp} a = \nu_{02} \quad \text{d'où} \quad a = \frac{\nu_{02}}{2\pi} \lambda = 7.970 \text{ mm}$$

2.4 Rayon du faisceau d'électrons

Radialement, le carré du champ électrique E_{ϕ}^2 (Fig.2) possède 2 maxima où il est judicieux de placer le centre de guidage des électrons.

$$E_{\phi} \sim J_0' \left(\frac{\nu_{02}}{a} r \right) = -J_1 \left(\frac{\nu_{02}}{a} r \right)$$

Extrema de $J_1 =$ zéros de J_1'

$$\text{1er zéro} \quad \frac{R_e}{a} = \frac{\nu_{11}}{\nu_{02}} = \frac{1.8412}{7.0156} = 0.262, \quad \text{d'où} \quad R_e = 2.092 \text{ mm}$$

$$\text{2ème zéro} \quad \frac{R_e}{a} = \frac{\nu_{12}}{\nu_{02}} = \frac{5.3314}{7.0156} = 0.760, \quad \text{d'où} \quad R_e = 6.057 \text{ mm}$$

Nous choisissons le 2ème maximum de E_{ϕ}^2 de façon à minimiser la chute potentiel due à la charge d'espace. D'après [2]:

$$\Delta V = \frac{30 I_A}{\beta_{110}} \left[0.75 \frac{\Delta b}{R_e} + 2 \ln \frac{a}{R_e + \Delta b/2} \right] \quad (8)$$

où les électrons sont supposés uniformément distribués entre $R - \frac{\Delta b}{2}$ et $R + \frac{\Delta b}{2}$. I_A est le courant en Ampères.

$$\text{Avec} \quad \Delta b = 2r_L = 2 \frac{\beta_{\perp 0} c}{\Omega_0} \approx 2 \frac{\beta_{\perp 0} c}{\gamma_{0\omega}} = \frac{\beta_{\perp 0} \lambda}{\gamma_0 \pi} = \frac{0.418}{1.157 \pi} 7.138 = 0.821 \text{ mm}$$

et $I_A = 10$ A:

$$\Delta V = 110 + 450 = 560 \text{ Volts pour } R_e = 6.057 \text{ mm}$$

$$\Delta V = 317 + 2493 = 2810 \text{ Volts pour } R_e = 2.092 \text{ mm}$$

Non seulement celle énergie n'est plus disponible pour être convertie en microondes, mais encore la chute de potentiel accroît la dispersion des vitesses des électrons.

Dans la 1ère étude, nous avons constaté que le faisceau passait trop près de l'entrée du résonateur. On avait $R_e = (5.80 \pm 0.35)$ mm et $a = 7.44$ mm (45 GHz); le rayon du col du résonateur était $R_o = 6.25$ mm soit une marge de 0.1 mm. Maintenant nous allons prendre $a = 7.97$ mm et $R_o = 7.2$ (cf sect. 5). en comptant arbitrairement 1 mm de marge et une dispersion sur R_e de 0.4 mm, cela nous (re-)donne $R_e = 5.8$ mm. C'est cette valeur que nous prendrons dans la suite.

2.5 Champ magnétique

$$\text{De (3) nous déduisons } B_o = \frac{m_e}{e} \gamma_o \omega \left(1 - \frac{\beta_{\perp o}^2}{2} \Delta\right) \quad (9)$$

$$\text{Avec } \Delta = 0.5, \quad \frac{m_e}{e} \gamma_o \omega = \frac{9.109 \cdot 10^{-31}}{1.602 \cdot 10^{-19}} 1.157 (2\pi) 42 \cdot 10^9 = 1.736$$

$$B_o = 1.736 \left(1 - \frac{(0.418)^2}{2} 0.5\right) = \underline{1.660 \text{ Teslas}}$$

2.6 Efficacité électronique η

Elle est reliée à l'efficacité transverse η_{\perp} par:

$$\eta = \frac{\beta_{\perp o}^2}{2(1 - \gamma_o^{-1})} \eta_{\perp} \quad (10)$$

$$\eta = 0.645 \cdot \eta_{\perp} = 0.645 \cdot 0.6 = 0.39$$

Ainsi, dans ce modèle, l'efficacité maximum est de 39 %.

2.7 Courant du faisceau

Pour obtenir $P = 300$ kW, il faut un faisceau de

$$I_A = \frac{P}{\eta V} = \frac{300}{0.39 \cdot 80} = 9.6 \text{ A.} \quad (11)$$

Le courant normalisé [1] est défini par:

$$I = \left(\frac{2}{\pi}\right)^{\frac{5}{2}} \frac{e Q I_A}{\epsilon_o \gamma_o m_e c^3} \beta_{\perp o}^{-4} \frac{\lambda}{L} \cdot \frac{1}{4} \cdot \frac{J_1^2(k_{\perp} R_e)}{\gamma_o^2 J_o^2(\gamma_o z)} \quad (12)$$

où Q est la facteur de qualité du résonateur et I_A le courant du faisceau en Ampères.

$$J_o(\gamma_o z) = J_o(7.0156) = 0.30011$$

$$J_1(k_{\perp} R_e) = J_1(\gamma_{12}) = J_1(5.3314) = -0.34613$$

$$\frac{J_1^2(k_{\perp} R_e)}{V_{02}^2 J_0^2(V_{02})} = 2.7027 \cdot 10^{-2} \quad \left(\frac{2}{\pi}\right)^{\frac{5}{2}} \frac{e}{4\epsilon_0 m_e c^3} = 5.9601 \cdot 10^{-5}$$

$$\frac{\lambda}{L} = \frac{\pi \beta_{\perp 0}^2}{\mu \beta_{\parallel 0}} \quad (\text{de (1)})$$

$$\frac{\lambda}{L} \cdot \frac{\beta_{\perp 0}^{-4}}{\gamma_0} = \frac{\pi}{\mu \beta_{\parallel 0} \gamma_0 \beta_{\perp 0}^2} = 6.198$$

$$\text{D'où } I = (9.894 \cdot 10^{-6}) \cdot Q I_A. \quad (13)$$

Pour $\mu = 9$ et $\eta_{\perp} = 0.6$, la fig. 3 montre que $I = 0.06$, d'où:

$$\underline{(Q I_A) = 6060} \quad (14)$$

2.8 Facteur de qualité du résonateur

De (14) et $I_A = 9.6$ A, on tire $Q = 645$.

2.9 Courant d'accrochage

En fonction de μ et Δ le courant d'accrochage normalisé s'écrit [1]:

$$I_{ST}(\mu, \Delta) = \frac{4}{\pi \mu^2} \cdot \frac{e^{2x^2}}{\mu x - 1} \quad \text{avec } x = \frac{\mu \Delta}{4} \quad (15)$$

$$I_{ST} \text{ est minimum pour } x_{\min} = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{\mu} + \sqrt{\frac{1}{\mu^2} + 1} \right] \quad (16)$$

Dans notre cas $\mu = 9$, $x_{\min} = 0.559$, $\Delta_{\min} = \frac{4 x_{\min}}{\mu} = 0.248$

et $I_{\min} = I_{ST \min}(\mu, \Delta_{\min}) = 7.29 \cdot 10^{-3}$

Le champ B correspondant se calcule par (9):

$$B = 1.736 \cdot \left(1 - \frac{\beta_{\perp 0}^2}{2} \Delta_{\min}\right) = 1.696 \text{ T.}$$

Pour trouver le courant d'accrochage en Ampères, on fait usage de (12):

$$I_{A \min} = \frac{I_{\min}}{9.894 \cdot 10^{-6} \cdot Q} = \frac{736}{Q} \quad (17)$$

$I_{A \min} = 1.14$ A pour $Q = 645$.

La fig. 3 montre I_{\min} en fonction de μ , ainsi que $\eta_{\perp}(\mu, I)$.

3. BOBINES

3.1 Facteur de compression magnétique α_c

La première étude (INT 134/87) a montré que α_c devait être de l'ordre de 15. Une valeur plus élevée augmente le risque d'effet miroir, alors qu'une valeur plus faible limite trop le rapport $\beta_{\perp 0} / \beta_{\parallel 0}$.

Pour une compression adiabatique on a $\alpha_c = (R_k / R_e)^2$ où R_k est le rayon de la cathode et R_e le rayon du faisceau (sect. 2.4). Dans notre cas $R_e = 0.58$ cm et $R_k = 2.2$ cm, comme dans la 1ère étude, on arrive à $\alpha_c = 14.4$.

Champ dans la zone d'interaction: $B_0 = 1.660$ T (sect. 2.5)

Champ à la cathode: $B_k = B_0 / \alpha_c = 0.1154$ T.

3.2 Géométrie des bobines

D'après une étude d'ABB, le libre passage (warm bore) nécessaire est de 13 cm de diamètre. Il faut compter 4 cm pour le mandrin, le cryostat, l'écran refroidi à l'azote liquide et l'enceinte externe en inox. Avec encore 0.5 cm de jeu pour pouvoir enfiler le canon, cela nous donne un diamètre de $13 + 2 \cdot (4.5) = 22$ cm pour la 1ère spire. On gagne donc 1 cm sur le rayon par rapport à la 1ère étude. L'espacement entre les bobines peut également être diminué de 1 cm. Les dimensions sont données dans le tableau ci-dessous:

dimensions [cm]		supra				BC
		1	2	3	4	
rayon intérieur	R_1	11.0	11.0	7.0	7.0	
rayon extérieur	R_2	19.0	19.0	14.0	14.0	
position	z_1	-9.5	4.5	$z'_k - 5.5$	$z'_k + 0.5$	
position	z_2	-4.5	9.5	$z'_k - 0.5$	$z'_k + 5.5$	

z'_k est la position de la cathode dans le référentiel des bobines; l'origine de l'axe z est choisie dans le plan médian des bobines supra, c'est-à-dire au milieu de la zone d'interaction.

Pour diminuer les risques d'oscillation parasite du faisceau avant le résonateur, on a intérêt à rapprocher la cathode le plus possible de la zone d'interaction. Il faut cependant que le courant circulant dans les bobines antagonistes (BC) soit tolérable. Nous prendrons comme limite 9000 At par bobine, comme dans le cas du gyrotron de 115 GHz (GT-115).

En fonction de z'_k nous avons:

z'_k [cm]	1 [At]	2 [At]	3 [At]	4 [At]
-33	266750	268300	-9709	-4034
-34	266810	268050	-8066	-2969
→ -35	266860	267850	-6586	-1996
-36	266910	267680	-5250	-1106

$$B_0 = 1.660 \text{ T} \quad \text{et} \quad B_k = B(z'_k) = 0.1154 \text{ T.}$$

Pour avoir autant d'équations que d'inconnues, nous avons minimisé la somme des carrés des densités de courants dans les bobines (prog. MAGNET1 avec KSWI=5).

z'_k serait acceptable, mais nous choisissons $z'_k = -35$ cm de manière à conserver la possibilité de faire varier le rapport I_3/I_4 qui influence le gradient de B à la cathode. (On gagne 1 cm sur z'_k par rapport à la 1ère étude.)

Avec les valeurs retenues:

$$\left. \begin{array}{l} B(-35.5) = 0.10847 \text{ T} \\ B(-35.0) = 0.1154 \text{ T} \\ B(-34.5) = 0.12281 \text{ T} \end{array} \right\} \quad \rightarrow \quad \left. \frac{dB}{dz} \right|_{z=z'_k} = 0.0144 \text{ T/cm}$$

L'allure du champ B ainsi que la disposition des bobines sont montrés à la fig. 4. (Fichier de données: RMAG42, cf appendice A.)

3.3 Autres paramètres des bobines supraconductrices

Pour fixer les idées, nous supposons que l'on utilise un fil supraconducteur semblable à celui des bobines du GT-115, soit 1mm de diamètre. Les bobines ayant une section de $5 * 8 \text{ cm}^2$, on a donc 80 couches de 50 spires.

$$\text{Courant: } I = \frac{267850}{4000} = 67 \text{ A}$$

Self inductance: 5.28 H

En utilisant, par exemple, l'alimentation PS80C (80A, 15V) de Cryogenic Consultants, le temps de charge à 10 V serait relativement court:

$$dt = \frac{LdI}{U} = \frac{5.28 \cdot 67}{10} = 36 \text{ s}$$

$$\text{Energie stockée par bobine: } \frac{1}{2} LI^2 = 11.85 \text{ kJ}$$

Forces: $F = 5708 \text{ kg}^*$
 $F = -5678 \text{ kg}^*$
 $F = -18 \text{ kg}^*$
 $F = -12 \text{ kg}^*$

Champ B maximum sur le conducteur: 2.45 T

Courant critique à 4.2 K : env. 1030 A

Longueur du fil: $4000 \cdot \pi \cdot (R + R) = 3770 \text{ m}$

Poids du fil: 20.4 kg (5.42 g/m)

Résistance résiduelle : 1.05Ω (à $T = T + \epsilon$)

Résistance à $T = 293 \text{ K}$: 153Ω (rrr = 145)

4. CANON D'ELECTRONS

Le canon est du type MIG à 3 électrodes. Les paramètres géométriques sont définis à la fig. 5.

4.1 Cathode

Pour la longueur de la partie émissive, nous prenons, comme dans l'étude précédente $l_k = 3$ mm. ($R_k = 2.2$ cm)

Surface émissive: $2\pi R_k l_k = 4.15$ cm²

Avec 5 A/cm², on peut atteindre sans problème 20 A.

4.2 Simulations numériques [3]

Elles ont été faites avec les paramètres suivants (en cm):

Cathode:

$R_k = 2.2$, $\alpha_1 = \alpha_2 = 35^\circ$, $l_k = 0.3$, $R_t = 2.9$, $R_{c1} = 1$

Electrode:

$d_k = 0.7$, $R_{e1} = 2.6$, $d_e = 4$, $R_{c2} = R_{c3} = 1.$, $R_{e2} = 4.5$

Anode et tunnel d'électrons:

$d_{an} = 3.$, $R_{c4} = 1$, $\beta = 4^\circ$, $R_b = 1.0$, $d_b = 14$, $R_{b2} = 0.72$, $d_{b2} = 15.$

Caractéristiques du faisceau en fonction de la tension d'anode V_e :

Run	V_e [kV]	$\alpha = \frac{\beta_{\perp 0}}{\beta_{\parallel 0}}$	$\beta_{\perp 0}$	R_e [mm]
61	28.	$1.188 \pm 2.85\%$	$0.384 \pm 1.12\%$	$5.96 \pm 5.4\%$
62	29.	$1.383 \pm 2.90\%$	$0.407 \pm 0.93\%$	$5.89 \pm 5.4\%$
64	29.5	$1.490 \pm 1.96\%$	$0.417 \pm 0.58\%$	$5.97 \pm 5.2\%$
63	30.	$2.087 \pm 1.03\%$	$0.452 \pm 0.20\%$	$5.76 \pm 6.7\%$

2 runs ont été effectués avec $R_{e1} = 2.5$ cm:

65	29.	$1.226 \pm 4.47\%$	$0.389 \pm 1.65\%$	$5.67 \pm 4.6\%$
66	30.	$1.409 \pm 6.19\%$	$0.409 \pm 1.90\%$	$5.85 \pm 5.2\%$

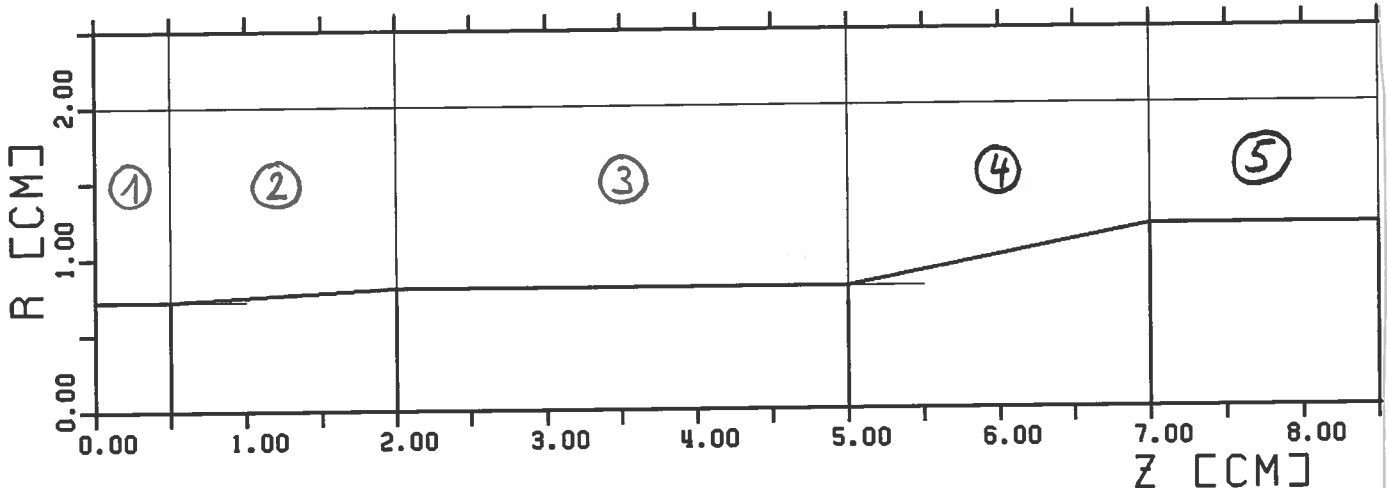
La dispersion est plus grande avec $R_{e1} = 2.5$ cm, ce qui explique pourquoi on a retenu $R_{e1} = 2.6$ cm. La dispersion sur e_1 est remarquablement faible et il n'a pas été jugé utile de faire d'autres simulations.

