

INT 134/87

ETUDE D'UN GYROTRON
DE 45 GHZ

André PERRENOUD

Décembre 1987

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

TABLE DES MATIERES

1. Spécifications	2
2. Choix des paramètres principaux	3
2.1 Longueur d'interaction	
2.2 Faisceau d'électrons	
2.3 Mode TE	
2.4 Rayon du résonateur	
2.5 Rayon du faisceau d'électrons	
2.6 Champ magnétique	
2.7 Efficacité électronique	
2.8 Courant du faisceau	
2.9 Facteur de qualité du résonateur	
2.10 Courant d'accrochage	
3. Bobines	8
3.1 Bobines refroidies à l'eau	
3.2 Bobines supraconductrices	
4. Canon d'électrons	11
4.1 Nouvelles bobines	
4.2 Andromeda	
Appendices du chap. 4	
A) Définition des paramètres du canon à électrons	
B) Liste des runs (nouvelles bobines)	
C) Liste des runs (Andromeda)	
D) Liste des fichiers	
5. Résonateur	36
6. Fenêtre	38
6.1 Transmission, réflexion, absorption	
6.2 Contraintes thermiques	
7. Conclusions	39
Références	40
Figures	41

1. SPECIFICATIONS

- * Gyrotron classique pulsé de 45 GHz
- * Mode TE_{02}
- * Puissance 300 kW avec un faisceau de 10 A et 80 kV
- * Durée maximale des impulsions: 10 ms
- * Utilisation: démarrage de TCA
- * Réutiliser si possible les bobines "Andromeda".

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 (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.

L = longueur d'interaction.

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

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

$$\lambda = \text{longueur d'onde dans le vide} = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^8}{45 \cdot 10^9} = 6.67 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$\omega = 2\pi f$$

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

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

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

$$\underline{E} = E_\phi e^{i(\omega t + \psi)} \cdot \hat{\phi} \quad (5)$$

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

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

2.1 Longueur d'interaction

D'après la Fig.1, on choisit μ de manière à optimiser l'efficacité électronique perpendiculaire η_\perp .
Les paramètres normalisés optimaux sont:

$$F_{opt} = 0.13, \quad \mu_{opt} = 18, \quad \Delta_{opt} = 0.5 \quad (6)$$

Prenons donc $\mu = \mu_{opt} = 18$

2.2 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 $\gamma_0 = 1.157$

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 $\alpha = 1.5$

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

d'où $L = \mu \frac{\beta_{\parallel 0} \lambda}{\pi \beta_{\perp 0}^2} = 9.138 \lambda = 6.092 \text{ cm}$, où l'éq. (1) a été utilisée.

2.3 Choix du mode TE

Une fois les caractéristiques du faisceau connues, le choix du mode est dicté par la puissance microonde et le niveau maximum tolérable des pertes ohmiques dans les parois du résonateur.

Nous prendrons $S_{ohm} = 1000 \text{ W/cm}^2$ pour guider nos calculs.

(En fonctionnement pulsé une valeur plus élevée serait acceptable.)
Pour un résonateur en cuivre OFHC à 200° C , la conductivité RF est de

$$\sigma = 3.6 \cdot 10^7 \Omega^{-1} \text{ m}^{-1}$$

En utilisant la formule (15) de la réf.[2]:

$$(\nu_{mp}^2 - m^2) = \frac{(0.2470) \mu P [\text{MW}] f^{2.5} [\text{GHz}]}{\beta_{\perp 0} (1 - R_2) S_{ohm} \alpha (1 - 0.5 \Delta \beta_{\perp 0}^2)^2} \quad (7)$$

où R_2 , la réflectivité à la sortie du résonateur est reliée au facteur de qualité diffractif Q_D par:

$$Q_D = \frac{4\pi}{(1 - R_2)} \left(\frac{L}{\lambda} \right)^2 \quad (8)$$

Avec nos paramètres et $m = 0$, $R_2 = 0.5$, $P = 0.3$, on trouve $\nu_{op} = 7.4$.
Le zéro de $J'_0(x)$ le plus proche est $\nu_{o2} = 7.0156$, donc le choix du mode TE_{02} est raisonnable.

A noter que les gyrotrons VARIAN de 28 et 60 GHz fonctionnent aussi en mode TE_{02} .

2.4 Rayon du résonateur

Le mode étant en coupure, on a immédiatement:

$$k_{\perp} a = \nu_{o2} \quad \text{d'où} \quad a = \frac{\nu_{o2}}{2\pi} \lambda = 7.44 \text{ mm}$$

2.5 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.

$$E_{\phi} \sim J'_0 \left(\frac{\nu_{o2}}{a} r \right) = -J_1 \left(\frac{\nu_{o2}}{a} r \right)$$

Extrema de $J_1 =$ zéros de J'_1

$$\text{1er zéro} \quad \frac{R_e}{a} = \frac{\nu_{11}}{\nu_{o2}} = \frac{1.8412}{7.0156} = 0.262, \quad \text{d'où} \quad R_e = 1.953 \text{ mm}$$

$$\text{2ème zéro} \quad \frac{R_e}{a} = \frac{\nu_{12}}{\nu_{o2}} = \frac{5.3314}{7.0156} = 0.760, \quad \text{d'où} \quad R_e = 5.654 \text{ mm}$$

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

$$\Delta V = \frac{30 I_A}{\beta_{\parallel 0}} \left[0.75 \left(\frac{\Delta_b}{R_e} \right) + 2 \ln \frac{a}{R_e + \Delta_b/2} \right] \quad (9)$$

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.

$$\text{Avec } \Delta_b = 2r_L = 2 \frac{\beta_{\perp 0} c}{\Omega_0} = 2 \frac{\beta_{\perp 0} c}{\gamma_0 \omega} = \frac{\beta_{\perp 0}}{\gamma_0 \pi} \lambda = \frac{0.418}{1.157\pi} 6.67 = 0.767 \text{ mm}$$

et $I_A = 10 \text{ A}$:

$$\Delta V = 110 + 450 = 560 \text{ Volts pour } R_e = 5.654 \text{ mm}$$

$$\Delta V = 317 + 2493 = 2810 \text{ Volts pour } R_e = 1.953 \text{ mm}$$

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.

2.6 Champ magnétique

$$\text{De (3) nous déduisons } B_0 = \frac{m_e}{e} \gamma_0 \omega \left(1 - \frac{\beta_{\perp 0}^2}{2} \Delta \right)$$

$$\text{Avec } \Delta = \Delta_{\text{opt}} = 0.5$$

$$B_0 = \frac{9.109 \cdot 10^{-31}}{1.602 \cdot 10^{-19}} 1.157 (2\pi) 45 \cdot 10^9 \left(1 - \frac{(0.418)^2}{2} 0.5 \right) = 1.779 \text{ Teslas}$$

2.7 Efficacité électronique η

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

$$\eta = \frac{\beta_{\perp 0}^2}{2(1 - \gamma_0^{-1})} \eta_{\perp} = 0.645 \eta_{\perp} \quad (10)$$

$$\eta_{\text{opt}} = 0.645 \eta_{\perp \text{opt}} = 0.645 \cdot 0.72 = 0.465$$

Ainsi, l'efficacité maximum est de 46.5 %.

2.8 Courant du faisceau

Le courant normalisé [1] est défini par:

$$I = \left(\frac{2}{\pi} \right)^{\frac{5}{2}} \frac{e Q I_A}{\epsilon_0 \gamma_0 m_e c^3} \beta_{\perp 0}^{-4} \cdot \frac{\lambda}{L} \cdot \frac{1}{4} \cdot \frac{J_1^2(k_{\perp} R_e)}{\gamma_0^2 J_0^2(\gamma_0 z)} \quad (11)$$

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

$$J_0(\nu_{02}) = J_0(7.0156) = 0.30011$$

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

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

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

$$\frac{\lambda}{L} \frac{\beta_{\perp 0}^{-4}}{\gamma_0} = \frac{\pi}{\mu \beta_{\parallel 0} \gamma_0 \beta_{\perp 0}^2} = 3.099$$

$$\text{D'où } I = (4.992 \cdot 10^{-6}) \cdot Q I_A.$$

$$\text{Au point de fonctionnement [1]: } F^2 = \eta_{\perp} \cdot I \quad (12)$$

$$\text{A l'optimum: } I_{\text{opt}} = \frac{F_{\text{opt}}^2}{\eta_{\perp \text{opt}}} = \frac{(0.13)^2}{0.72} = 2.347 \cdot 10^{-2}$$

$$\text{et } (Q I_{A \text{opt}}) = 4702 \quad (13)$$

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

$$I_A = \frac{P}{\eta V} = \frac{300}{0.465 \cdot 80} = 8.06 \text{ A.} \quad (14)$$

2.9 Facteur de qualité du résonateur

De (13) et (14) on tire $Q = 583$.

Cette valeur est plus faible que $Q_{\min} = 4\pi \left(\frac{L}{\lambda}\right)^2 = 1050$, déduite de (8).