La fig.6 montre la géométrie du canon et les trajectoires électroniques.

5. RESONATEUR

5.1 Forme

La forme du résonateur a été déterminée par approximations successives au moyen du programme CAVFIL9 [4]. Le calcul des modes propres fait appel à la méthode WKB. Le profil est esquissé ci-dessous. Après le col d'entrée en coupure, le résonateur s'évase progressivement. Le rayon d'entrée de la cavité est de 7.2 mm, alors que le rayon du faisceau est de (5.8 ± 0.4) mm ($V_e = 30$ kV).



Le résonateur comporte 5 sections.

Z_i : début de la section i [cm]

R_i : rayon au début de la section i [cm]

$Z_1 = 0.$, $Z_2 = 0.5$, $Z_3 = 2.0$, $R_1 = R_2 = 0.72$,

$R_5 = R_6 = 1.2$.

Aperçu de l'évolution de la fréquence de résonance et du facteur de qualité:

Z_4	Z_5	Z_6	R_3	R_4	f [GHz]	Q
5.5	7.5	9.0	7.970	7.970	42.139	905
5.0	7.0	8.5	7.970	7.970	42.177	631
5.0	7.0	8.5	8.000	8.000	42.020	619
4.8	6.8	8.5	8.000	8.000	42.040	531
5.0	7.0	8.5	8.004	8.004	42.000	618

Tolérance sur $R_3 = a$: $1\mu\text{m}$ d'erreur décale la fréquence de résonance de 5^3 MHz.

Angles: $\alpha_1 = \alpha_3 = \alpha_5 = 0.$, $\alpha_2 = 3.068^\circ$, $\alpha_4 = 11.299^\circ$.

Le profil du champ électrique TE_{021} selon z est dessiné à la fig.7.

Contrairement à l'hypothèse (5) du modèle du chap.2 il est asymétrique. La largeur à mi-hauteur est $FWHM = 2.65$ cm; en utilisant (5), il vient:

$L = \frac{1}{\sqrt{\ln 2}} FWHM = 1.201 \cdot FWHM = 3.2$ cm, valeur que nous avons prise à la section 2.2 pour la longueur d'interaction.

5.2 Efficacité et courant d'accrochage

L'efficacité électronique η pour $Q = 618$ monte jusqu'à 45%, valeur un peu plus élevée que l'estimation (sect. 2.6).

La fig.8 montre que l'on atteint 300 kW avec un courant de 8.8 A et un champ B de 1.631 T, en bon accord avec la théorie non-linéaire (sect 2.7).

Enfin, la fig.9a décrit le courant d'accrochage en fonction de B . Le minimum ① se situe à $I = 1.76$ A et $B = 1.670$ T. Le courant d'accrochage correspondant à $B = 1.631$ T vaut 4.6 A. ②

La fig.10 détaille le point de fonctionnement du gyrotron en fonction du courant du faisceau pour un champ $B = 1.631$ T.

Le fichier d'entrée qui à servi à ces calculs est listé à l'appendice A.

5.3 Pertes ohmiques

Moyennée sur z , la puissance dissipée dans les parois du résonateur vaut [2]:

$$\rho_{ohm} = \frac{\sqrt{\pi}}{8} \mu_0^{-1.5} \left(\frac{m_e}{e}\right)^2 \sigma^{-0.5} \omega^{2.5} \beta_{L0}^6 F^2 \gamma_0^2 C_{mp}^2 \quad (18)$$

$$\text{avec } C_{mp} = \frac{J_m(k_{\perp a})}{J_{m+1}(k_{\perp R_e})}; \quad \frac{\sqrt{\pi}}{8} \mu_0^{-1.5} \left(\frac{m_e}{e}\right)^2 = 5.084 \cdot 10^{-15}$$

σ = conductivité électrique de la cavité

$\sigma = 3.6 \cdot 10^7 (\Omega m)^{-1}$ pour le cuivre OFHC à 200° C

Au point de fonctionnement du gyrotron:

$$F^2 = \eta_{\perp} \cdot I \quad (19)$$

$$F^2 = 0.6 \cdot (9.864 \cdot 10^{-6}) \cdot 9.6 = 3.67 \cdot 10^{-2} \quad (\text{cf. eq 13})$$

$$C_{02} = -0.867 \quad (\text{cf. bas de la page 6})$$

D'où: $\rho_{ohm} = 0.6$ kW/cm²

La puissance pic (en $z = 3.3$ cm) vaut: $\rho_{pic} = \frac{\rho_{ohm}}{0.627} = 1$ kW/cm²

La puissance totale dissipée dans les parois: $P_{ohm} = 6$ kW

Ces valeurs sont en accord avec celles trouvées avec le code [4] pour $P_{out} + P_{ohm} = 300$ kW:

$$S_{pic} = 0.8 \text{ kW/cm}^2, \quad P_{ohm} = 6.9 \text{ kW.}$$

$$D'où Q_{ohm} = Q \cdot \frac{P_{out}}{P_{ohm}} = 27000.$$

5.4 Autres modes

En théorie, tous les modes TE en dessus de la coupure f_c peuvent exister.

$$f_c = \frac{c \gamma_{mp}}{2\pi a} \quad \text{où} \quad J'_m(\gamma_{mp}) = 0 \quad (20)$$

m	p	γ_{mp}	f_c pour $a = 8$ mm
1	1	1.8412	10.98 GHz
2	1	3.0542	18.22
0	1	3.8317	22.85
3	1	4.2012	25.06
4	1	5.3175	31.71
1	2	5.3314	31.80
5	1	6.4156	38.26
2	2	6.7061	40.00
0	2	7.0156	41.84

Pour un mode transverse TE donné, plusieurs modes longitudinaux sont possibles. Autour de 42 GHz on a:

TE	f [GHz]	Q	Courant d'accrochage [A]	Champ B [T]	
021	42.000	618	1.76	1.670	(fig.9a)
022	42.525	164	13.6	1.780	(fig.9b)
023	43.357	85			
221	40.161	556	2.15	1.600	
222	40.700	148	9.29	1.555	
223	41.558	75			
511	38.428	503	2.24	1.520	
512	38.984	136	11.6	1.495	
513	39.851	68			
121	31.995	346	4.34	1.255	
122	32.612	96			
123	33.548	47			

Expérimentalement, la sélection du bon mode se fait par le choix approprié du champ B.

La fig.11 montre l'allure de E dans le cas du modes TE₀₂₂.

6. FENETRE

Nous considérons dans ce chapitre une fenêtre en alumine 99.5% (Al_2O_3), qui a la constante diélectrique suivante, à 42 GHz:

$$\epsilon_r = 9.604, \quad \text{tg } \delta = \epsilon_i / \epsilon_r = 3.5 \cdot 10^{-4}$$

La longueur d'onde dans l'alumine vaut:

$$\lambda_g = \lambda_{\text{vide}} / \sqrt{\epsilon_r} = \frac{7.138}{\sqrt{9.604}} = 2.30 \text{ mm.}$$

Pour avoir un maximum de transmission, l'épaisseur de la fenêtre doit être un multiple de $\lambda_g/2$. Le choix de tel et tel multiple dépend des contraintes internes.

6.1 Contrainte due à la pression atmosphérique

Pour estimer les contraintes tangentielle (σ_t) et radiale (σ_r), nous prenons un disque homogène d'épaisseur h et de rayon R soumis d'un côté à une pression P uniforme. Deux cas sont à distinguer selon que le bord du disque est encasté ou simplement supporté [5].

$$\text{disque supporté: } \begin{cases} \sigma_r = \frac{3}{8} \frac{PR^2}{h^2} (3 + \nu) \left(1 - \frac{r^2}{R^2}\right) \\ \sigma_t = \frac{3}{8} \frac{PR^2}{h^2} \left[(3 + \nu) - (1 - 3\nu) \frac{r^2}{R^2} \right] \end{cases} \quad (21a)$$

$$\text{disque encasté } \begin{cases} \sigma_r = \frac{3}{8} \frac{PR^2}{h^2} \left[(1 + \nu) - (3 + \nu) \frac{r^2}{R^2} \right] \\ \sigma_t = \frac{3}{8} \frac{PR^2}{h^2} \left[(1 + \nu) - (1 + 3\nu) \frac{r^2}{R^2} \right] \end{cases} \quad (21b)$$

ν = module de Poisson, $0 < r < R$

Signe de : + = tension, - = compression.

Le cas le plus dangereux, c'est-à-dire la plus grande tension a lieu au centre ($r = 0$) du disque supporté.

$$\sigma_r = \sigma_t = \frac{3}{8} \frac{PR^2}{h^2} (3 + \nu) \equiv \sigma_{\text{atm}} \quad (22)$$

Dans notre cas: $\nu = 0.22$, $R = 3.175$ cm et la pression atmosphérique vaut 0.1 MPa.

$$\sigma_{atm} = \frac{122}{h^2} \text{ MPa, où } h \text{ est en mm}$$

	h	
$\lambda_g/2$	1.15	92
λ_g	2.30	23
$3\lambda_g/2$	3.46	10
$2\lambda_g$	4.61	6
	[mm]	[MPa]

La tension de rupture de l'alumine polycristallin est de 277 MPa. Pour les céramiques, la fatigue et le mécanisme de croissance des microfissures jouent un grand rôle [6,7]. Avec $h = \lambda_g/2$, on aurait un risque de 90 % d'avoir une rupture avant une année. Avec $h = \lambda_g$, ce risque tombe virtuellement à zéro. Etant donné que les contraintes thermiques viendront encore s'ajouter à la contrainte atmosphérique, nous prendrons $h = 3\lambda_g/2$ pour plus de sécurité.

6.2 Transmission, réflexion, absorption

En prenant pour modèle un disque diélectrique placé dans un guide d'onde circulaire, on peut calculer les impédances pour les modes TE se propageant à l'intérieur. Ensuite, on en déduit la transmission, la réflexion et l'absorption causée par la fenêtre.

Pour le mode TE_{02} , la fig.12 montre T, R et A en fonction de la fréquence pour une épaisseur de 3.46 mm et un diamètre de 6.35 cm (progr. WINDOW). A 42 GHz l'absorption est de 0.6 %.

On peut estimer la tolérance sur l'épaisseur h:
un Δh de 10 μm décale le maximum de transmission de 365 MHz.
La bande de fréquence où $R < 1$ % est de 600 MHz, donc $\Delta h < \pm 10 \mu\text{m}$.

6.3 Contraintes thermiques

Nous faisons l'hypothèse que la fenêtre est refroidie sur son pourtour seulement.

En mode pulsé (20 ms), on constate que les contraintes thermiques sont négligeables (fig.13a). ΔT est de l'ordre de 2° C par impulsion.

Ce ne serait plus le cas en fonctionnement continu (fig.13b). $\Delta T \approx 36^\circ \text{C}$ et $\sigma_T = -37$ MPa pour 10 kW continu (Progr. WINDOW2). Dans ce cas il faudrait prévoir un refroidissement forcé sur toute la surface externe du disque (fenêtre à 2 disques).

Pour un mode propre axisymétrique et une puissance donnée, la valeur des contraintes en un point ne dépend que du rapport r/R .

7. COLLECTEUR

Le tube de sortie du gyrotron a un diamètre de 6.35 cm (2.5"). La zone d'impact des électrons se situe entre 47 et 55 cm, soit sur une surface de 160 cm² (fig.14). Si l'on suppose que les 800 kW du faisceau sont uniformément répartis selon z, la puissance déposée est de 5 kW/cm², soit 10 fois la valeur spécifiée. Deux possibilités s'offrent à nous pour diminuer cette puissance:

- élargir localement le tube de sortie,
- étaler la zone d'impact en disposant subtilement des bobines autour du collecteur.

La première solution présente le désavantage de créer une zone (up-taper down-taper) où des modes stationnaires RF peuvent exister. Cela peut donner lieu à une forte conversion de mode, ce qu'il faut éviter [8]. Aussi nous choisissons la 2ème solution. Examinons la zone d'impact lorsqu'on met 2 bobines (n° 5 et 6) autour du collecteur.

Rayon intérieur: 7 cm, rayon extérieur: 11 cm,

Position en z: bobine n°5 de 50 à 60 cm, bobine n°6 de 66 à 76 cm

Run	I5 [A]	I6 [A]	z impact [cm]	surface [cm ²]	P kW/cm ²
67	0	0	48 - 55	160	5.0
68	380	380	48 - 56.5	170	4.7
69	500	700	48 - 57	180	4.5
70	1000	1400	48 - 58	200	4.0
71	1500	2500	48 - 59.5	230	3.5
72	2000	4000	49 - 64	300	2.7
73	2500	6000	52 - 76	480	1.67
74	3000	8000	55 - 78	460	1.74

La fig. 15 montre les trajectoires électroniques du run 74.

On peut donc sensiblement diminuer la charge thermique moyenne. En poursuivant l'étude, 1 à 1.5 kW/cm² est atteignable, mais 0.5 kW/cm² me semble utopique.

8. CONCLUSIONS

Dans cette étude, les dimensions principales de certains composants du gyrotron ont été fixées.