On ne pourra donc pas travailler à l'efficacité théorique maximum pour $P = 300$ kW. Il faudra vérifier avec le code self-consistent (chap. 5) si la puissance voulue est atteinte pour un courant de moins de 10 A.

2.10 Courant d'accrochage

D'après la Fig.3, $I_{\text{start}} = 2 \cdot 10^{-3}$ pour $\Delta = \Delta_{\text{opt}}$ et $\mu = \mu_{\text{opt}} = 18$.

$$I_{A \text{ start}} = \frac{I_{\text{start}}}{4.992 \cdot 10^{-6} Q} = \frac{400}{Q} \quad (15)$$

$$\underline{I_{A \text{ start}} = 0.69 \text{ A}} \quad \text{si } Q = Q_{\text{opt}} = 583.$$

3. BOBINES

3.1 Bobines refroidies à l'eau

Est-il possible de concevoir un système de bobines classiques pour obtenir 1.78 Teslas sur l'axe, ceci à un coût raisonnable ? Nous allons développer dans cette section un petit modèle physique pour tenter de répondre à cette question.

On désire un champ relativement constant sur la toute la longueur d'interaction qui est de de 6 cm (cf p. 3). Pour accommoder le tunnel à électrons et le système d'alignement, le rayon intérieur utile des bobines devra être de l'ordre de 3 cm.

En se basant sur le montage de Helmholtz (Fig.4), on peut estimer le champ engendré par les 2 bobines. Au centre du montage, sur l'axe:

$$B_z = \frac{8}{5\sqrt{5}} \cdot \frac{\mu_0 I}{L} \quad (16)$$

où I est le courant en Ampères-tours circulant dans chacune des bobines et L l'écartement. (Attention, dans ce chap. L n'est pas la longueur d'interaction !)

En unités pratiques: $I [\text{At}] = 11121 \cdot B_z [\text{Teslas}] \cdot L [\text{cm}]$

En laissant, disons, L/3 entre les bobines, nous avons:

$$L = (R_1 + R_2) / 2 \quad (\text{montage de Helmholtz}) \quad (17)$$

$$S = (R_2 - R_1) \frac{2L}{3} \quad (\text{section d'une bobine}) \quad (18)$$

$$j = \frac{I}{S} \quad (\text{densité de courant}) \quad (19)$$

$$w = \frac{j^2}{\sigma} \quad (\text{puissance ohmique dissipée par unité de volume}) \quad (20)$$

$$V = \pi (R_2^2 - R_1^2) \frac{2L}{3} \quad (\text{volume d'une bobine}) \quad (21)$$

$$P_{\text{tot}} = V \frac{j^2}{\sigma} \quad (\text{puissance ohmique dissipée dans une bobine}) \quad (22)$$

$$P_{\text{tot}} = \frac{V I^2}{\sigma S^2} = \frac{\pi (R_2 - R_1)(R_2 + R_1) \frac{2L}{3}}{\sigma (R_2 - R_1)^2 \left(\frac{2L}{3}\right)^2} \frac{125}{64} \frac{B_z^2}{\mu_0^2} L^2$$

Avec $\sigma = 5.8 \cdot 10^7 \Omega^{-1} \text{ m}^{-1}$ pour le cuivre

$$P_{\text{tot}} = 10^5 \cdot B_z^2 \frac{L^2}{L - R_1} \text{ [Watts]}$$

$$P_{\text{tot}} = 3.18 \cdot 10^5 \cdot \frac{L^2}{L - R_1} \quad \text{pour } B_z = 1.78 \text{ Teslas}$$

La fonction $g(L) = \frac{L^2}{L - R_1}$ possède un seul minimum pour $L > R_1$, soit

$g(L=2R_1) = 4R_1$. Avec $R_1 = 4$ cm, la puissance dissipée par bobine vaut donc 50.9 kW. Même en faisant l'hypothèse que l'on parvienne à évacuer cette chaleur (23.8 W/cm³), cela représenterait une puissance équivalente à celle du compresseur du liquéfacteur actuel du CRPP! Toutefois, les coûts de fonctionnement ne sont pas les mêmes.

Note 1: Pour une estimation plus réaliste, il faudrait encore tenir compte du coefficient de remplissage en cuivre de la bobine. La puissance dissipée est inversement proportionnelle à ce coefficient.

Note 2: A titre de comparaison, le MIT utilise un aimant classique (Bitter magnet) pour les gyrotrons de 140 GHz:

$$R \approx 5 \text{ cm}; \quad R \approx 25 \text{ cm}; \quad \text{d'où } P_{\text{tot}} = 600 \text{ kW pour } B_z = 5.5 \text{ T}$$

En conclusion, il faut sacrifier au moins une centaine de kilowatts pour obtenir le champ magnétique. Le choix des bobines, classiques ou supraconductrices, est politique.

3.2 Bobines supraconductrices

Le diamètre intérieur doit être suffisant pour que l'on puisse y faire passer le tunnel à électrons lors du montage, avec le système d'alignement. En comptant avec le mandrin, le cryostat d'hélium liquide et l'écran refroidi à l'azote liquide, nous avons pris pour R_1 12 cm (Fig.5). Il serait sans doute possible de choisir R_1 plus petit, mais nous n'avons pas cherché à minimiser à tout prix le volume des bobines. Ici également, le montage de Helmholtz est utilisé. Avec $R_2 = 20$ cm, $L = (R_1 + R_2)/2 = 16$ cm, et en faisant usage de (16), on peut estimer le courant nécessaire pour obtenir 1.78 Teslas sur l'axe:

$$I = 11121 \cdot 1.78 \cdot 16 = 3.17 \cdot 10^5 \text{ At.}$$

Le champ maximum sur le supraconducteur vaut 2.63 Teslas. La densité de courant, 6.6 kA/cm² est bien en dessous de la valeur critique (50 à 100 kA/cm²).

Une fois choisies les dimensions des grandes bobines, il s'agit de placer le canon et les "bucking coils" (BC) (bobines antagonistes) de façon à avoir une distance aussi courte que possible entre le canon et la zone d'interaction. On prend des BC classiques, comme pour le gyrotron à 115 GHz du CRPP.

$$R_1 = 7 \text{ cm}, \quad R_2 = 14 \text{ cm}, \quad \text{épaisseur selon } z: \Delta z = 5 \text{ cm},$$

$$\text{Section: } S = 35 \text{ cm}^2, \quad \text{Volume } V = \pi(R_2^2 - R_1^2)\Delta z = 2309 \text{ cm}^3,$$

Dégagement de chaleur en fonction du nombre d'Ampères-tours:

$$P_{tot} = \frac{V}{\sigma} \cdot \frac{I^2}{f S^2} = 3.25 \cdot 10^{-6} I \cdot \frac{1}{f} \quad (23)$$

où f est le coefficient de remplissage = (section de cuivre)/S.

Avec $f = 0.5$ et en tolérant 1 kW par bobine, il ne faut pas dépasser 8770 At.

Définissons le taux de compression magnétique comme

$$\alpha_c = \frac{B_z(z = z_i)}{B_z(z = z'_k)} = \left(\frac{R_k}{R_e} \right)^2 \quad (24)$$

où R_k = rayon de la cathode émissive

R_e = rayon du faisceau dans la zone d'interaction ($z = z_i$)

z'_k = position de la cathode (Fig.5)

En fonction du taux de compression et de z'_k , le tableau suivant montre les valeurs du courant dans chaque bobine:

=====					
		supra		BC	
	z'_k [cm]	1 [At]	2 [At]	3 [At]	4 [At]

10	-20	316000	315000	-15700	-7220
10	-23	315000	315000	-8396	-2594 *
10	-25	315000	315000	-4699	-122
20	-23	322100	320150	-16980	-10721
20	-24	321730	320190	-14897	-9405
20	-25	321430	320210	-13192	-8199
20	-26	321200	320230	-9678	-8813
20	-27	321010	320240	-8462	-7573 *
20	-28	320810	320250	-7765	-5793
15	-25	321190	320210	-7937	-8063 *
=====					

Les valeurs marquées d'une astérisque ont été utilisées pour le calcul du canon (chap.4).

Le champ B correspondant au cas $\alpha_c = 15$ est illustré à la fig.6. La distance entre cathode et zone d'interaction est de 36 cm.

4. CANON D'ELECTRONS

Le canon est du type MIG à 3 électrodes. Les paramètres géométriques sont décrits une fois pour toutes dans l'appendice A. Ils sont au nombre d'une vingtaine et il faut beaucoup tâtonner avant d'aboutir à une configuration tant soit peu acceptable. J'ai écrit un programme (DGUN) pour traduire ces paramètres en fichier d'entrée du code Herrmannsfeldt [3], (via BOUNDY pour les conditions aux limites). Ce n'est qu'un pis-aller en attendant une version CAD interactive (...), mais cela m'a permis d'étudier rapidement diverses configurations et pas seulement l'effet des tensions appliquées, qui lui est facile à simuler. A court terme on pourrait gagner beaucoup en efficacité si l'on récrivait le programme BOUNDY.

4.1 Nouvelles bobines

C'est avec un taux de compression de $\alpha_c = 15$ que les meilleurs résultats ont été obtenus. Avec $\alpha_c = 10$, le rapport $\beta_{\perp 0} / \beta_{\parallel 0}$ était toujours nettement inférieur à 1.5 ; avec $\alpha_c = 20$, il se produisait un "effet miroir". La liste des runs est donnée à l'appendice B.

Les trajectoires électroniques sont dessinées aux figures 7 et 8. Les paramètres du design final (voir également la fig. 12) sont résumés ci-dessous: (en cm)

Cathode:

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

Electrode:

$$d_k = 0.7, \quad R_{e1} = 2.5, \quad d_e = 4, \quad R_{c2} = 1, \quad R_{c3} = 0.5, \quad R_{e2} = 4.5$$

Anode et tunnel d'électrons:

$$d_{an} = 2.5, \quad R_{c4} = 1, \quad \beta = 4^\circ, \quad R_b = 0.9, \quad d_b = 14, \quad R_{b2} = 0.7, \quad d_{b2} = 16.5$$

Caractéristiques du faisceau en fonction du courant I:

I	$\frac{\beta_{\perp 0}}{\beta_{\parallel 0}}$	$\beta_{\perp 0}$	$\beta_{\parallel 0}$
5	$1.69 \pm 5.1\%$	$0.432 \pm 1.2\%$	$0.255 \pm 3.7\%$
10	$1.50 \pm 4.9\%$	$0.417 \pm 1.4\%$	$0.279 \pm 3.3\%$

La fig.9 montre que les caractéristiques principales du faisceau dépendent fortement du rayon intérieur de l'électrode de contrôle. Cependant les tolérances d'usinage ne posent pas de problèmes.

Les fichiers ayant servi au calcul du canon sont listés à l'appendice D. Ils pourront être utilisés pour le calcul détaillé des caractéristiques.

4.2 Andromeda

Andromeda est un système de 3 bobines supraconductrices dont les courants ne peuvent être variés indépendamment. Développé au SIN, il a été transféré au CRPP en 1987.

D'après la géométrie des bobines principales et du cryostat, on ne peut placer la cathode à moins de 58.5 cm de la zone d'interaction ($z_i = 0$). Pour 1.78 Teslas en $z = 0$, on a 0.08497 Teslas en $z_k' = -58.5$ d'où un facteur de compression "naturel" $\alpha_c = 20$, ce qui est trop élevé. Pour obtenir $\alpha_c = 15$, il faut donc placer 2 bobines (non antagonistes) autour du canon. Le profil axial de B_z et les lignes de contour de $|B|$ sont montrées à la fig.10 ($\alpha_c = 15$).

Le résumé des runs du code Herrmannsfeldt se trouve à l'app. C. A cause du profil différent de B dans la région du canon, la forme de l'électrode de contrôle a dû être modifiée par rapport au cas précédent (sect. 4.1). Le rapport $\beta_{\perp 0}/\beta_{\parallel 0}$ en $z = 0$ dépend naturellement de la tension d'électrode V_e . Pour $V_e = 29$ kV on a $\beta_{\perp 0}/\beta_{\parallel 0} = 1.5$.

Les trajectoires électroniques obtenues sont dessinées à la fig. 11. Il a été tenu compte du profil exact du résonateur. On constate que certains électrons passent très près du col de la cavité (0.1 mm). lors du design final, il faudra voir avec le fabricant quelles sont les tolérances d'alignement du canon qu'il peut garantir. Pour plus de marge, on peut diminuer le rayon R_k de la cathode. Si l'efficacité baisse trop, on peut également travailler sur un autre mode.

Dû vraisemblablement au profil "plus plat" de B , le faisceau d'électrons est plus laminaire que dans le cas précédent.

Après le résonateur, le guide d'onde s'évase progressivement. Sous la bobine n° 5 (fig.10) le rayon utile n'est que de 3 cm. On constate que les électrons (non perturbés par l'effet gyrotron) frappent les parois du guide autour de $z = 90$ cm. La surface d'impact est de 136 cm² environ, ce qui nous donne 5.9 kW/cm² pour un faisceau de 800 kW. Une impulsion de 10 ms déposerait 59 Joules/cm² et 8 kJ au total. Comme cet apport de chaleur a lieu à l'intérieur même d'Andromeda, il sera difficile à évacuer. La sortie d'Andromeda est en $z = 108$ cm. Pour cette raison l'emploi d'Andromeda est déconseillé, à moins que l'on se satisfasse d'impulsions plus courtes.

Appendice A

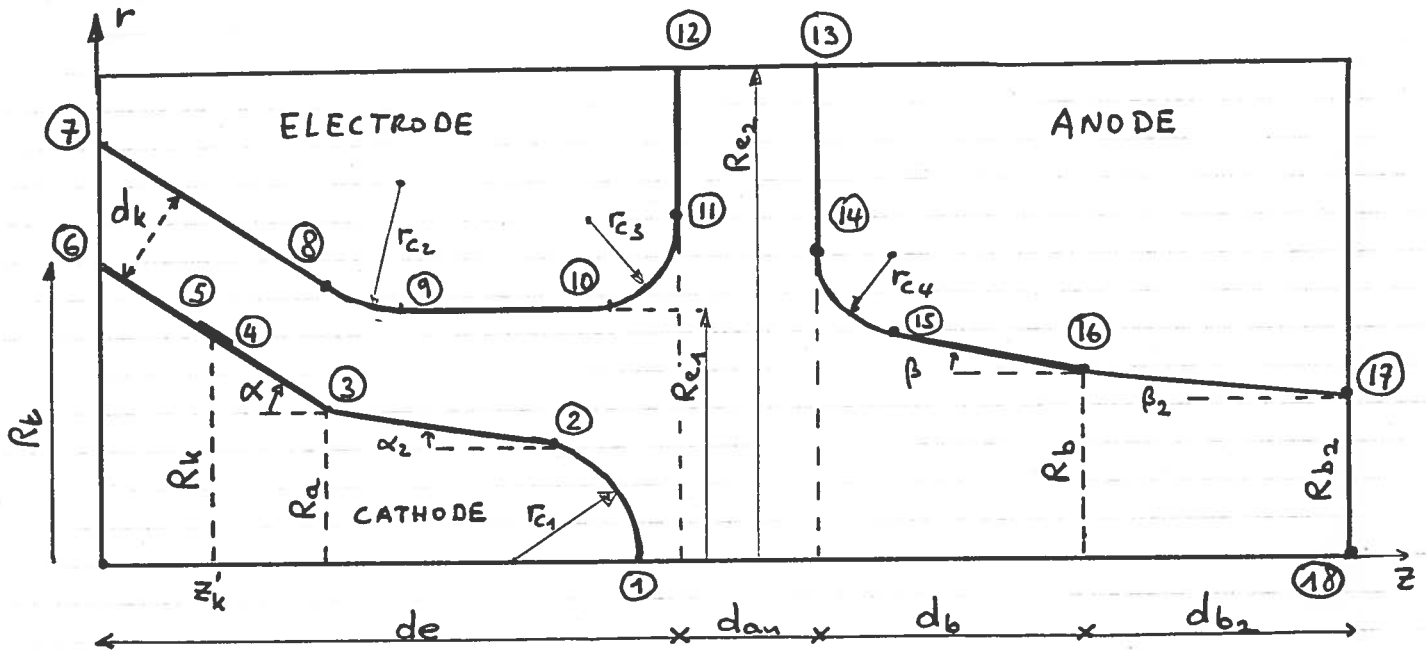
Définition des paramètres du canon à électrons

Fig. 12

R_k	Rayon moyen de la partie émettrice
α	Angle " " " "
l_k	Longueur " " " " (4) - (5)
R_t	Rayon du support de la cathode
R_a	Rayon où l'angle de la cathode change (3)
α_2	Angle de la partie protubérante
r_{c1}	Rayon de courbure de l'extrémité de la cathode
d_k	Distance cathode - électrode de contrôle
R_{e1}	Rayon intérieur de l' " " "
r_{c2}, r_{c3}	Rayons de courbure " " " "
d_e	Longueur de " " " "
R_{e2}	Rayon extérieur " " " "
d_{an}	Distance électrode - anode

r_{c4}	Rayon de courbure de l'anode	(14) - (15)
β	Angle d'entrée du beam duct	
R_b	rayon intérieur " " "	à la distance d_b
d_b	1 ^{ère} section	
R_{b2}	} idem	2 ^{ème} section
d_{b2}		

Position du canon par rapport aux bobines donnée par z_k .

Soit en tout 21 paramètres.

Un programme a été écrit (DGUN) pour calculer les coordonnées des points (1) à (18) caractérisant le canon.