- Le canon à électron développé dans le 1ère étude et dont ABB a déjà fait des dessins préliminaires peut être repris tel quel. Seul le début du tunnel à électrons a été légèrement modifié.
- Le détail du tunnel (beam duct) (structure absorbant la RF se propageant en arrière) reste à définir.
- Les dimensions du résonateur TE_{021} sont fixées.
- Pour réduire la possibilité d'excitation du mode TE_{221} , on pourrait envisager un cavité complexe TE_{011} / TE_{021} . Cette solution offrirait une plus grande liberté de choix du champ magnétique et de la tension d'anode. Elle réduit également les exigences de stabilité de l'alimentation et permet une plus grande gamme de contrôle de la puissance de sortie. Actuellement, nous ne disposons pas de code de calcul pour cavités complexes au CRPP.
- Le collecteur à un charge thermique trop élevée.
- Les diagnostics n'ont pas encore été étudiés. Idéalement on devrait disposer des mesures suivantes:
 - puissance de sortie (calorimètre, coupleur(s))
 - fréquence (mixer, analyseur de spectre)
 - pureté du mode (k-spectro ?, analyse du champ lointain ?)
 - détecteurs d'arc
 - température de la fenêtre
 - profil de température dans le collecteur
- Les dimensions du systèmes de bobines supra ont une influence sur le design du canon. Si d'autres dimensions étaient finalement retenues, il y aurait lieu de revoir le design du canon.
- La ligne RF de transmission n'a pas encore été étudiées. Quelle sera son influence sur le gyrotron (réflexions) ?

REFERENCES

- [1] Generalized Nonlinear Harmonic Theory, B.G. Danly and R.J. Temkin, PFC, MIT, April 85.
- [2] The Design of Megawatt Gyrotrons, K.E. Kreisher, B.G. Danly, J.B. Schutkeker, and R.J. Temkin, PFC, MIT, December 84.
- [3] Electron trajectory program, W.B. Herrmannsfeldt, SLAC-report 226, November 79.
- [4] P. Muggli, communication privée
- [5] Hütte - Manuel de l'Ingénieur, p.1030.
(Bibliothèque du CRPP)
- [6] P.F. Becher, M.K. Ferber - Mechanical reliability of current alumina and beryllia ceramics used in microwave windows for gyrotrons, 1983, ORNL/TM-8555.
- [7] M.K. Ferber, H.D. Kimrey, P.F. Becher - Analysis of the temperature profile and stress distributions in ceramic window material subjected to microwave heating, 1983, ORNL/TM-8718.
- [8] H. Jory, K.Felch et al. - A 60 GHz CW gyrotron with high output mode purity, Varian Associates INC, 1984, proc. of IEDM.

FIGURES

Fig. 1 Courbes dans le plan (μ, F) de l'isoefficacité η_{\perp} (traits pleins) d'un gyrotron travaillant à la fondamentale .

Traits interrompus: Δ

Source: Fig.2 de la réf. [1]

Fig. 2 Profil radial du carré du champ électrique (unité arbitraire). a = rayon du guide.

Fig. 3 Courbes dans le plan (μ, I) de l'isoefficacité η_{\perp} (traits pleins) d'un gyrotron travaillant à la fondamentale.

IMIN : courant d'accrochage minimum

Source: Fig.3 de la réf. [1]

Fig. 4 Disposition des bobines supraconductrices.

Fig. 5 Définition des paramètres du canon à électrons.

Fig. 6 Géométrie du canon et trajectoires électroniques, $I = 10$ A.

Equipotentiellles: 1 kV, $V_e = 29.5$ kV.

Fig. 7 Bas: Profil du résonateur.
Haut: Dépendance en z du champ électrique (norme et phase).
Evolution de l'efficacité η .

Facteur de qualité: 618 (Mode TE_{021})

Fréquence de résonance: 42.000 GHz

Faisceau: $\alpha = 1.5$, $R_{beam} = 0.58$ cm, 80 kV.

Fig. 8 Puissance de sortie, efficacité et champ B optimal en fonction du courant du faisceau d'électrons.

Fig. 9a Courant d'accrochage en fonction de B. Mode TE_{021}

Fig. 9b Courant d'accrochage en fonction de B. Mode TE_{022}

Fig. 10 Efficacité η en fonction du champ électrique.
Les paraboles figurent la puissance extraite du résonateur divisée par le courant du faisceau pour $I = 1$ à 11 A.
Les intersections donnent les points de fonctionnement.

- Fig. 11 Bas: Profil du résonateur.
Haut: Dépendance en z du champ électrique (norme et phase).
Facteur de qualité: 164 (Mode TE₀₂₂)
Fréquence de résonance: 42.525 GHz
Faisceau: $\alpha = 1.5$, $R_{\text{beam}} = 0.58$ cm, 80 kV.
- Fig.12a Transmission (T), réflexion (R) et absorption (A) en fonction de la fréquence pour une fenêtre en alumine 995.
 $\epsilon_r = 9.604$, $\epsilon_i = -0.00336$, Epaisseur: 3.46 mm, Rayon: 3.175 cm
Echelle linéaire.
- Fig.12b Transmission (T), réflexion (R) et absorption (A) en fonction de la fréquence pour une fenêtre en alumine 995.
 $\epsilon_r = 9.604$, $\epsilon_i = -0.00336$, Epaisseur: 3.46 mm, Rayon: 3.175 cm
Echelle en décibels.
- Fig.13a Profil de température et contraintes thermiques dans la fenêtre en alumine pour une impulsion de 300 kW durant 20 ms.
 $\epsilon_r = 9.604$, $\text{tg } \delta = 3.5 \cdot 10^{-4}$, Mode TE₀₂
Rayon de la fenêtre: 3.175 cm, épaisseur: 3.46 mm
SIGMAR: contrainte radiale, SIGMAT: contrainte transverse
Convention: signe + = tension, signe - = compression
Tension de rupture: 277 MPa.
La fenêtre est refroidie uniquement par le bord.
- Fig.13b Profil de température et contraintes thermiques dans la fenêtre en alumine pour une puissance continue de 10 kW.
 $\epsilon_r = 9.604$, $\text{tg } \delta = 3.5 \cdot 10^{-4}$, Mode TE₀₂
Rayon de la fenêtre: 3.175 cm, épaisseur: 3.46 mm
SIGMAR: contrainte radiale, SIGMAT: contrainte transverse
Convention: signe + = tension, signe - = compression
Tension de rupture: 277 MPa.
La fenêtre est refroidie uniquement par le bord.
- Fig. 14 Trajectoires électroniques après le résonateur.
(Pas de bobines autour du collecteur.)
- Fig. 15 Trajectoires électroniques après le résonateur.
2 bobines autour du collecteur:
I5 = 3000 At, I6 = 8000 At.

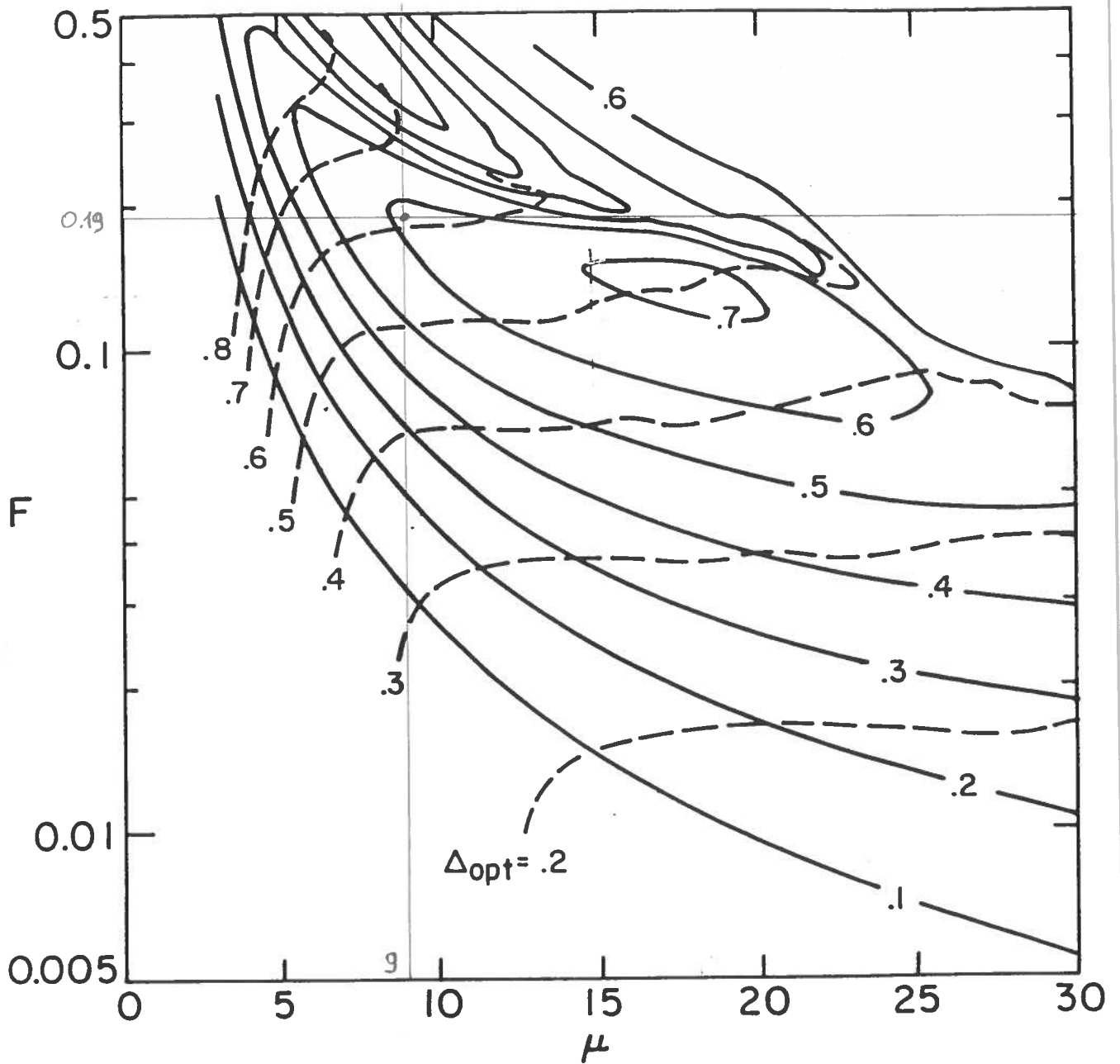


Fig. 1 Courbes dans le plan (μ, F) de l'isoefficacité η_L (traits pleins) d'un gyrotron travaillant à la fondamentale .

Traits interrompus: Δ

Source: Fig.2 de la réf. [1]

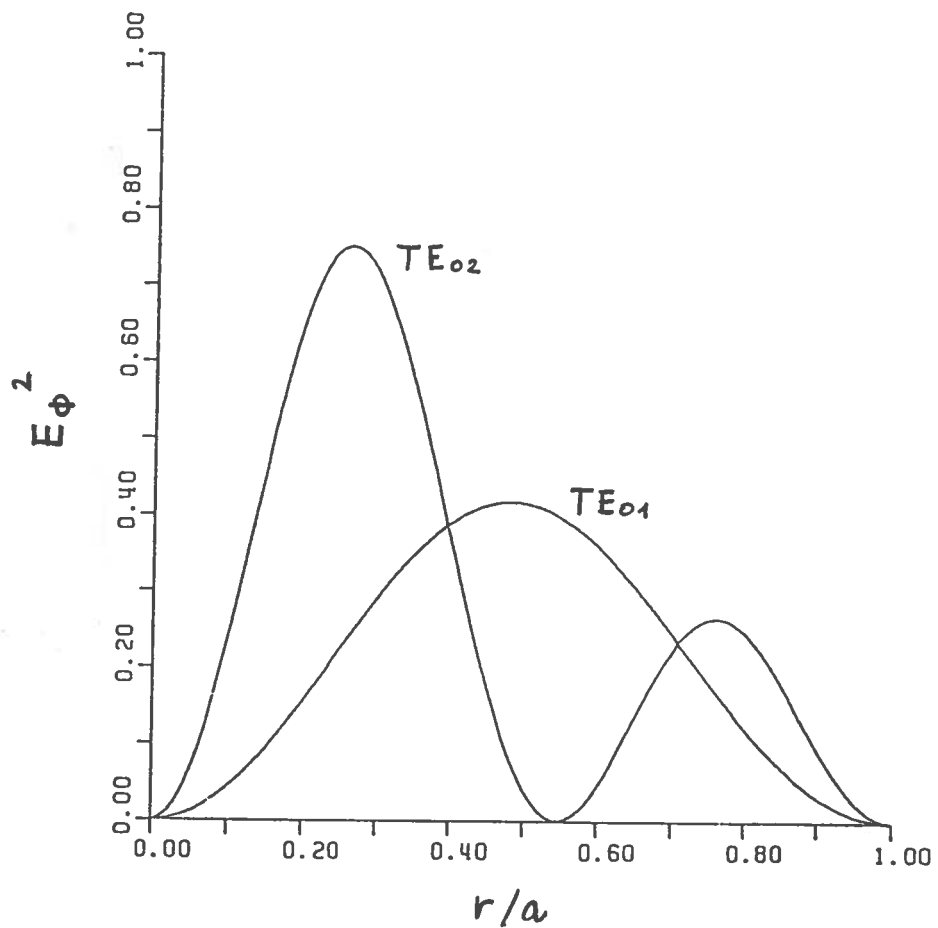


Fig. 2 Profil radial du carré du champ électrique (unité arbitraire). a = rayon du guide.

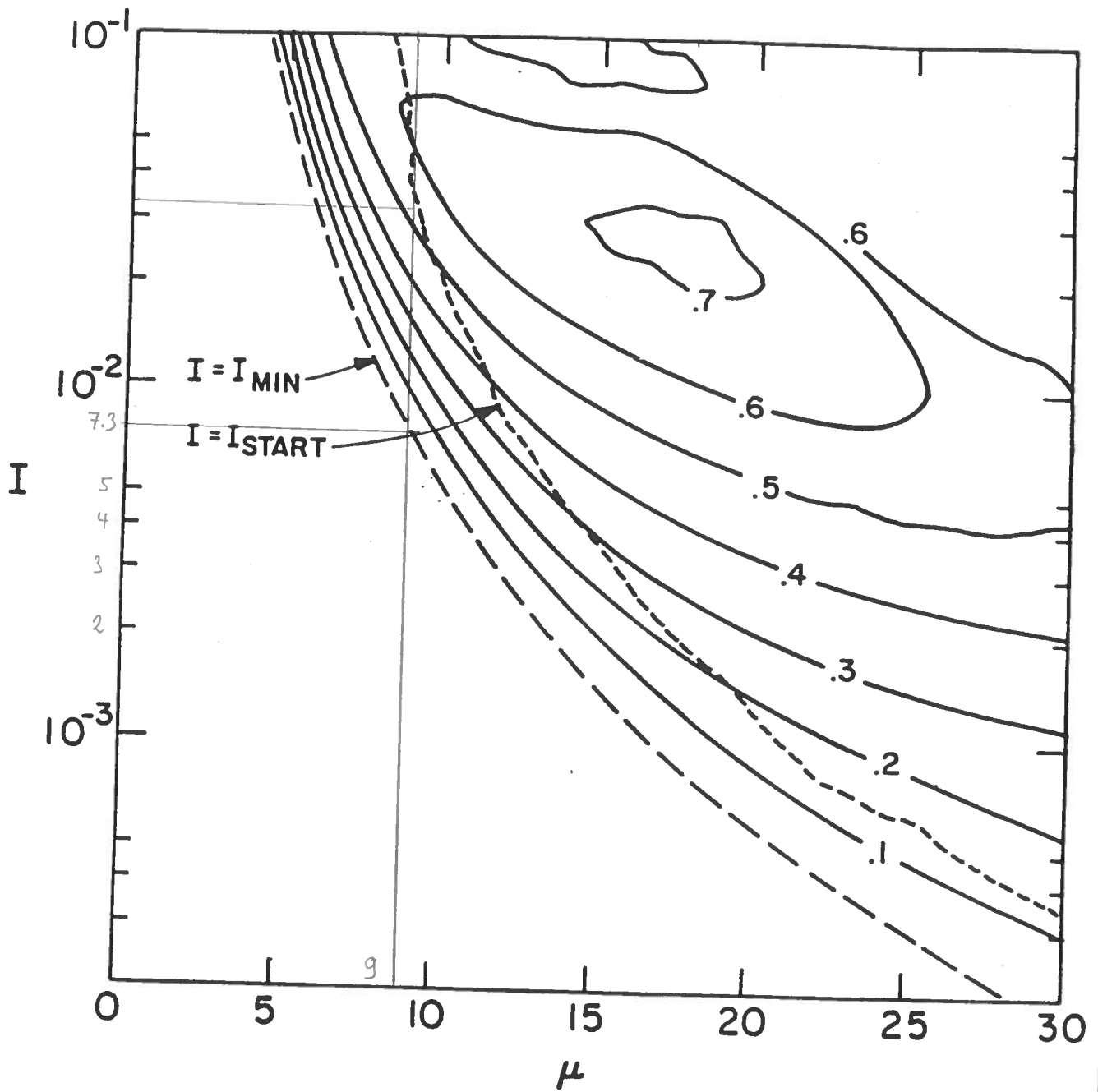


Fig. 3 Courbes dans le plan (μ, I) de l'isoefficacité (traits pleins) d'un gyrotron travaillant à la fondamentale.