Il est basé sur les relations géométriques suivantes:

$$\text{Point (6)} : \begin{cases} z_6 = 0 \\ R_6 = 0 \end{cases}$$

$$\text{Position cathode} : z_k = \frac{R_t - R_k}{\text{tg } \alpha}$$

$$\text{Point (5)} : \begin{cases} z_5 = z_k - \frac{l_k}{2} \cos \alpha \\ R_5 = R_k + \frac{l_k}{2} \sin \alpha \end{cases}$$

$$\text{Point (4)} : \begin{cases} z_4 = z_k + \frac{l_k}{2} \cos \alpha \\ R_4 = R_k - \frac{l_k}{2} \sin \alpha \end{cases}$$

$$\text{Point (3)} : \begin{cases} z_3 = \frac{R_t - R_a}{\text{tg } \alpha} \\ R_3 = R_a \end{cases}$$

$$\text{Point } \textcircled{2} : \begin{cases} R_2 = r_{c1} \cos \alpha_2 \\ z_2 = z_3 + \frac{R_2 - R_3}{\tan \alpha_2} \end{cases}$$

$$\begin{array}{l} \text{Centre de l'arc } \textcircled{1} - \textcircled{2} : \\ \text{Angle } \frac{\pi}{2} - \alpha_2 \end{array} \begin{cases} R_{ce1} = 0 \\ z_{ce1} = z_2 - r_{c1} \sin \alpha_2 \end{cases}$$

$$\text{Point } \textcircled{1} : \begin{cases} R_1 = 0 \\ z_1 = z_{ce1} + r_{c1} \end{cases}$$

$$\text{Point } \textcircled{7} : \begin{cases} z_7 = 0 \\ R_7 = R_t + \frac{dk}{\cos \alpha} \end{cases}$$

$$\begin{array}{l} \text{Centre de l'arc } \textcircled{8} - \textcircled{9} : \\ \text{Angle } \frac{\pi}{2} - \alpha \end{array} \begin{cases} R_{ce2} = R_{e1} + r_{c2} \\ z_{ce2} = z_9 \end{cases}$$

$$\text{Point } \textcircled{8} : \begin{cases} R_8 = R_{ce2} - r_{c2} \cos \alpha \\ z_8 = \frac{R_7 - R_8}{\tan \alpha} \end{cases}$$

$$\text{Point } \textcircled{9} : \begin{cases} z_9 = z_8 + r_{c2} \sin \alpha \\ R_9 = R_{e1} \end{cases}$$

$$\text{Point } \textcircled{10} : \begin{cases} z_{10} = d_e - r_{c3} \\ R_{10} = R_{e1} \end{cases}$$

$$\begin{array}{l} \text{Centre de l'arc } \textcircled{10} - \textcircled{11} : \\ \text{Angle } : \frac{\pi}{2} \end{array} \begin{cases} R_{ce3} = R_{e1} + r_{c3} \\ z_{ce3} = d_e - r_{c3} \end{cases}$$

$$\text{Point } \textcircled{11} : \begin{cases} z_{11} = d_e \\ R_{11} = R_{e1} + r_{c3} \end{cases}$$

$$\text{Point } (12) : \begin{cases} z_{12} = d_e \\ R_{12} = R_{e2} \end{cases}$$

$$\text{Point } (13) : \begin{cases} z_{13} = d_e + d_{a1} \\ R_{13} = R_{e2} \end{cases}$$

$$\text{Point } (16) : \begin{cases} z_{16} = d_e + d_{a1} + d_b \\ R_{16} = R_b \end{cases}$$

$$\text{Point } (15) : \begin{cases} z_{15} = z_{13} + r_{c4} - r_{c4} \sin \beta \\ R_{15} = R_b + (z_{16} - z_{15}) \tan \beta \end{cases}$$

$$\begin{aligned} \text{Centre de l'arc } (14) - (15) : & \begin{cases} z_{ce4} = z_{13} + r_{c4} \\ R_{ce4} = R_{15} + r_{c4} \cos \beta \end{cases} \\ \text{Angle : } & \frac{\pi}{2} - \beta \end{aligned}$$

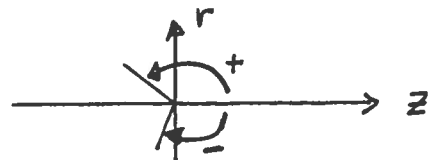
$$\text{Point } (14) : \begin{cases} R_{14} = R_{ce4} \\ z_{14} = z_{13} \end{cases}$$

$$\text{Point } (17) : \begin{cases} R_{17} = R_{b2} \\ z_{17} = z_{16} + d_{b2} \end{cases}$$

$$\text{Point } (18) : \begin{cases} R_{18} = 0 \\ z_{18} = z_{17} \end{cases}$$

A partir des coordonnées des points (1) à (18) DQUN calcule la longueur et l'orientation des segments nécessaires au fichier de données du progr. BONNDY.

Convention pour les angles :



DGON calcule encore certains paramètres d'entrée du code Hermannsfeldt à partir de :

ZMESH pas du champ magnétique (en cm)
 ZPI Z initial du champ magnétique (en cm)
 ZPK Z'_k : position de la cathode par rapport au référentiel du champ B
 IAMP I courant en ampères (REAL)

Paramètres d'entrées du code Hermannsfeldt

Namelist INPUT ϕ

RLIM	integer	nb de points en R	} carte du champ B	(max 100)
ZLIM	integer	" " " " Z		(max 3200)
POTN	integer	nb de potentiels		(max 6)
INTPA	logical	.TRUE. si le champ B est donné par l'intermédiaire du potentiel vecteur		

Namelist INPUT 1

POT (1)	= ϕ .	Potentiel cathode émissive
(2)	= 80000.	Anode
(3)	= ϕ .	grid (non utilisé)
(4)	= ϕ .	Cathode non émissive
(5)	= ϕ .	non utilisé
(6)	= V_e	Electrode

(Potentiel ϕ \rightarrow condition de Neumann)

NameList INPUT1 (suite)

MI = 3 Option dessin

LSPOT = 0 Impression des potentiels itérés.

NameList INPUTB

RR ϕ = ϕ .

ZZ ϕ . = nb de pas de la carte de champ B avant le début du chemin du canon

ZORG abscisse en cm du début du chemin du canon dans le référentiel du champ B.

ZLENGT

Forme du canon à électrons (input to BOUNDY)

1^{ère} ligne 000

2^è ligne dimension du chemin en cm selon R ,
 " " " " Z ,
 pas du champ B en cm ,
 coordonnées du début de la cathode (R₁, Z₁)
 n° du potentiel de la cathode (=4)

3^è ligne et suivantes : description de la forme des électrodes en une suite de segments et d'arcs de cercles selon le format suivant

Arc :

A , n° du potentiel , angle en degrés , position du centre (cm)

Segment:

L , n° du potentiel , longueur , angle en degrés

E = fin

Namedlist INPUT4

MAXRAY nb de trajectoires (max 61)
 NMAG = ϕ

Namedlist INPUT5

RC, ZC Position en mesh unit de la cathode virtuelle
 (Le programme n'est pas assez intelligent pour trouver
 la position du début des trajectoires, à partir
 de la position de la cathode.)

UNIT Pas du champ B en mètres

NS nb d'itérations

ZEND = ZLIM (c.f. INPUT ϕ)

ZMAG = ZLIM + G

DENS densité de courant de la cathode émissive
 en A/cm²

SX, SY Taille en cm du dessin

I_{ZS} nb d'équipotentiels dessinées = 79 si V = 80 kV.

Continuation d'une section à la suivante :

ISTART = 3

SKAL = (maille précédente) / (nouvelle maille)

ZO = début de la section précédente en mailles
 nouvelles.

(Voir fichiers GUN45A2, GUN45A3)

APPENDICE B

RUN	α_c	α	d_k [cm]	R_{en} [cm]	V_c [kV]	$\frac{V_{\perp}}{V_{ }}$	Remarques
ϕ						0.18	Suite à un bug de EGUN la face interne de l'électrode de contrôle était traitée avec la condition de Neumann.
1	10	30°	1.2	2.5	30	0.407	
3	10	30°	0.8	2.0	30	0.368 ± 2.1%	$V_{\perp}/V_{ }$ calculé à $Z = -9.3$ cm
4	10	30°	0.8	2.0	30	0.552 ± 1.2%	$V_{\perp}/V_{ }$ " " à $Z = 10$ cm (Zone d'interaction)
5	10	30°	0.4	2.0	30		BONNDY se plante sur CRAY, mais pas sur CYBER!
5a					30		EGUN se plante (modification malheureuse de la "cathode virtuelle")
5b					20	0.649 ± 2.6%	
5c					30	(2.47 ± 21%)	Des e^- interceptent l'électrode.
5d					25	1.028 ± 5.0%	e^- passent à 0.5 mm de l'électrode
6	10	30°	0.5	2.0	25	0.661 ± 4.0%	
6b	10				30	0.816 ± 3.1%	

RUN	α_c	α	d_k [cm]	R_{e1} [cm]	V_e [kV]	$\frac{V_L}{V_{II}}$	Remarques
7	10	35°	0.5	2.0	30	0.867 ± 5.7%	
8	10	35°	0.5	2.0	30	0.736 ± 5.2%	diminué de à 3 cm (avant 4.5)
9	10	35°	0.5	2.0	30	0.668 ± 7.2%	diminué de à 2.5 cm
10	20	35°	0.5	3.3	30		Effet miroir
11	20				20	3.36 ± 160%	
12	20				15	0.767 ± 15.7%	} faisceau non laminaire
13	20				17.5	1.147 ± 22%	
14	15	35°	0.5	3.0	20	0.587 ± 11.8%	
15	15	35°	0.5	3.0	25	0.92 ± 16%	
16	15	35°	0.5	3.0	30	1.91 ± 43%	faisceau non laminaire
17	15	35°	0.6	2.9	30	1.51 ± 29.5%	" "
18	15	35°	0.6	2.8	30	2.32 ± 127%	Effet miroir
19	15	35°	0.7	2.7	30	2.58 ± 19%	

RUN	α_c	α	d_k [cm]	R_{en} [cm]	V_e [kV]	$\frac{V_I}{V_{II}}$	Remarques
20	15	35°	0.8	2.5	30	1.126 ± 4.7%	
21	15	35°	0.75	2.5	30	1.273 ± 1.2%	
22	15	35°	0.70	2.4	30		BOUNDY se plante obstinément
23	15	35°	0.70	2.45	30	1.484 ± 4.3%	
24	15	35°	0.70	2.35	30	1.250 ± 3.2%	
25	15	35°	0.70	2.5	30	1.695 ± 5.1%	OK I = 5A
26	15	35°	0.7	2.5	30	1.497 ± 5.0%	OK I = 10A

Appendice C

RUN	d_k [cm]	Re_1 [cm]	V_e [kV]	I [A]	$\frac{V_I}{V_{II}}$	Remarques
27	0.7	2.5	30	5	$1.23 \pm 12\%$	Des e^- passent trop près (0.2mm) de l'électrode de contrôle.
28	0.7	2.6	30	5	$1.71 \pm 8\%$	e^- passant à 0.5 mm
29	0.7	2.7	30	10		Chyt de clames sur CRAY, job killed after 34 hours (!) in input queue.
30	0.7	2.7	30	10	$1.89 \pm 8.8\%$	ok, lumineuse
31			28	10	$1.28 \pm 1.4\%$	
32			29	10		job crushed (EGON purgé !)
33			29	10	$1.445 \pm 5.0\%$	ok.

Compression: $\alpha_c = 15^\circ$; angle cathode: 35° . (Autre paramètres: V.P. 11)

APPENDICE DLISTE DES FICHIERS

Fichiers de commandes sur CYBER UN=AP1

GUNTOC Création des programmes exécutables sur CRAY:
EGUN, BOUNDY, MAGNET.

JMAG45 Calcule la carte de champ magnétique (pot. vecteur) à partir
du courant dans les bobines.

JMAG45A Idem, pour Andromeda, 1ère section..

JMA45A2 Andromeda, 2ème section.

JMA45A3 Andromeda, 3ème section.

GUN45 Géométrie du canon, nouvelles bobines

PLOTG45 Dessin du canon sur Versatec (Cyber)

GUN45A Géométrie du canon, Andromeda, 1ère section

GUN45A2 Géométrie du canon, Andromeda, 2ème section

GUN45A3 Géométrie du canon, Andromeda, 3ème section

RMAG45 Dessine les lignes de contour du champ |B|

RMAG45A Idem, pour Andromeda

```

JOBST, STLYY.                                FILE: GUNTOC
USER, AP1,
JOB, JN=EGUNTOC, MFL=750000, T=20.
ACCOUNT, AC=20007, APW=SANDRA, US=AP1, UPW=, NUPW=.
*
***** FILE GUNTOC *****
*
* PRODUCE AN EXECUTABLE VERSION ON THE CRAY OF:
*
* EGUN      HERRMANNSFELDT CODE
*
* MAGNET    MAGNETIC FIELD COMPUTATION (VECTOR POTENTIAL)
*
* BOUNDY    TRANSLATE GUN GEOMETRY TO BOUNDARY SEGMENTS
*
*****
ACCESS, DN=MAGNET, NA, UQ.
DELETE, DN=MAGNET, NA.
RELEASE, DN=MAGNET.
FETCH, DN=COMPILE, TEXT='GET, OLDPL=MAGNTL2/UN=AP1. GET, MAGCORN. '^
                        'UPDATE, I=MAGCORN, F, L=0. CTASK. '.
CFT, I=COMPILE, B=BIN, L=0.
LDR, DN=BIN, NX, AB=MAGNET.
SAVE, DN=MAGNET, RT=100, PAM=R: E.
RELEASE, DN=COMPILE: BIN: MAGNET.
*****
ACCESS, DN=BOUNDY, NA, UQ.
DELETE, DN=BOUNDY, NA.
RELEASE, DN=BOUNDY.
FETCH, DN=COMPILE, TEXT='GET, OLDPL=GUNNWPL/UN=AP1. GET, BOUNDYC. '^
                        'UPDATE, I=BOUNDYC, Q, L=0. CTASK. '.
CFT, I=COMPILE, B=BIN, L=0.
LDR, DN=BIN, NX, AB=BOUNDY.
SAVE, DN=BOUNDY, RT=100, PAM=R: E.
RELEASE, DN=COMPILE: BIN: BOUNDY.
*****
ACCESS, DN=EGUN, NA, UQ.
DELETE, DN=EGUN, NA.
RELEASE, DN=EGUN.
FETCH, DN=COMPILE, TEXT='GET, OLDPL=GUNNWPL/UN=AP1. GET, GUNCOR/UN=AP1. '^
                        'UPDATE, I=GUNCOR, Q, L=0. CTASK. '.
CFT, I=COMPILE, B=BIN, L=0.
LDR, DN=BIN, NX, AB=EGUN.
SAVE, DN=EGUN, RT=100, PAM=R: E.
RELEASE, DN=COMPILE: BIN: EGUN.
*****
AUDIT, LO=L: P: A.
*****
(EOR)
(EOF)

```

```

JOBST,STLYY.      FILE JMAG45: CREE LE FICHER DU CHAMP B POUR EGUN
USER, AP1, .
JOB, JN=MAG45, 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, DWN=TIM.
ACCESS, DN=VECTORA, NA, UQ.
DELETE, DN=VECTORA, NA.
RELEASE, DN=VECTORA.
MAGNET.
SAVE, DN=VECTORA, RT=100.
EXIT.
/EOF
$SELECT
  NCOAX=+1,
  NFORCE=0,
  NPRINC=0,
$END
$DATA2
  NBF=1,
  RPI=0.00000,
  DRP=0.0005,
  ZPI=-.400000,
  DZP=0.0005,
  NPTR= 100,
  NPTZ= 1600,
$END
$COILS
  NC=4,
  UN=3,
$END
$TRAJ
  NT=0,
  R1=0.050,
  IMAX=500,
  ZO=-0.600,
  Z11=0.40,
$END
$DATA
  Z1(1)= 0.000, Z2(1)= 0.060, A1(1)=0.120, A2(1)=0.200, AT(1)= 321190.,
  Z1(2)= 0.160, Z2(2)= 0.220, A1(2)=0.120, A2(2)=0.200, AT(2)= 320210.,
  Z1(3)=-0.300, Z2(3)=-0.250, A1(3)=0.070, A2(3)=0.140, AT(3)= -7937.,
  Z1(4)=-0.245, Z2(4)=-0.195, A1(4)=0.070, A2(4)=0.140, AT(4)= -8063.,
  KSWI=2,
$END
$LINES
$END
(EOR)
(EOF)

```

JOBST,STLYY. FILE JMA45A: CREE LE FICHER DU CHAMP B POUR EGUN
 USER,AP1, ANDROMADA 45 GHZ
 JOB, JN=MAG45A, MFL=400000, T=600.