I_{MIN} : courant d'accrochage minimum

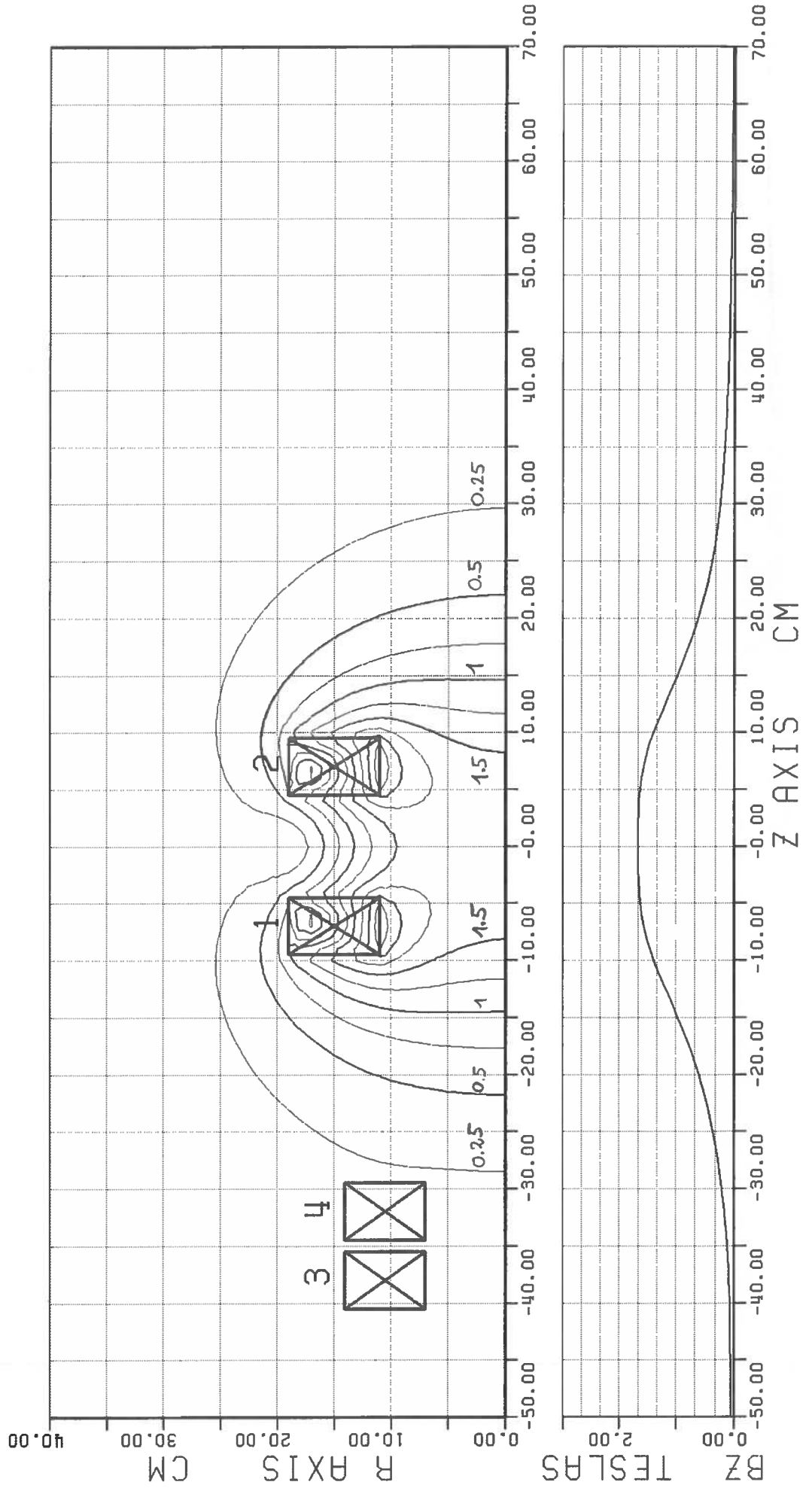
Source: Fig.3 de la réf. [1]

CONTOUR PLOT OF STATIC MAGNETIC FIELD
 42 GHZ GYROTRON MAGNET

GYROTRON PROJECT
 CRPP 88/05/27. 10.04.27.

COIL	CURRENT A*1	CURRENT DENSITY A/CM**2
1	.26686E+06	.66715E+04
2	.26785E+06	.66963E+04
3	-.65860E+04	-.18817E+03
4	-.19960E+04	-.57029E+02

Fig. 4 Disposition des bobines supraconductrices.



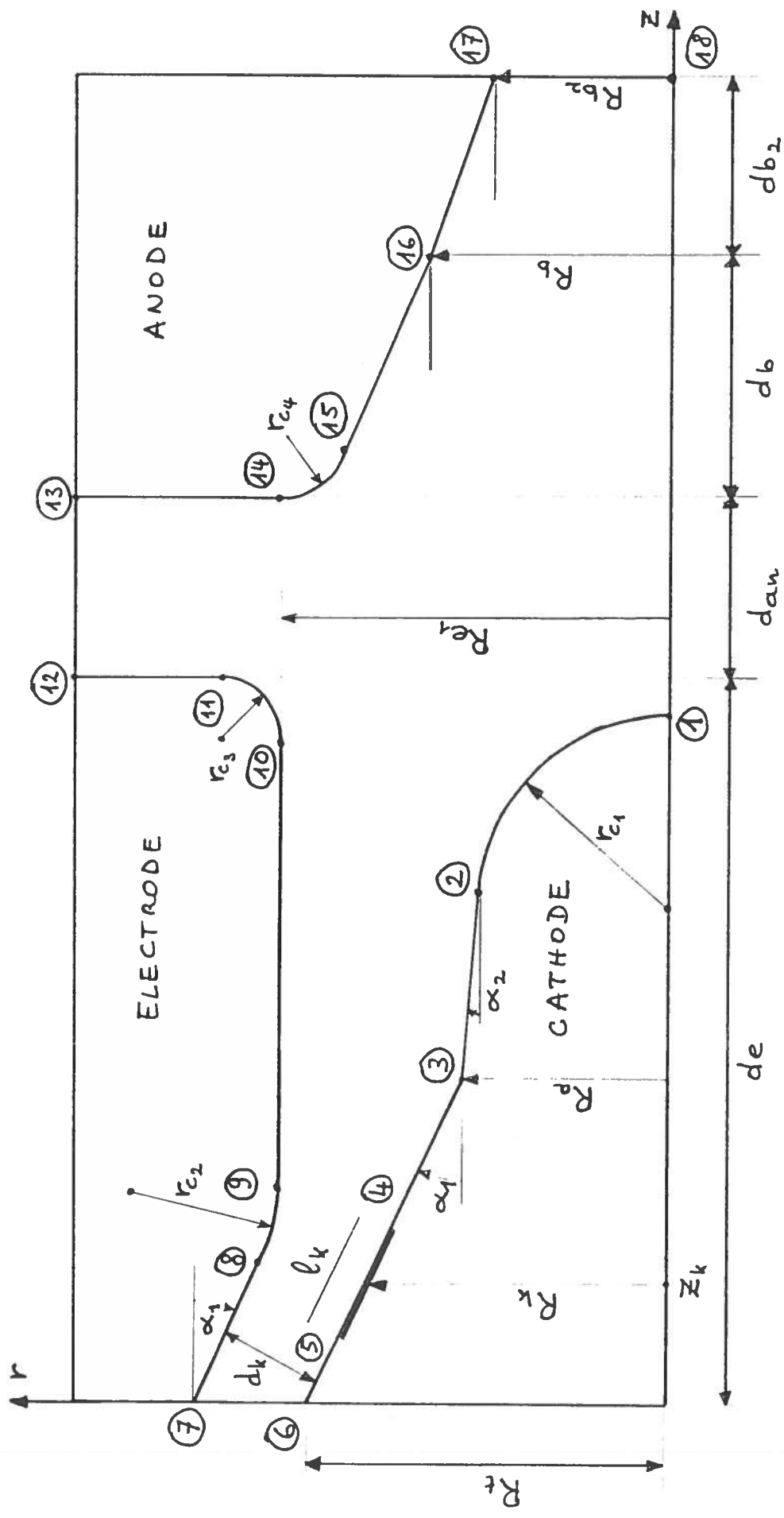


Fig. 5 Définition des paramètres du canon à électrons.

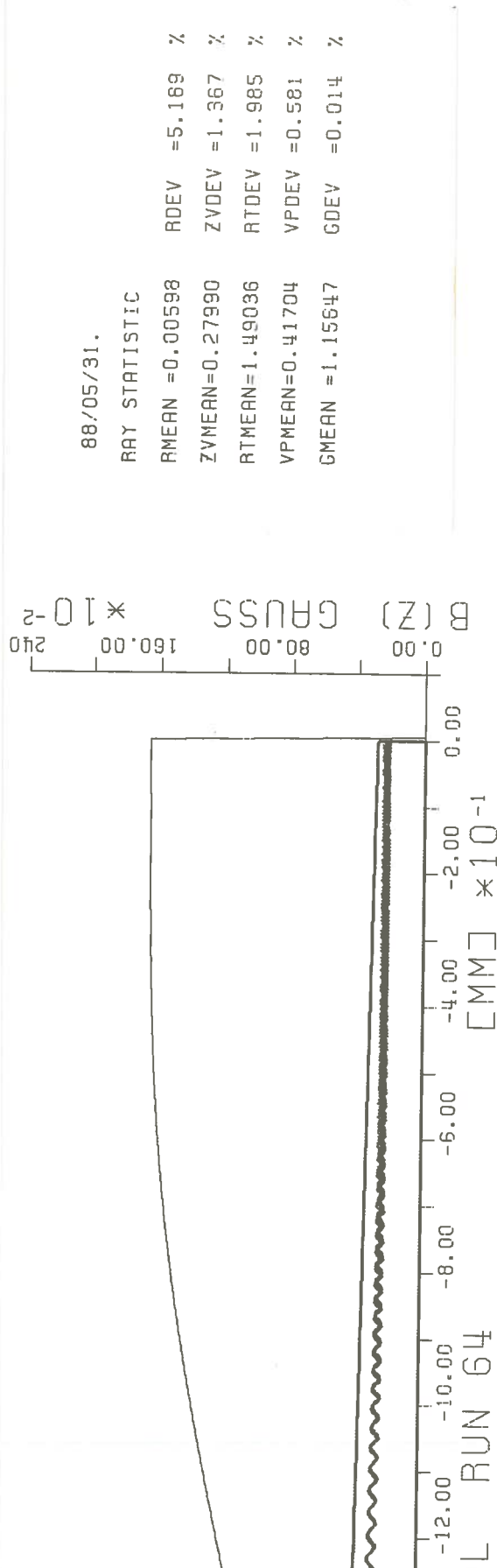
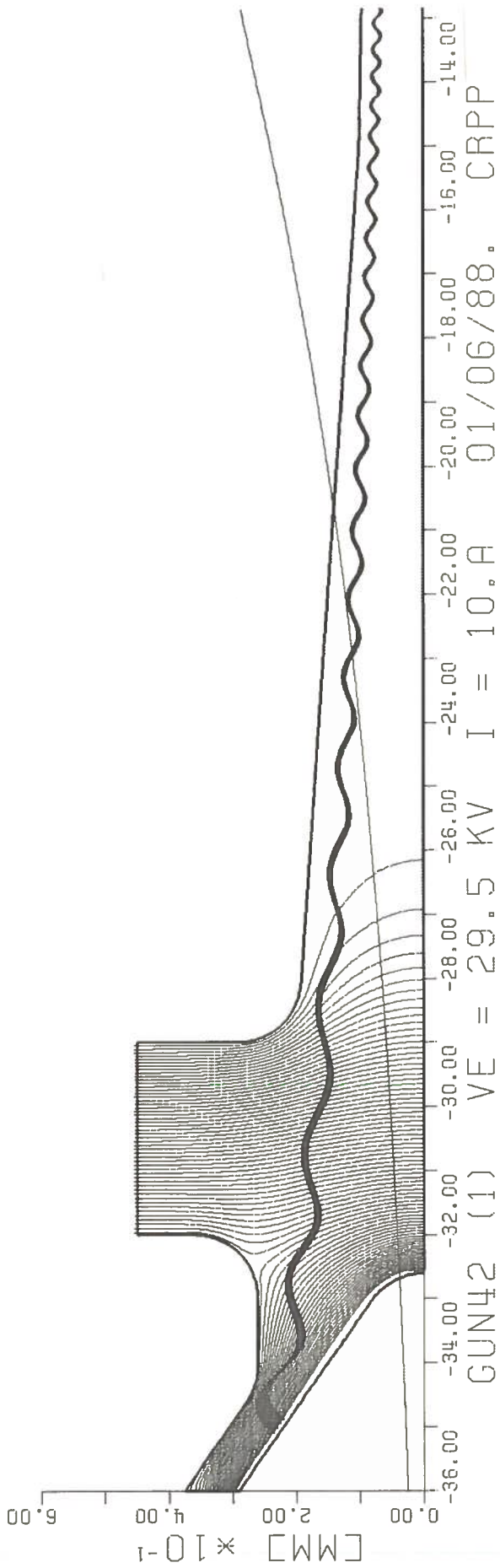


Fig. 6 Géométrie du canon et trajectoires électroniques, I = 10 A.
Equipotentielle: 1 kV, Ve = 29.5 kV.