.....
 SAVE, DN=VECTORA, PDN=AND45S1, RT=100.
 GET, NEXT=GUN45AC/UN=AP1. GO, NEXT. CTASK. '.

```
$DATA2
NBF=1,
RPI=0.00000,
DRP=0.0005,
ZPI=-.700000,
DZP=0.0005,
NPTR= 100,
NPTZ= 1600,
```

```
.....
$COILS
NC=5,
UN=3,
$END
$TRAJ
NT=0,
R1=0.050,
IMAX=500,
ZO=-0.600,
Z11=0.40,
```

```
$END
$DATA
Z1(1)=-.6450, Z2(1)=-.5850, A1(1)=0.0700, A2(1)=0.140, AT(1)= 3250.,
Z1(2)=-.5800, Z2(2)=-.5200, A1(2)=0.0700, A2(2)=0.140, AT(2)= 3250.,
Z1(3)=-.1920, Z2(3)=-.0390, A1(3)=0.1500, A2(3)=0.192, AT(3)=404700.,
Z1(4)=0.0390, Z2(4)=0.1920, A1(4)=0.1500, A2(4)=0.192, AT(4)=404700.,
Z1(5)=0.2450, Z2(5)=0.7350, A1(5)=0.0700, A2(5)=0.091, AT(5)=691400.,
KSWI=2,
```

```
$END
$LINES
$END
(EOR)
(EOF)
```

JOBST,STLYY. FILE JMA45A2: CREE LE FICHER DU CHAMP B POUR EGUN
 USER,AP1, ANDROMADA 45 GHZ (2EME SECTION)
 JOB, JN=MAG45A, MFL=400000, T=600.

```
.....
$DATA2
NBF=1,
RPI=0.00000,
DRP=0.0005,
ZPI=-.100000,
DZP=0.0005,
NPTR= 50,
NPTZ= 2200,
$END
```

```
.....
$END
(EOR)
(EOF)
```

JOBST,STLYY. FILE JMA45A3: CREE LE FICHER DU CHAMP B POUR EGUN
 USER,AP1, ANDROMADA 45 GHZ (3EME SECTION)
 JOB, JN=MAG45A, MFL=400000, T=600.

```
.....
$DATA2
NBF=1,
RPI=0.00000,
DRP=0.0005,
ZPI=-.700000,
DZP=0.0005,
NPTR= 100,
NPTZ= 1800,
$END
```

```
.....
$END
(EOR)
(EOF)
```

```

JOBST,STLYY.                FILE GUN45
USER,AP1,.
JOB, JN=GUN45, MFL=900000, T=400.
ACCOUNT, AC=20007, APW=SANDRA, US=AP1, UPW=, NUPW=.
*JOB, JN=GUN45, MFL=900000, T=600.      (NORMAL EXECUTION)
*JOB, JN=GUN45, MFL=100000, T=10.      (TEST BOUNDY)
*
* ELECTRON GUN DESIGN : COMPUTATION ON CRAY, PLOT ON CYBER
*
ACCESS, DN=BOUNDY, OWN=TIM.
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.
ASSIGN, DN=ZOUT1, A=FT09.
ACCESS, DN=EGUN, OWN=TIM.
EGUN.
*
* 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.
/EOF
GUN45(1)  VE = 30.0KV  I = 10. A  23/11/87.  CRPP-EPFL  RUN 26
$INPUTO
  RLIM= 90, ZLIM= 740, POTN=6, INTPA=.TRUE.,
$END
$INPUT1
  POT=0., 80000., 0., 0., 0., 30000., MI=3, TYME=100.,
  LSTPOT=0,
$END
$INPUTB
  RRO=0., ZZO=-280., ZORG=-26.00000, ZLENGT=0.0,
$END

```

```

000
4.5, 37., 0.05, 0., 3.398100 , 4, 0/
'A', 4, 55., 0., 2.398100/
'L', 4, 2.257400, 145./
'L', 1, 0.3000 , 145./
'L', 4, 1.0710 , 145./
'L', 0, 0.854542, 90./
'L', 6, 1.870180, -35./
'A', 6, 35., 3.501, 2.1055/
'L', 6, 1.395457, 0./
'A', 6, 90., 3.0010, 3.4990/
'L', 6, 1.49900, 90./
'L', 0, 2.5000, 0./
'L', 2, 1.688600, -90./
'A', 2, 86., 2.811000, 7.501/
'L', 2, 13.10000, -4./
'L', 2, 16.51000, -0.6944/
'L', 0, 0.7000, -90./
'E'/
888
$INPUT4
MAXRAY=25, NMAG=0,
$END
$INPUT5
RC=44.0, ZC=22.5, NS=50, UNIT=.0005, ZEND=740,
ZMAG=746, SPC=1., AV=10, AVR=10., STEP=.2, ERROR=10.,
DENS=2.41000, MAGORD=4, RMAG=36.0, SX=150., SY=28.,
CZ=400., CR=147., CM=243000.,
IZS=79,
$END
/EOF
(EOF)

```

```

PLOTG45.          A.PERRENOUD CRPP      PLOT 45 GHZ GYROTRON GUN
USER, AP1, EPFL.
CHARGE, *.
SETTL, *.
ATTACH, PLTGUN.
QGET, UJN=TAPE1.
QGET, UJN=TAPE12.
PLTGUN.
RASTER.
*      PAPIER NORMAL
*ROUTE, GLDX.
*      PAPIER NORMAL + ENVOI PAR LA POSTE
*ROUTE, GLDX, FC=PC.
*      PAPIER CALQUE
ROUTE, GLDX, FC=CA.
(EOF)

```

```

JOBST,STLYY.                GUN45A   ANDROMEDA 45 GHZ
USER,AP1,.
JOB, JN=GUN45A, MFL=750000, T=200.
ACCOUNT, AC=20007, APW=SANDRA, US=AP1, UPW=, NUPW=.
*JOB, JN=GUN45, MFL=900000, T=600.      (NORMAL EXECUTION)
*JOB, JN=GUN45, MFL=100000, T=10.      (TEST BOUNDY)
*
* ELECTRON GUN DESIGN : COMPUTATION ON CRAY, PLOT ON CYBER
*
ACCESS, DN=BOUNDY, OWN=TIM.
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=VECTORB.
ASSIGN, DN=ZOUT1, A=FT09.
ACCESS, DN=EGUN, OWN=AP1.
EGUN.
*
* SAVE PLOTGUN AND DATPLT ON CYBER (INPUT FILES OF PLTGUN)
*
DISPOSE, DN=PLDTGUN, 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, PLDTG45/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.
/EOF
GUN45A VE = 28. KV I = 10. A 03/12/87. CRPP-EPFL RUN 31 ANDROMEDA
$INPUT0
RLIM= 90, ZLIM= 1190, POTN=6, INTPA=. TRUE. ,
$END
$INPUT1
POT=0. , 80000. , 0. , 0. , 0. , 28000. , MI=3, TYME=100. ,
LSTPOT=0,
$END
$INPUTB
RRC=0. , ZZO=-210. , ZDRG=-59.50000, ZLENGT=0.0,
$END

```

FILE GUN45A, SUITE

```

000
4.5, 59.5, 0.05, 0., 3.398100 , 4, 0/
'A', 4, 55., 0., 2.398100/
'L', 4, 2.257400, 145./
'L', 1, 0.3000 , 145./
'L', 4, 1.0710 , 145./
'L', 0, 0.854542, 90./
'L', 6, 1.521496, -35./
'A', 6, 35., 3.701, 1.8199/
'L', 6, 1.681087, 0./
'A', 6, 90., 3.2010, 3.4990/
'L', 6, 1.29900, 90./
'L', 0, 2.5000, 0./
'L', 2, 1.033700, -90./
'A', 2, 87.2, 3.466 , 7.501/
'L', 2, 32.08610, -2.8/
'L', 2, 20.01000, -0.5729/
'L', 0, 0.7000, -90./
'E'
888
$INPUT4
MAXRAY=25, NMAG=0,
$END
$INPUT5
RC=44.0, ZC=22.5, NS=50, UNIT=.0005, ZEND=1190,
ZMAG=1196, SPC=1., AV=10, AVR=10., STEP=.2, ERROR=10.,
DENS=2.41000, MAGORD=4, RMAG=36.0, SX=100., SY=28.,
CZ=400., CR=147., CM=243000.,
IZS=79,
$END
/EOF
(EOF)

```


JOBST,STLYY. GUN45A2 ANDROMEDA 45 GHZ
 USER,AP1,
 JOB, JN=GUN45A2, MFL=750000, T=600.

.....
 ACCESS, DN=VECTORA, PDN=AND45S2.
 ASSIGN, DN=ZOUT1, A=FTO9.
 ACCESS, DN=EGUN, DWN=AP1.
 ACCESS, DN=OUTGUN1, PDN=OGYR45.
 REWIND, DN=TAPE6: OUTGUN1.
 COPYR, I=TAPE6, O=INSUGUN, NR.
 SKIPF, DN=INSUGUN.
 COPYR, I=OUTGUN1, O=INSUGUN, NR.
 REWIND, DN=INSUGUN.
 RELEASE, DN=OUTGUN1.
 EGUN.

*
 ACCESS, DN=OGYR452, NA, UQ.
 DELETE, DN=OGYR452, NA.
 RELEASE, DN=OGYR452.
 REWIND, DN=OUTGUN1.
 SAVE, DN=OUTGUN1, PDN=OGYR452.
 *

.....
 /EOF
 GUN45A2 VE = 29. KV I = 10.A 14/12/87. CRPP-EPFL RUN 33 ANDROMEDA
 \$INPUT0
 RLIM= 46, ZLIM= 1600, POTN=6, INTPA=.TRUE.,
 \$END
 \$INPUT1
 POT=0., 80000., 0., 0., 0., 29000., MI=3, TYME=100.,
 LSTPOT=0,
 \$END
 \$INPUTB
 RRO=0., ZZ0=-200., ZORG=0., ZLENGT=0.0,
 \$END
 000
 2.3, 80.0, 0.05, 0., 0.04999, 0, 0/
 'L', 0, 0.04999, 180./
 'L', 0, 0.744, 90./
 'L', 2, 1.5, 0./
 'L', 2, 1.2, 10.9/
 'L', 2, 1.3, 0./
 'L', 2, 76.04, 0.7712/
 'L', 0, 2.0000, -90./
 'E'//
 888
 \$INPUT4
 MAXRAY=25, NMAG=0,
 \$END
 \$INPUT5
 ISTART=3, SKAL=1., ZO=-1190.,
 RC=44.0, ZC=22.5, NS=50, UNIT=.0005, ZEND=1600,
 ZMAG=1606, SPC=1., AV=10, AVR=10., STEP=.2, ERROR=10.,
 DENS=2.41000, MAGORD=4, RMAG=36.0, SX=100., SY=28.,
 CZ=400., CR=147., CM=243000.,
 IZS=79,
 \$END
 /EOF
 (EOF)

JOBST, STLYY. GUN45A3 ANDROMEDA 45 GHZ
 USER, AP1,
 JOB, JN=GUN45A3, MFL=750000, T=600.