RESONANT FREQUENCY = 42.000 GHZ

QUALITY FACTOR = 618.2

REFL. COEF. = .0000E+00 .0000E+00

88/06/04

07.23.47

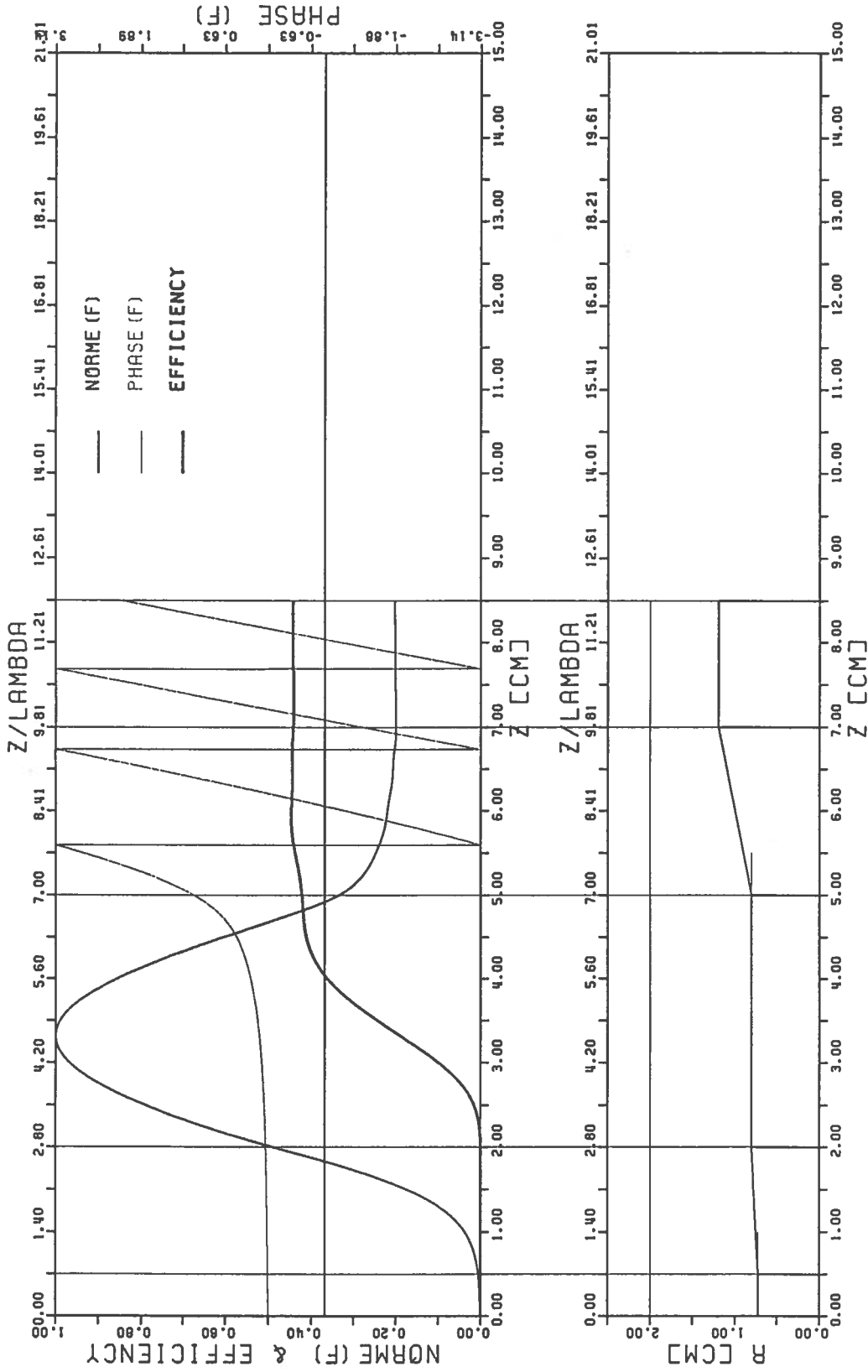


Fig. 7 Bas: Profil du résonateur.
Haut: Dépendance en z du champ électrique (norme et phase).
Evolution de l'efficacité η .

Facteur de qualité: 618 (Mode TE₀₂₁)
Fréquence de résonance: 42.000 GHZ
Faisceau: $\alpha = 1.5$, $R_{beam} = 0.58$ cm, 80 kV.

OPTIMUM POWER VS CURRENT

Q-FACTOR 618
 MODE TE 0 2
 F-RES [GHZ] 42.000
 U-CATH [KV] 80
 ALPHA 1.50
 R-BEAM [CM] 0.580

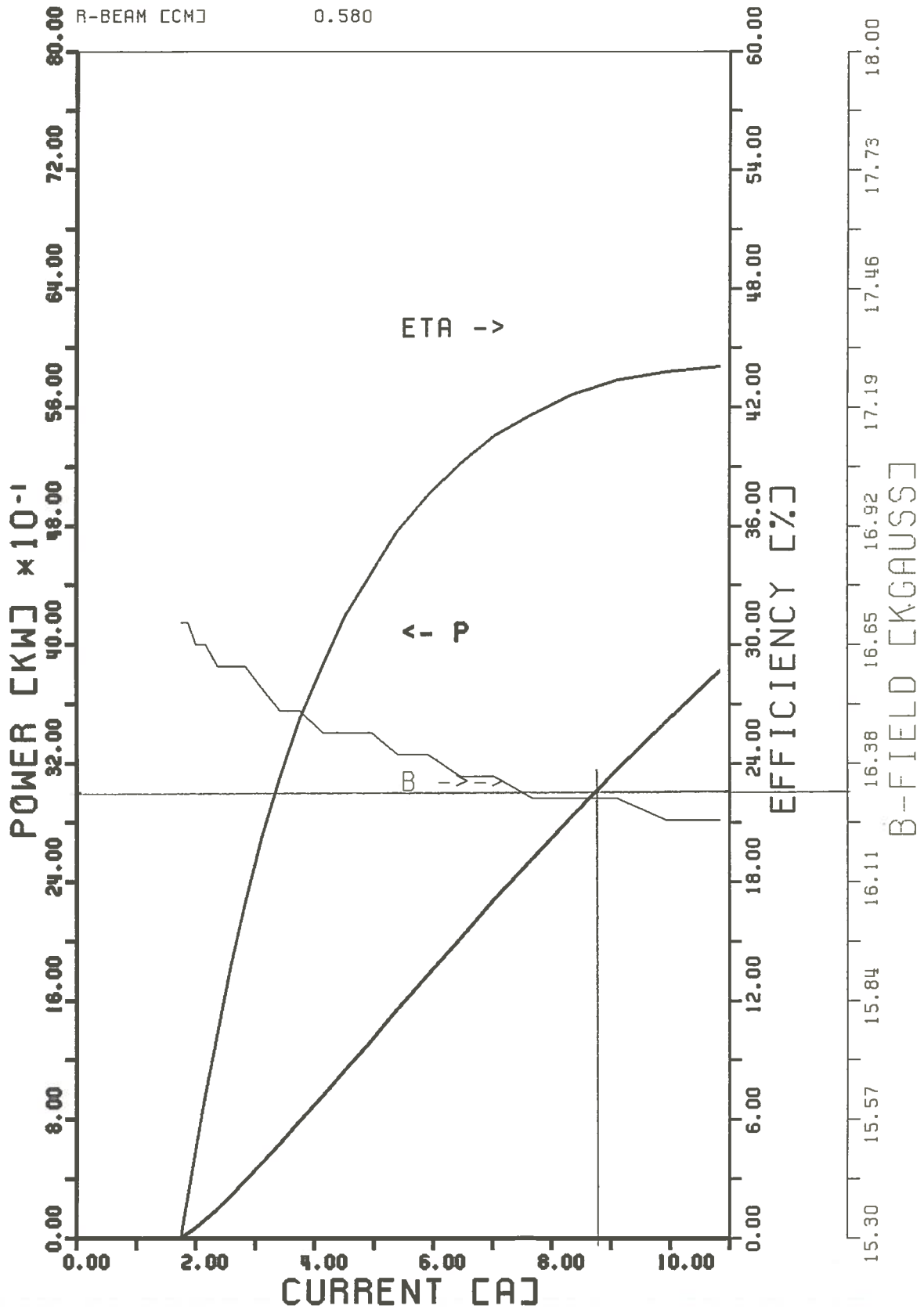


Fig. 8 Puissance de sortie, efficacité et champ B optimal en fonction du courant du faisceau d'électrons.

STARTING CURRENT VS B

COLD-O 618 MINIMUM *
 MODE TE 0 2 I-START CAJ 1.761
 COLD-F [GHZ] 42.000 B-FIELD [KGJ] 16.700
 U-CATH [KV] 80
 ALPHA 1.50
 R-BEAM [CM] 0.580

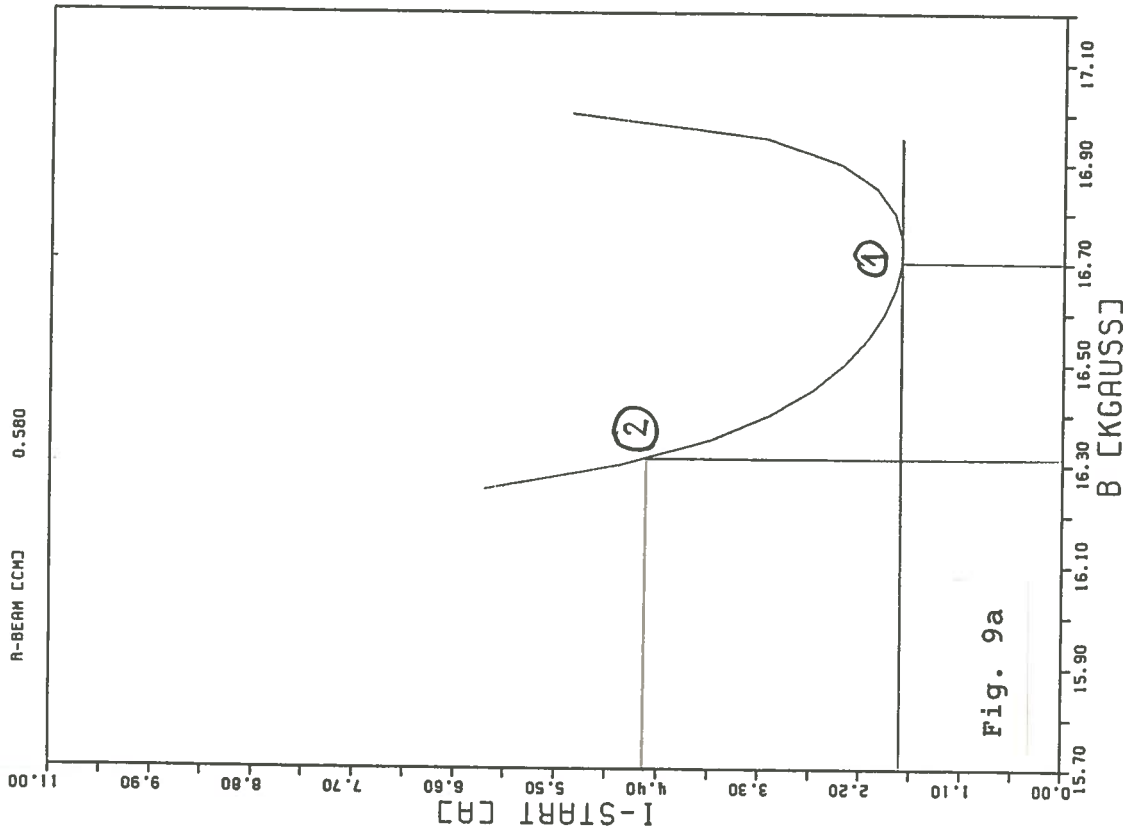


Fig. 9a

Courant d'accrochage en fonction de B. Mode TE₀₂₁

STARTING CURRENT VS B

COLD-O 164 MINIMUM *
 MODE TE 0 2 I-START CAJ 13.632
 COLD-F [GHZ] 42.525 B-FIELD [KGJ] 17.800
 U-CATH [KV] 80
 ALPHA 1.50
 R-BEAM [CM] 0.580

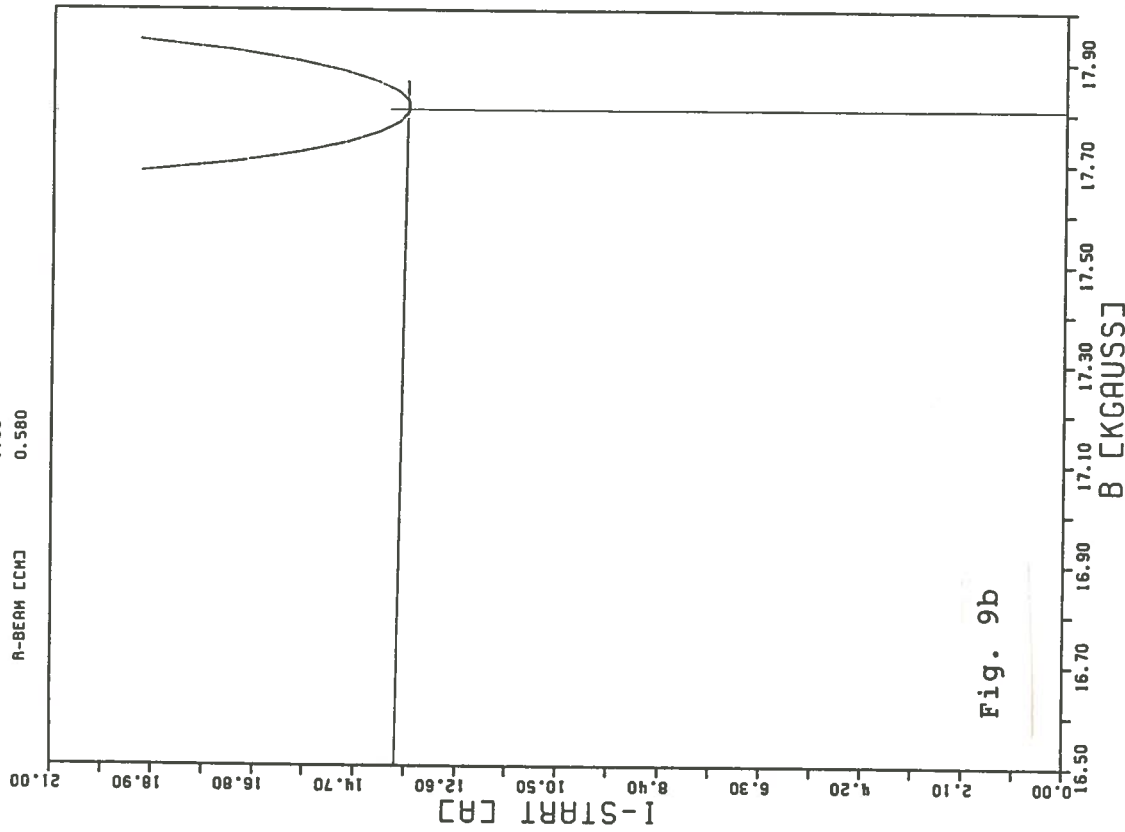


Fig. 9b

Courant d'accrochage en fonction de B. Mode TE₀₂₂

EFFICIENCY VS E-FIELD

Q-FACTOR = 618
 QCD = 1.0870
 B [KGAUSS]= 16.3100
 VTVZ = 1.50
 U-CATH[KV]= 80000
 R-BEAM[CM]= 0.580

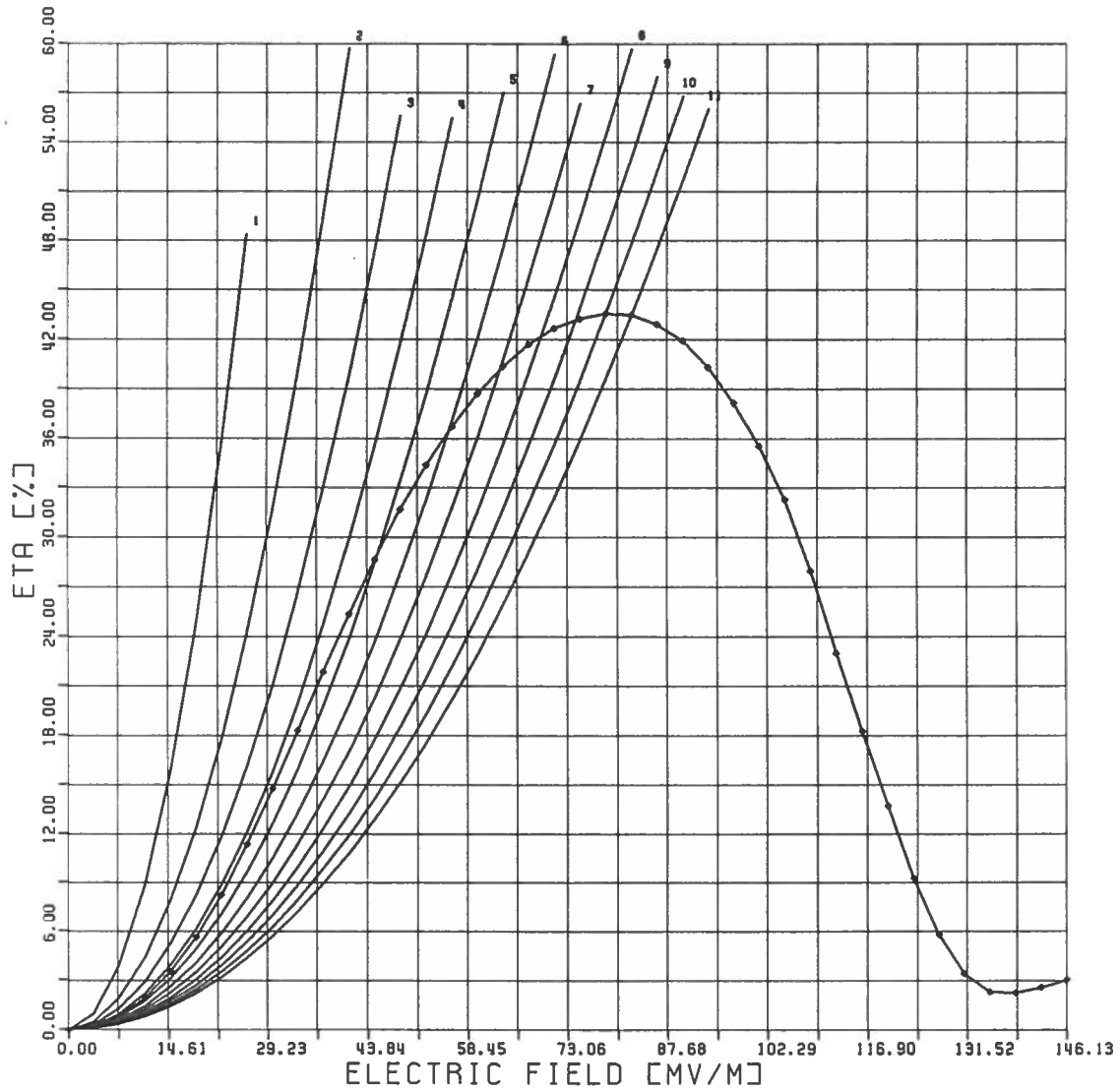


Fig. 10 Efficacité η en fonction du champ électrique.
 Les paraboles figurent la puissance extraite du résonateur
 divisée par le courant du faisceau pour $I = 1$ à 11 A.
 Les intersections donnent les points de fonctionnement.

RESONANT FREQUENCY = 42.525 GHZ
 QUALITY FACTOR = 164.1
 REFL. COEF. = .0000E+00 .0000E+00

88/06/03
 16.34.37

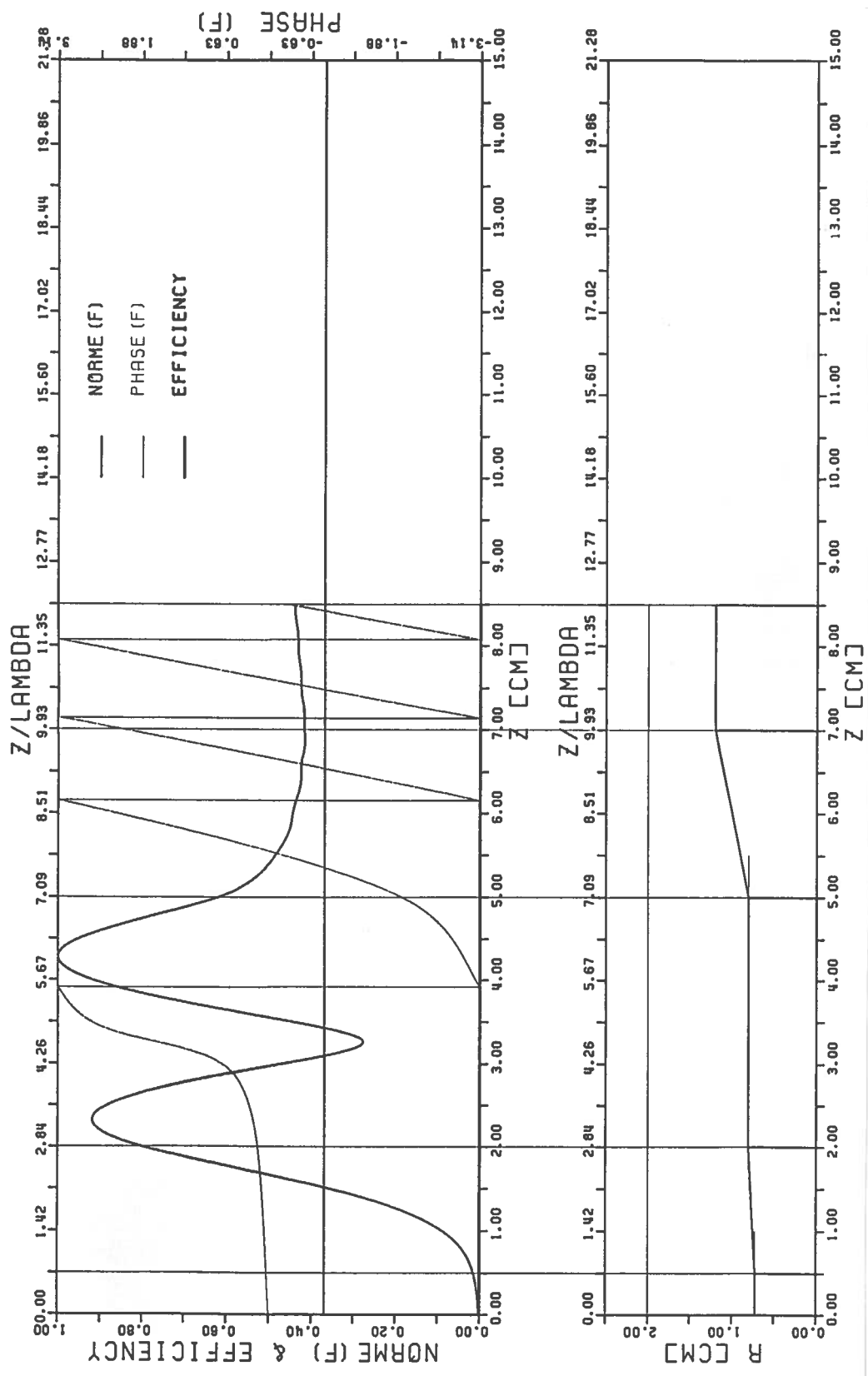


Fig. 11 Bas: Profil du résonateur.
 Haut: Dépendance en z du champ électrique (norme et phase).

Facteur de qualité: 164 (Mode TE₀₂₂)
 Fréquence de résonance: 42.525 GHz
 Faisceau: = 1.5, R_{beam} = 0.58 cm, 80 kv.

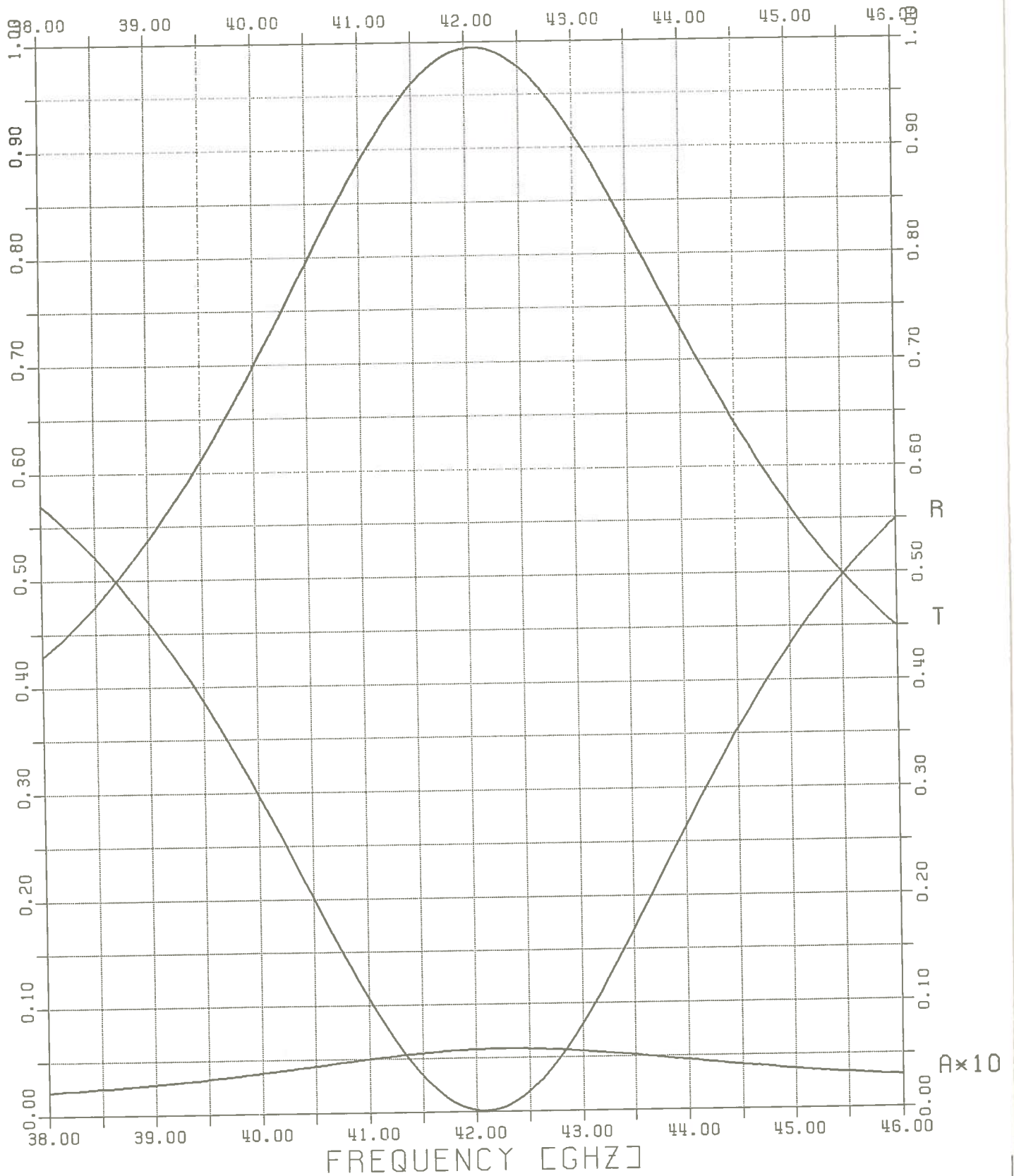


Fig.12a Transmission (T), reflexion (R) et absorption (A) en fonction de la fréquence pour une fenêtre en alumine 995.

$\epsilon_r = 9.604$, $\epsilon_i = -0.00336$, Epaisseur: 3.46 mm, Rayon: 3.175 cm

Echelle linéaire.

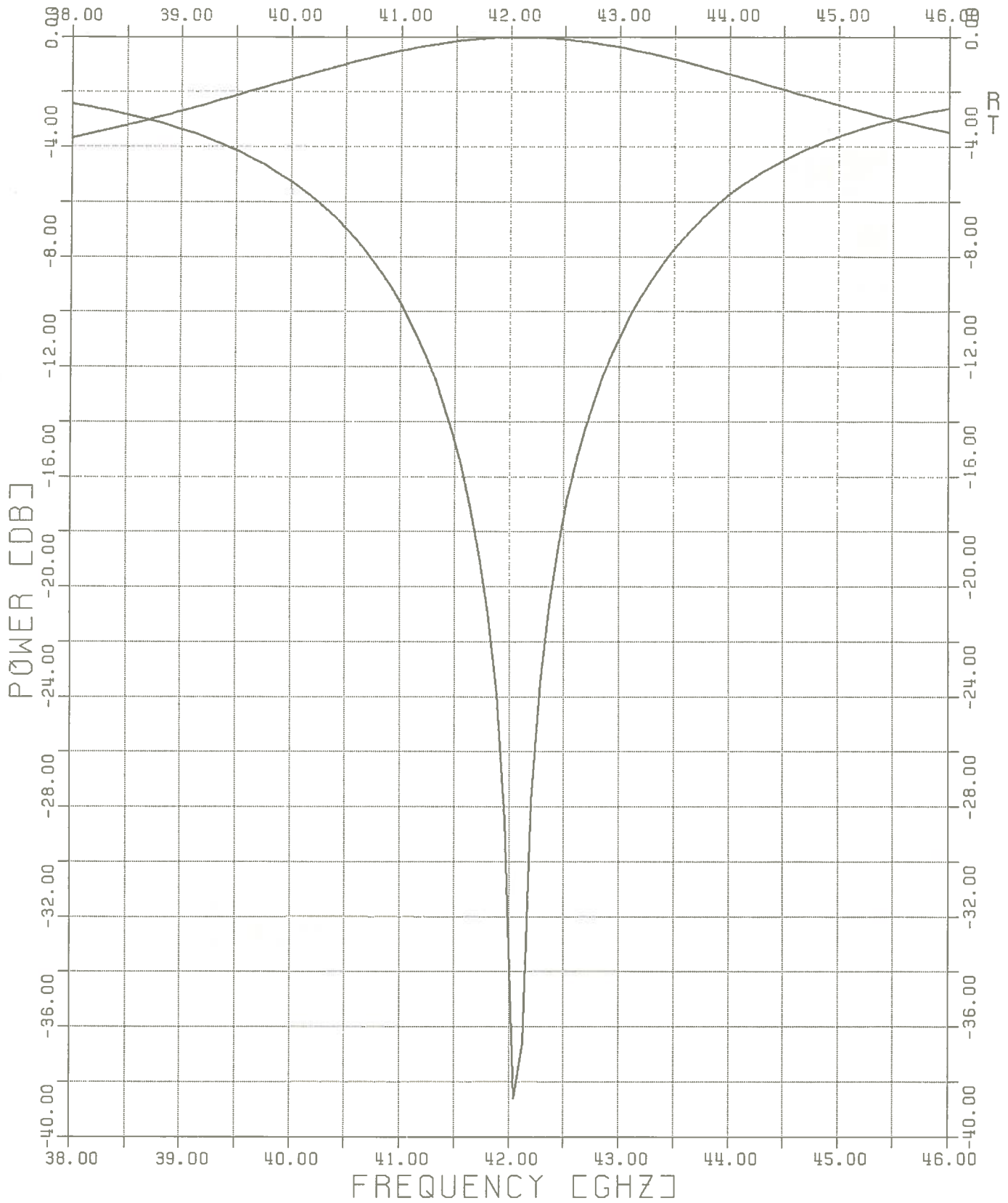


Fig.12b Transmission (T), reflexion (R) et absorption (A) en fonction de la fréquence pour une fenêtre en alumine 995.

$\epsilon_r = 9.604$, $\epsilon_i = -0.00336$, Epaisseur: 3.46 mm, Rayon: 3.175 cm

Echelle en décibels.