ACCESS, DN=VECTORA, PDN=AND45S3.
 ASSIGN, DN=ZOUT1, A=FT09.
 ACCESS, DN=EGUN, OWN=AP1.
 ACCESS, DN=OUTGUN1, PDN=OGYR452.
 REWIND, DN=TAPE6: OUTGUN1.
 COPYR, I=TAPE6, O=INSUGUN, NR.
 SKIPF, DN=INSUGUN.
 COPYR, I=OUTGUN1, O=INSUGUN, NR.
 REWIND, DN=INSUGUN.
 RELEASE, DN=OUTGUN1.
 EGUN.

*
 ACCESS, DN=OGYR453, NA, UQ.
 DELETE, DN=OGYR453, NA.
 RELEASE, DN=OGYR453.
 REWIND, DN=OUTGUN1.
 SAVE, DN=OUTGUN1, PDN=OGYR453.
 *

.....
 /EOF
 GUN45A3 VE = 29. KV I = 10. A 14/12/87. CRPP-EPFL RUN 33 ANDROMEDA
 \$INPUT0
 RLIM= 90, ZLIM= 800, POTN=6, INTPA=. TRUE. ,
 \$END
 \$INPUT1
 POT=0. , 80000. , 0. , 0. , 0. , 29000. , MI=3, TYME=100. ,
 LSTPOT=0,
 \$END
 \$INPUTB
 RRO=0. , ZZ0=-200. , ZORG= 80. , ZLENGT=0. 0,
 \$END
 000
 4. 5, 40. 0, 0. 05, 0. , 0. 04999, 0, 0/
 'L', 0, 0. 04999 , 180. /
 'L', 0, 2. 0 , 90. /
 'L', 2, 40. 08 , 3. 57/
 'L', 2, 4. 5 , -90. /
 'E' /
 \$\$\$
 \$INPUT4
 MAXRAY=25, NMAG=0,
 \$END
 \$INPUT5
 ISTART=3, SKAL=1. , Z0=-1600. ,
 RC=44. 0, ZC=22. 5, NS=50, UNIT=. 0005, ZEND= 800,
 ZMAG= 806, SPC=1. , AV=10, AVR=10. , STEP=. 2, ERROR=10. ,
 DENS=2. 41000, MAGORD=4, RMAG=36. 0, SX= 50. , SY=28. ,
 CZ=400. , CR=147. , CM=243000. ,
 IZS=79,
 \$END
 /EOF
 (EOF)

```

MAGNET.                A. PERRENOUD CRPP          CONTOUR PLOT OF MAGNETIC FIELD
USER, AP1, .           FILE RMAG45
CHARGE, *.
SETTL, *.
PURGE, OM45/NA.
ATTACH, MA.
MA, INPUT, OUTPUT, OM45.
SAVE, OM45.
GET, PLTM45.
FTN5, I=PLTM45, L=0, ANSI=0.
REWIND, OM45.
LGO, OM45, OMAGN2.
RASTER.
ROUTE, GLDX, FC=PC.
GET, PLTM1.
FTN5, I=PLTM1, L=0, ANSI=0, B=PLT.
REWIND, OM45.
GET, CLEANUP.
CLEANUP.
REWIND, OM45.
PLT, OM45, OMAGN2.
RASTER.
ROUTE, GLDX, FC=PC.
(EOF)
CONTOUR PLOT OF STATIC MAGNETIC FIELD
45 GHZ GYROTRON MAGNET
$SELECT
NCOAX=1, NFORCE=1, NPRINC=1,
$END
$DATA2
NBF=1,
NPTR= 41, RPI=0., DRP=0.01,
NPTZ=121 , ZPI=-0.4, DZP=0.01,
$END
$COILS
NC=4, UN=3,
$END
$DATA
Z1(1)=0.0000, Z2(1)= .0600, A1(1)=0.1200, A2(1)=0.200, AT(1)=2.72E5,
Z1(2)=0.1600, Z2(2)= .2200, A1(2)=0.1200, A2(2)=0.200, AT(2)=2.72E5,
Z1(3)=-0.300, Z2(3)=-0.250, A1(3)=0.0700, A2(3)=0.140, AT(3)=10000.,
Z1(4)=-0.245, Z2(4)=-0.195, A1(4)=0.0700, A2(4)=0.140, AT(4)=10000.,
XWID(1)=0.0015, XHEI(1)=0.002,
XWID(2)=0.0015, XHEI(2)=0.002,
XWID(3)=0.005, XHEI(3)=0.005,
XWID(4)=0.005, XHEI(4)=0.005,
KSWI=5, KSWIC=0, KSWZ=0, UNIT=1.,
$END
$ADJUST
NP=4,
ZZ1(1)= 0.060, BZZ(1)=1.78,
ZZ1(2)= 0.160, BZZ(2)=1.78,
ZZ1(3)=-0.255, BZZ(3)=0.1115,
ZZ1(4)=-0.245, BZZ(4)=0.1265,
WEIGHT(1)=1., WEIGHT(2)=1.0, WEIGHT(3)=1., WEIGHT(4)=1.,
$END
(EOF)

```

```

RMAG45A.          A. PERRENOUD CRPP          CONTOUR PLOT OF MAGNETIC FIELD
USER, AP1, .      ANDROMEDA 45 GHZ
CHARGE, *.
SETTL, *.
PURGE, DM45A/NA.  FILE RMAG45A
ATTACH, MA.
MA, INPUT, OUTPUT, DM45A.
SAVE, DM45A.
GET, PLTM45.
FTN5, I=PLTM45, L=0, ANSI=0.
REWIND, DM45A.
LGO, DM45A, DMAGN2.
RASTER.
ROUTE, GLDX, FC=PC.
GET, PLTM1.
FTN5, I=PLTM1, L=0, ANSI=0, B=PLT.
REWIND, DM45A.
GET, CLEANUP.
CLEANUP.
REWIND, DM45A.
PLT, DM45A, DMAGN2.
RASTER.
ROUTE, GLDX, FC=PC.
(EOR)
CONTOUR PLOT OF STATIC MAGNETIC FIELD
45 GHZ ANDROMEDA GYROTRON MAGNET
$SELECT
  NCOAX=1, NFORCE=1, NPRINC=1,
$END
$DATA2
  NBF=1,
  NPTR= 41, RPI=0., DRP=0.01,
  NPTZ=181, ZPI=-0.7, DZP=0.01,
$END
$COILS
  NC=5, UN=3,
$END
$DATA
  Z1(1)=-.6450, Z2(1)=-.5850, A1(1)=0.0700, A2(1)=0.140, AT(1)=3250.,
  Z1(2)=-.5800, Z2(2)=-.5200, A1(2)=0.0700, A2(2)=0.140, AT(2)=3250.,
  Z1(3)=-.1920, Z2(3)=-.0390, A1(3)=0.1500, A2(3)=0.192, AT(3)=404700.,
  Z1(4)=0.0390, Z2(4)=0.1920, A1(4)=0.1500, A2(4)=0.192, AT(4)=404700.,
  Z1(5)=0.2450, Z2(5)=0.7350, A1(5)=0.0700, A2(5)=0.091, AT(5)=691400.,
  KSWI=0, KSWIC=0, KSWZ=0, UNIT=1.,
$END
$ADJUST
NP=4,
ZZ1(1)=-0.039, BZZ(1)=1.78,
ZZ1(2)=+0.039, BZZ(2)=1.78,
ZZ1(3)=-0.500, BZZ(3)=0.178,
ZZ1(4)=+0.490, BZZ(4)=1.000,
WEIGHT(1)=1., WEIGHT(2)=3.0, WEIGHT(3)=3.0, WEIGHT(4)=1.0,
$END
(EOR)
(EOF)

```

5. RESONATEUR

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 à la fig. 13. Après le col d'entrée en coupure, le résonateur s'évase progressivement. Le rayon d'entrée de la cavité est de 6.25 mm, très proche du rayon du faisceau, 5.65 mm.

Le profil du champ électrique TE_{021} selon z est également dessiné à la fig.13. Contrairement à l'hypothèse du modèle du chap.2 il est asymétrique. L'efficacité électronique pour $Q = 523$ sature à 48%, valeur qui concorde bien avec l'estimation (sect. 2.7).