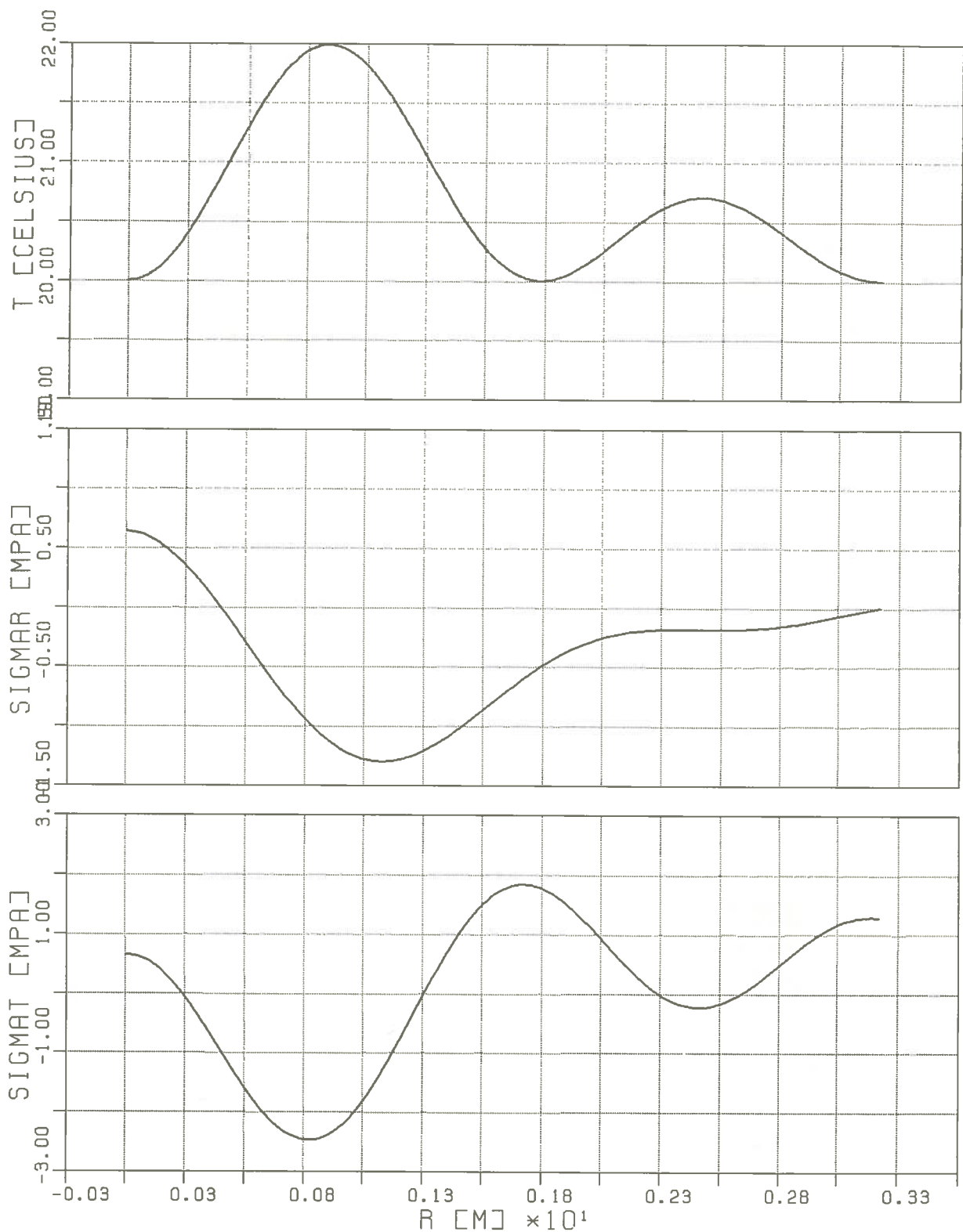


Fig.13a Profil de température et contraintes thermiques dans la fenêtre en alumine pour une impulsion de 300 kW durant 20 ms.

$\epsilon_r = 9.604$, $\text{tg } \delta = 3.5 \cdot 10^{-4}$, Mode TE_{02}
 Rayon de la fenêtre: 3.175 cm, épaisseur: 3.46 mm
 SIGMAR: contrainte radiale, SIGMAT: contrainte transverse
 Convention: signe + = tension, signe - = compression
 Tension de rupture: 277 MPa.
 La fenêtre est refroidie uniquement par le bord.

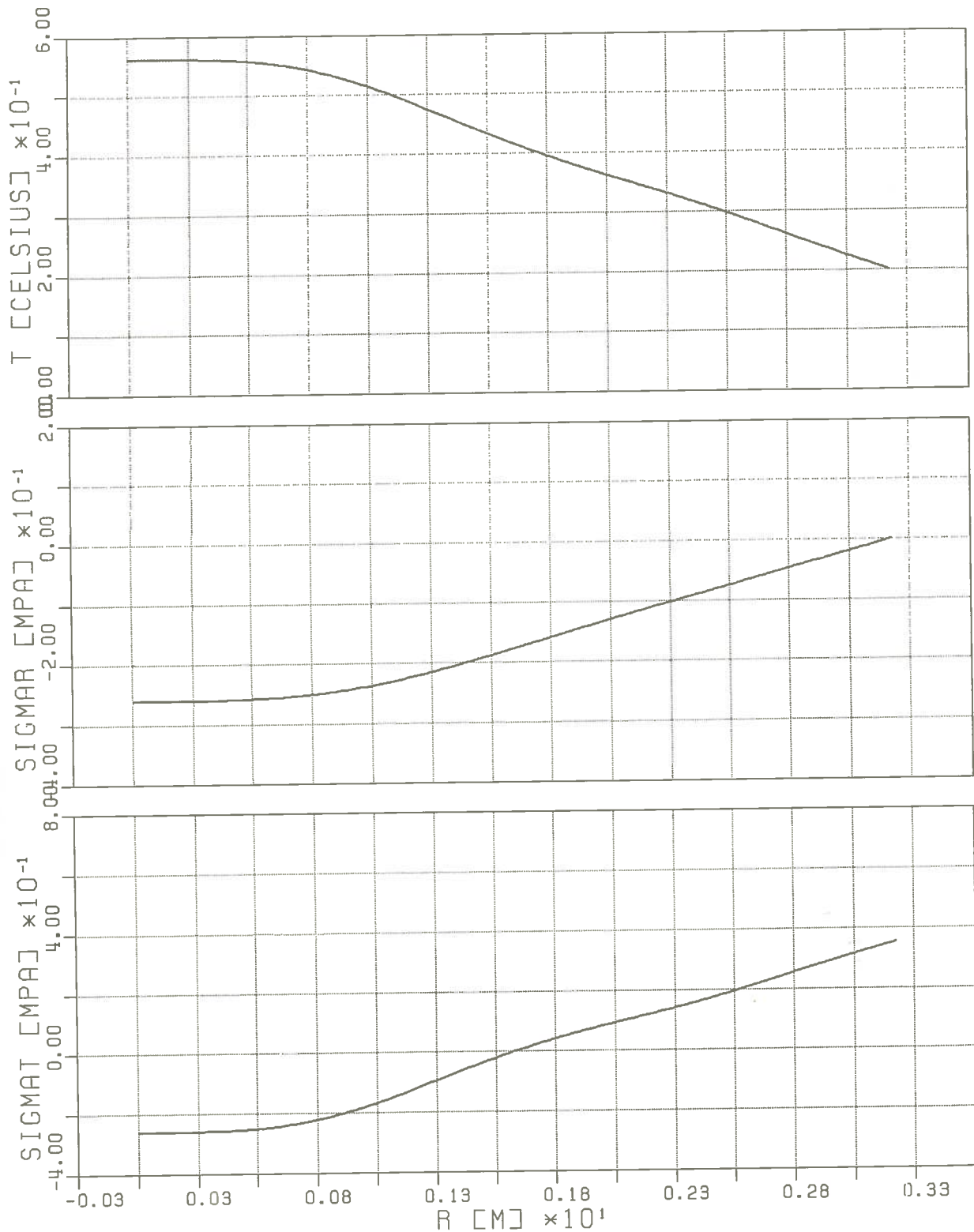


Fig.13b Profil de température et contraintes thermiques dans la fenêtre en alumine pour une puissance continue de 10 kW.

$\epsilon_r = 9.604$, $\text{tg } \delta = 3.5 \cdot 10^{-4}$, Mode TE_{02}
 Rayon de la fenêtre: 3.175 cm, épaisseur: 3.46 mm
 SIGMAR: contrainte radiale, SIGMAT: contrainte transverse
 Convention: signe + = tension, signe - = compression
 Tension de rupture: 277 MPa.
 La fenêtre est refroidie uniquement par le bord.

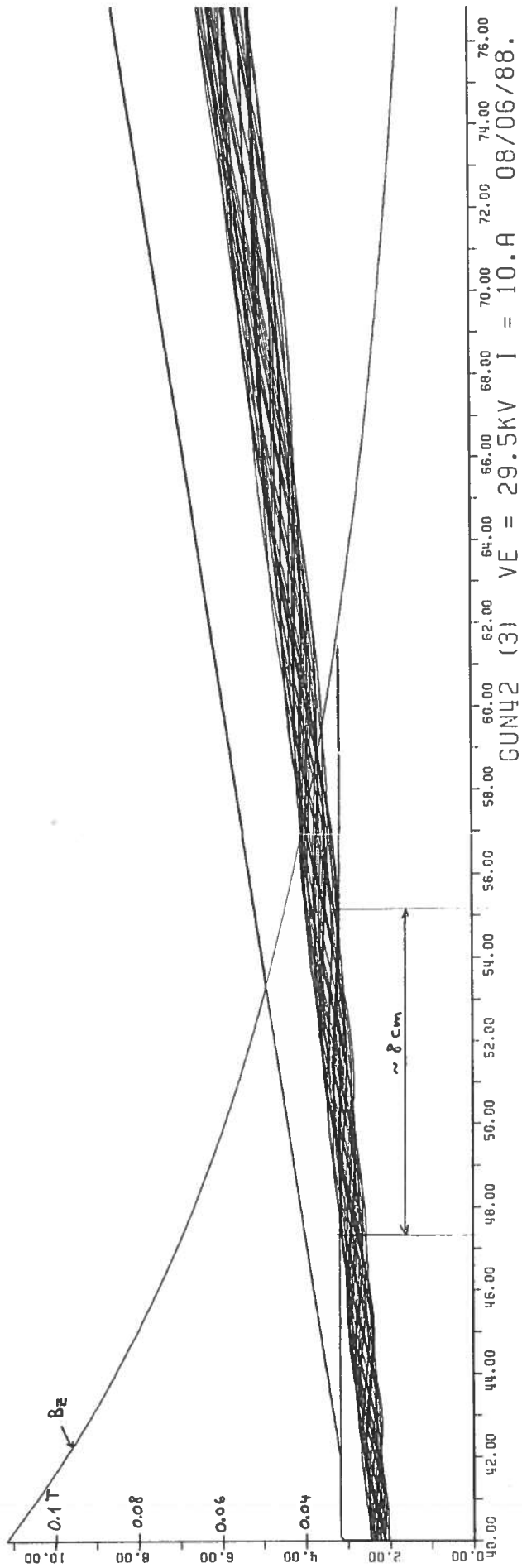
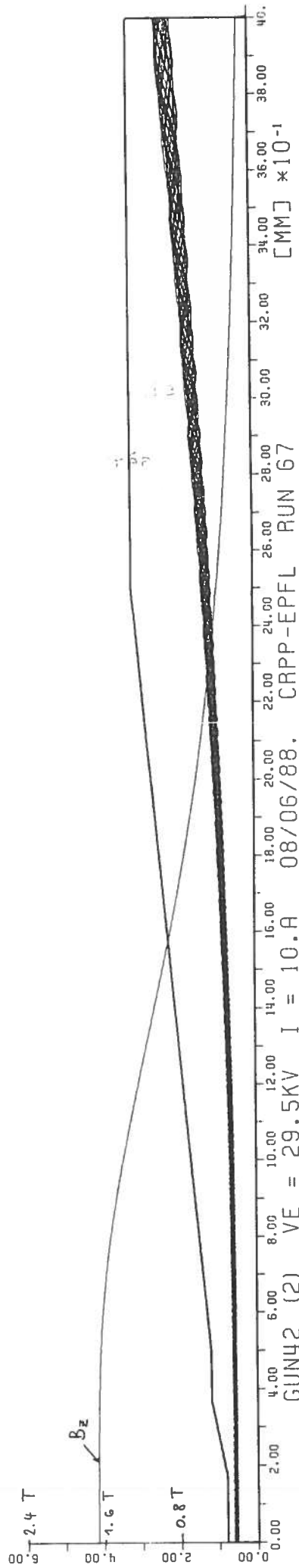


Fig. 14 Trajectoires électroniques après le résonateur.
 (Pas de bobines autour du collecteur.)

APPENDICE ALISTE DES FICHIERS

Fichiers de commandes sur CYBER UN=AP1

- GUNTOC Création des programmes exécutables sur CRAY:
EGUN, BOUNDY, MAGNET.
- JMAG42 Calcule la carte de champ magnétique (pot. vecteur) à partir
du courant dans les bobines. 1ère section.
- JMAG452 Idem, 2ème section.
- JMAG453 Idem, 3ème section.
- GUN42 Simulation des trajectoires (EGUN), 1ère section.
- GUN42B Idem, avec le résonateur
- GUN422 Idem, 2ème section
- GUN423 Idem, 3ème section
- PLOTG45 Dessin du canon sur Versatec (Cyber)
- RMAG42 Dessine les lignes de contour du champ $|B|$
- NSCTOC Création du programme exécutable sur CRAY: CAVFIL9
- CR42 Champ E du résonateur, efficacité du gyrotron TE_{021}
- CR42B Idem, mode TE_{022}

```

JOBST,STLYY.   FILE GUN42: GYRO 42 GHZ   SECTION 1
USER,AP1, .
JOB,JN=GUN42,MFL=720000,T=600.
ACCOUNT,AC=20007,APW=SANDRA,US=AP1,UPW=,NUPW=.
*
* ELECTRON GUN DESIGN : COMPUTATION ON CRAY, PLOT ON CYBER
*
ACCESS, DN=BOUNDY, OWN=AP1.
ASSIGN, DN=ZOUT, A=FT09.
ASSIGN, DN=TAPE6, A=FT06.
BOUNDY.
REWIND, DN=ZOUT.
COPYD, I=ZOUT, O=$OUT.
RELEASE, DN=ZOUT.
*REWIND, DN=TAPE6.
*COPYD, I=TAPE6, O=$OUT.
REWIND, DN=TAPE6.
COPYD, I=TAPE6, O=INSUGUN.
REWIND, DN=INSUGUN.
RELEASE, DN=BOUNDY:TAPE6:ZOUT.
*
REWIND, DN=INSUGUN.
ACCESS, DN=VECTORA, PDN=VECT42.
ASSIGN, DN=ZOUT1, A=FT09.
ACCESS, DN=EGUN, OWN=AP1.
EGUN.
*
* SAVE DATA FOR NEXT SECTION
*
ACCESS, DN=OGYR421, NA, UQ.
DELETE, DN=OGYR421, NA.
RELEASE, DN=OGYR421.
REWIND, DN=OUTGUN1.
SAVE, DN=OUTGUN1, PDN=OGYR421.
*
* SAVE PLOTGUN AND DATPLT ON CYBER (INPUT FILES OF PLTGUN)
*
DISPOSE, DN=PLOTGUN, DC=ST, TEXT='CTASK.ROUTE,PLOTGUN,UJN=TAPE1,DC=WT.',WAIT.
DISPOSE, DN=DATPLT, DC=ST, TEXT='CTASK.ROUTE,DATPLT,UJN=TAPE12,DC=WT.'
'GET,PLOTG45/UN=AP1.GO,PLOTG45.'.
*
REWIND, DN=ZOUT1.
COPYD, I=ZOUT1, O=$OUT.
RELEASE, DN=INSUGUN:NRNZ:EGUN.
*
EXIT.
REWIND, DN=ZOUT1.
COPYD, I=ZOUT1, O=$OUT.

```


File GUN42, suite

/EOF

GUN42 (1) VE = 29.5 KV I = 10.A 01/06/88. CRPP-EPFL RUN 64

\$INPUT0

RLIM= 90, ZLIM= 720, POTN=6, INTPA=.TRUE.,

\$END

\$INPUT1

POT=0., 80000., 0., 0., 0., 29500., MI=3, TYME=100.,

LSTPOT=0,

\$END

\$INPUTB

RRO=0., ZZ0=-80., ZORG=-36.00000, ZLENGT=0.0,

\$END

000

4.5, 36., 0.05, 0., 3.398 , 4, 0/
'A', 4, 55., 0., 2.398/
'L', 4, 2.2574, 145./
'L', 1, 0.3000, 145./
'L', 4, 1.0704, 145./
'L', 0, 0.8545, 90./
'L', 6, 1.6958, -35./
'A', 6, 35., 3.601, 1.963/
'L', 6, 1.0383, 0./
'A', 6, 90., 3.601, 3.001/
'L', 6, 0.8990, 90./
'L', 0, 3.0000, 0./
'L', 2, 1.5886, -90./
'A', 2, 86., 2.911, 8.001/
'L', 2, 13.100, -4./
'L', 2, 15.010, -1.0694/
'L', 0, 0.720, -90./
'E'/'

888

\$INPUT4

MAXRAY=40, NMAG=0,

\$END

\$INPUT5

RC=43.8, ZC=22.5, NS=50, UNIT=.0005, ZEND=720,

ZMAG=726, SPC=1., AV=10, AVR=10., STEP=.2, ERROR=10.,

DENS=2.40000, MAGORD=4, RMAG=44.0, SX= 37., SY=14.,

CZ=400., CR=147., CM=243000.,

IZS=79,

\$END

/EOF

```

JOBST,STLYY.      FILE JMAG42: CREE LE FICHIER DU CHAMP B POUR EGUN
USER,AP1,.              42 GHZ GYROTRON
JOB,JN=MAG42,MFL=400000,T=400.
ACCOUNT,AC=20007,APW=SANDRA,US=AP1,UPW=,NUPW=.
*
*PRINT THE OUTPUT
*DISPOSE,DN=$OUT,SDN=OUT,DC=ST,TEXT='CTASK.ROUTE,OUT,TC=13.',DEFER.
*
ACCESS,DN=MAGNET,OWN=AP1.
ACCESS,DN=VECT42,NA,UQ.
DELETE,DN=VECT42,NA.
RELEASE,DN=VECT42.
MAGNET.
SAVE,DN=VECTORA,PDN=VECT42,RT=100.
EXIT.
/EOF
$SELECT
  NCOAX=+1, NFORCE=0, NPRINC=0,
$END
$DATA2
  NBF=1,
  NPTR= 100, RPI= 0.,   DRP=0.0005,
  NPTZ= 900, ZPI=-0.40, DZP=0.0005,
$END
$COILS
  NC=4, UN=3,
$END
$TRAJ
  NT=0, R1=0.05, IMAX=500, Z0=-0.6, Z11=0.4,
$END
$DATA
  Z1(1)=-0.095,Z2(1)=-0.045,A1(1)=0.1100,A2(1)=0.190,AT(1)=266860.,
  Z1(2)= 0.045,Z2(2)= 0.095,A1(2)=0.1100,A2(2)=0.190,AT(2)=267850.,
  Z1(3)=-0.405,Z2(3)=-0.355,A1(3)=0.0700,A2(3)=0.140,AT(3)= -6586.,
  Z1(4)=-0.345,Z2(4)=-0.295,A1(4)=0.0700,A2(4)=0.140,AT(4)= -1996.,
  KSWI=2,
$END
$LINES
$END

```

```

MAGNET.          FILE: RMAG42          CONTOUR PLOT OF MAGNETIC FIELD
USER,,.          42 GHZ GYROTRON
CHARGE,* .
SETTL,* .
PURGE,OM42/NA.
ATTACH,MA.
MA, INPUT,OUTPUT,OM42.
SAVE,OM42.
GET,PLTM45.
FTN5,I=PLTM45,L=0,ANSI=0.
REWIND,OM42.
LGO,OM42,OMAGN2.
RASTER.
ROUTE,GLDX.FC=PC.
GET,PLTM1.
FTN5,I=PLTM1,L=0,ANSI=0,B=PLT.
REWIND,OM42.
GET,CLEANUP.
CLEANUP.
REWIND,OM42.
PLT,OM42,OMAGN2.
RASTER.
ROUTE,GLDX.FC=PC.
(eor)
CONTOUR PLOT OF STATIC MAGNETIC FIELD
42 GHZ GYROTRON MAGNET
$SELECT
  NCOAX=1, NFORCE=1, NPRINC=1,
$END
$DATA2
  NBF=1,
  NPTR= 41, RPI=0., DRP=0.01,
  NPTZ=121 , ZPI=-0.5, DZP=0.01,
$END
$COILS
  NC=4, UN=3,
$END
$DATA
  Z1(1)=-0.095,Z2(1)=-0.045,A1(1)=0.1100,A2(1)=0.190,AT(1)=266860.,
  Z1(2)= 0.045,Z2(2)= 0.095,A1(2)=0.1100,A2(2)=0.190,AT(2)=267850.,
  Z1(3)=-0.405,Z2(3)=-0.355,A1(3)=0.0700,A2(3)=0.140,AT(3)=-6586.,
  Z1(4)=-0.345,Z2(4)=-0.295,A1(4)=0.0700,A2(4)=0.140,AT(4)=-1996.,
  XWID(1)=0.001, XHEI(1)=0.001,
  XWID(2)=0.001, XHEI(2)=0.001,
  XWID(3)=0.002, XHEI(3)=0.002,
  XWID(4)=0.002, XHEI(4)=0.002,
  KSWI=0, KSWIC=0, KSWZ=0,UNIT=1.,
$END
$ADJUST
NP=2,
Z1(1)= 0.0,    BZZ(1)=1.660,
Z1(2)=-0.350, BZZ(2)=0.1154,
WEIGHT(1)=1., WEIGHT(2)=1.0, WEIGHT(3)=1., WEIGHT(4)=1.,
$END

```

```

JOBST,STLYY.      * FILE CR42:  RESONATOR FOR THE 42 GHZ GYROTRON
USER,AP1, .
JOB,JN=CR42,MFL=150000,T=1000.
ACCOUNT,AC=20007,APW=SANDRA,US=AP1,UPW=,NUPW=.
*
*      COLD CAVITY AND NON SELF-CONSISTANT PARTICULE CALCULATION.
*      THE SOURCE IS NSC/UN=AP1.
*      (USE GO,NSCTOC TO PUT CAVFIL9 ON THE CRAY.)
*
DISPOSE, DN=PLFIL1,DC=ST,TEXT='CTASK.ROUTE,PLFIL1,UJN=CDES45,DC=WT.'
'GET,NSCPLOT/UN=AP1.GO,NSCPLOT.',DEFER.
*
ASSIGN, DN=PLFIL1,A=FT10.
ACCESS, DN=CAVFIL9.
CAVFIL9.
EXIT.
*****
*
DUMPJOB.
DEBUG,BLOCKS,MAXDIM=10:10.
FLODUMP.
/EOF
$PHYDAT
MTEMN   = 0,  NTEMN   = 2,  NSHARM = 1,
B0      = 1.86400,
E0      = 1.0E+03,
RB0     = 0.580E-02,  VOLTAG = 80.E+03,  VTVZ   = 1.50,
XI0     = 1.00,
NORBIT  = 64,
WWTICK=0.00434,  WWEPSI=1.,           WWTANDL=0.,
$END
$MAGDAT  NFIELD=2,
        PZB(1)=0.0,      BFIELD(1)=1.864000,
        PZB(2)=0.40,    BFIELD(2)=1.864000,
$END
$DATA3  NEFEXT=40,      DELTAE=6.00E5,
        NBFEXT=20,     DELTAB =0.005,
        XNEWB0=1.0,    B0START=1.720,
        DRAWCAV=1.0,   DRAWETA=2.0,
        FIXFREQ=1.0,
        RRWRK=0.263893669892000E+12,  RIOWRK=0.213454144018367E+09,
        ONLYCAV=0.0,
        DRAWOPT=1.0,   CURRMAX=11.0,           IWRITE=2,
        ICONT=0,       NCONT=12,           NDASH=9,
        CVAL(1)=0.05,  CVAL(2)=0.6,
        DRAWIS=1.0,   IFIXR0=1,           NLU=0,
$END
$DATA1  NSEG=5 ,NZ=2048,  MODE=1,  NFREQ=3,  FREQ=42.E+09,
$END
$SCALIN  ISCALIN=0,  FREQNEW= 8.E+09,  MNEW=0,  NNEW=2,
$END
$DATA2  Z(1)=0.0000,   R(1)=0.00720,   IOPTINP=1,
        Z(2)=0.0050,   R(2)=0.00720,
        Z(3)=0.0200,   R(3)=0.008004,
        Z(4)=0.0500,   R(4)=0.008004,
        Z(5)=0.0700,   R(5)=0.01200,
        Z(6)=0.0850,   R(6)=0.01200,
$END
$ZROTL  DXSTEP=1.0E3,  TOLFIN=1.0E-4,
$END
/EOF

```

File CR42, suite

```
*      RB0      : BEAM RADIUS AT THE CAVITY INPUT
*      VTVZ     : RATIO (V-TRANSVERSE/V-PERP)
*      XI0      : VALUE OF THE CURRENCY USED FOR THE CAVITY LOSSES CALCULATION
*      NORBIT   : # OF PARTICULES
*      NEFEXT   : # OF ELECTRIC FIELB VALUES USED IN THIS RUN , STARTING AT E0
*      DELTAE   : ELECTRIC FIELD INCREMENT
*      NEBEXT   : # OF MAGNETIC FIELB VALUES USED IN THIS RUN , STARTING AT B0
*              IF XNEWB0=0 OR AT B0START IF XNEWB0=1
*      DELTAB   : MAGNETIC FIELD INCREMENT
*      DRAWCAV  : CAVITY'S SHAPE ,E-FIELD AND EFFICIENCY PROFILES DRAWING
*              IF = 1
*      DRAWETA  : = 0 :NO DRAWING
*              = 1 :DRAWING OF CAVITY & PARTICULE EFFICIENCY VS E-FIELD
*              FOR EACH B VALUE
*              = 2 :DRAWING OF CAVITY & PARTICULE EFFICIENCY VS E-FIELD
*              ONLY FOR THE B-FIELD WICH GIVES THE BEST EFFICIENCY
*      ONLYCAV  : = 1 :STOPS THE CALCULATION AFTER THE WAVE EQUATION IS
*              SOLVED
*      DRAWIS   : = 1 :DRAWS THE STARTING CURRENT CURVE
*      ILOF     : # OF REAL OMEGA CALCULATED TO HAVE A FIRST ESTIMATE
*              OF THE RESONNANT FREQUENCY. (USED ONLY IF FIXFREQ=0)
*      IFIXR0   : = 1 : KEEP THE CAVITY INPUT RADIUS GIVEN IN THE NAMELIST
*              = 0 : THE RADIUS OF THE NFREQ-TH SECTION IS PUT SUCH
*              THAT THIS SECTION IS AT CUT-OFF FOR FREQ & CALCULATES
*              BACKWARDS THE INPUT RADIUS
*              (KEEPING THE SHAPE)
*      NLU      : = 0 : SEGMENTS ARE LINEAR, AND YOU HAVE SHARP ANGLES
*              BETWEEN THE SEGMENTS.
*              = 1 : THE OUTPUT ANGLE OF THE CAVITY IS "ROUNDED"
*              BY A CUBIC FUNCTION
*      WPEPSI   : REAL PART OF THE RELATIVE DIELECTRIC CONSTANT OF
*              THE WINDOW MATERIAL.IF WPEPSI=1.0 THE PROGAM DOES
*              NOT INCLUDE ANY REFLECTION AT THE END OF THE CAVITY.
*      TANDL    : TANGENT(Delta) OF THE WINDOW MATERIAL (NOT USED)
*      WWTHICK  : WIDOW THICKNESS (METER).IF WWTHICK IS SET SMALLER THAN
*              1.0E-5 THE PROGRAM COMPUTES THE THICKNESS COREESPONDING
*              TO THE MINIMUM REFLEXION ( LAMBDA/2. IN THE WINDOW)
*              THE THE OUTPUT VALUE IS THEN GIVEN OUT.
```

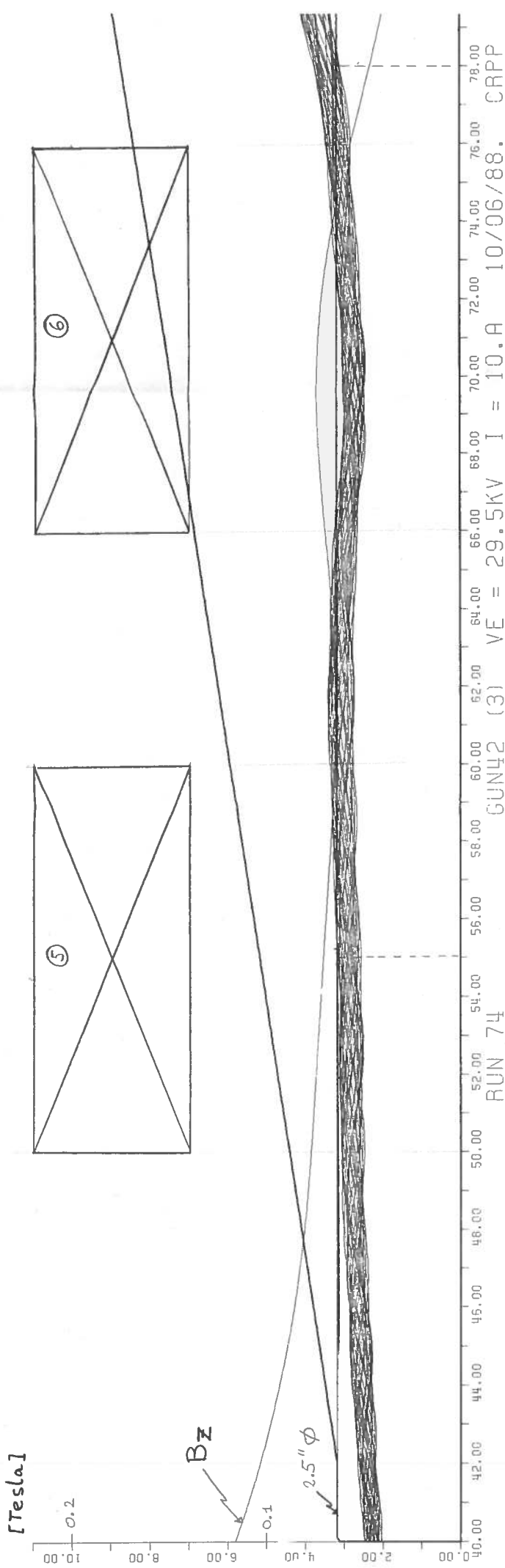


Fig. 15 Trajectoires électroniques après le résonateur.
 2 bobines autour du collecteur:
 I5 = 3000 At, I6 = 8000 At.