La fig.14 montre que l'on atteint 300 kW avec un courant de 8.27 A, également en bon accord avec la théorie non-linéaire (sect 2.8).

Enfin, la fig.15 décrit le courant d'accrochage en fonction de B . Le minimum se situe environ à $I = 2A$, soit le triple, environ, de la valeur prédite par la théorie linéaire. Cette différence est inexplicquée. La fig.16 détaille le point de fonctionnement du gyrotron en fonction du courant du faisceau pour un champ $B = 1.744 T$.

Le fichier d'entrée qui à servi à ces calculs est listé ci-après.

file CR4502F / UN = PAM

```

ACCESS, DN=CAVFIL9.
CAVFIL9.
* COLD CAVITY AND NON SELF-CONSISTANT PARTICULE CALCULATION.
* THE SOURCE PROGRAM IS "ED16D2" ON CYBER AND THE CRAY VER-
* SION IS CAVFIL8.
* CCESS, DN=GKS, OWN=JULES.
* CCESS, DN=PLOTGKS.
* FT, I=PLOTGKS, B=BPLOT, L=0.
* CCESS, DN=CAVFIL8.
* FT, I=CAVFIL8, B=BIN, L=0, DN=Z.
* DR, DN=BIN:BPLOT, LIB=GKS.
*
* TO SAVE PLOT ON CYBER
*
* DISPOSE, DN=GKSM88, DC=ST, TEXT='CTASK.DEFINE, A=GKSM90.REWIND, *.COPY, GKSM88, A.'^
*'RETURN, A.', DEFER.
* TO SEE THE DRAWING : GET, PLOTMF/UN=CRPP
* ATTACH, GKSM90
* PLOTMF, 90, 4014 TO SEE IT ON THE SCREEN
* 8224, ... TO SEND IT ON PAPER
* TO SEND PLOT DIRECTLY ONTO PAPER
*
DISPOSE, DN=GKSM88, DC=ST, TEXT='CTASK.GET, GOPLLOT.REWIND, *.SKIPPI, GOPLLOT.'^
COPYBF, GKSM88, GOPLLOT.ROUTE, GOPLLOT, DC=IN.', DEFER.
RELEASE, DN=GKSM88.
EXIT.
DUMPJOB.
DEBUG, BLOCKS, MAXDIM=10:10.
FLODUMP.
*
* RBO : BEAM RADIUS AT THE CAVITY INPUT
* VIVZ : RATIO (V-IRANSVERSE/V-PERP)
* XIO : VALUE OF THE CURRENCY USED FOR THE CAVITY LOSSES CALCULATION
* NORBIT : # OF PARTICULES
* NEFEXT : # OF ELECTRIC FIELB VALUES USED IN THIS RUN , STARTING AT EO
* DELTAE : ELECTRIC FIELB INCREMENT
* NEBEXT : # OF MAGNETIC FIELB VALUES USED IN THIS RUN , STARTING AT BO
* IF XNEWBO=0 OR AT BOSTART IF XNEWBO=1
* DELTAB : MAGNETIC FIELB 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 WHICH 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 RESONANT FREQUENCY. (USED ONLY IF FIXFREQ=0)
* IFIXRO : = 1 : KEEP THE CAVITY INPUT RADIUS GIVEN IN THE NAMELIST
*           = 0 : THE RADIUS OF THE NREQ-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
*       = 1 : THE OUTPUT ANGLE OF THE CAVITY IS "ROUNDED"
*       BY A CUBIC FUNCTION

```

/EOF

\$PHYDAT

```

MTEMN = 0,
NTEMN = 2,
NSHARM = 1,
BO = 1.86400,
EO = 1.0E+03,

```

```

RBO = 0.560E-02,
VOLTAG = 80.E+03,
VTVZ = 1.50,
XIO = 1.00,
NORBIT = 64,

```

\$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=5.00E5,
NBFEXT=10, DELTAB=0.0200000,
XNEWBO=1.0, BOSTART=1.84400,
DRAWCAV=1.0, DRAWETA=2.0,
FIXFREQ=1.0,
RRDWRK=0.283486489962814E+12, RIDWRK=0.270997762512165E+09,
ONLYCAV=0.0,
DRAWDPT=1.0, CURRMAX=20.0,
IWRITE=2,
ICONT=0, NCONT=12, NDASH=9,
CVAL(1)=0.05, CVAL(2)=0.6,
DRAWIS=1.0,
IFIXRO=1, NLU=0,

```

\$END

\$DATA1 NSEG=5 , NZ=2048, MODE=1, NFREQ=3, FREQ=45.00E09,

\$END

\$SCALIN ISCALIN=0, FREQNEW=8.000E9, MNEW=0, NNEW=2,

\$END

\$DATA2

```

Z(1)=0.0000 , ANGL(1)=5.40, RO=0.00625,
Z(2)=0.0116, ANGL(2)=0.30,
Z(3)=0.0324, ANGL(3)=0.00,
Z(4)=0.0500, ANGL(4)=10.9,
Z(5)=0.0620, ANGL(5)=0.0,
Z(6)=0.075,

```

\$END

\$ZROTL DXSTEP=1.0E3, TOLFIN=1.0E-4,

\$END

/EOF

\$DATA2 RRDWRK=0.282595215542617E+12 , RIDWRK=0.618986183026676E+09,

```

Z(1)=0.0000 , ANGL(1)=5.82000 , RO=0.0061850,
Z(2)=0.011600, ANGL(2)=0.276000 ,
Z(3)=0.048000, ANGL(3)=11.323,
Z(4)=0.056900, ANGL(4)=0.0000,
Z(5)=0.070000,

```

\$END

6. FENETRE

6.1 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. Nous avons pris comme exemple de l'alumine 99.5%, qui a la constante diélectrique suivante, à 45 GHz:

$$\epsilon_r = 9.604, \quad \text{tg } \delta = \epsilon_i / \epsilon_r = 3.7 \cdot 10^{-4}$$

La longueur d'onde dans l'alumine vaut $\lambda_g = \lambda_{\text{vide}} / \sqrt{\epsilon_r} = 2.15 \text{ mm}$

La fig.17 montre T, R et A en fonction de la fréquence pour une épaisseur de $4.34 \text{ mm} \approx 2\lambda_g$ et un diamètre de 4 cm. (progr. WINDOW.)
Mode TE₀₂.

6.2 Contraintes thermiques

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

En mode pulsé (10 ms), on constate que les contraintes thermiques sont négligeables (fig.18a). Ce ne serait plus le cas en fonctionnement continu (fig.18b). (Progr. WINDOW2.)

Pour un mode propre, la valeur des contraintes ne dépend pas du rayon de la fenêtre (ici TE₀₂).

```
FILE: WIN45GZ INPUT FILE FOR PROGRAM WINDOW2
45 GHZ WINDOW STRESS CALCULATION
```

```
$WHAT
  IMAT=1,
$END
$DATAS
  PULSE=300.E+03, CW= 10.E+03, DELTAT=0.01,
  A=0.020, H=0.00434, F=45.0E+09,
  EPSR=9.604, TGDEL=3.7E-04,
  EXPAN=6.5E-06, CP=880., YOUNG=372E+03, POISS=0.22, RHO=3890.,
  TEMP(1)= 20., XKT(1)=35.6,
  TEMP(2)=100., XKT(2)=25.9,
  TEMP(3)=200., XKT(3)=23.0,
  TEMP(5)=300., XKT(4)=18.4,
  TEMP(5)=400., XKT(5)=12.1,
  TEMP(6)=500., XKT(6)=11.2,
  TEMP(7)=800., XKT(7)= 6.3,
  NKT=7,
  NSTEP=200,
  TO=20.0,
  XMN=7.01559,
  MODE='TE 02
$END
```

7. CONCLUSIONS

Dans cette étude, nous avons quelque peu débroussaillé le terrain. Il reste néanmoins passablement à faire jusqu'à ce que tous les points de détails soient réglés. Cependant, avant d'aller plus loin, il faut prendre une décision en ce qui concerne les bobines. Le choix d'Andromeda pose bien des problèmes. Andromeda comporte 3 bobines dont une n'est d'aucune utilité pour nous. D'une part le collecteur est situé à l'intérieur et d'autre part la distance du canon à la zone d'interaction est au moins 20 cm plus longue que dans le cas de nouvelles bobines, ce qui pourrait avoir pour corollaire des phénomènes d'instabilité.

Pour cette raison, et aussi par manque de temps, les problèmes posés par la ligne de transmission et les diagnostics n'ont pas été abordés dans cette étude. (A ma connaissance, nous n'avons pas de code de calcul des lignes (convertisseur, bend, taper, coupleur) au CRPP.)

Le point positif de l'étude est qu'il semble tout à fait possible d'atteindre une puissance de sortie de 300 kW.

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

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

ISTART: courant d'accrochage pour le champ B correspondant à l'efficacité non linéaire maximale

Source: Fig.3 de la réf. [1]

Fig. 4 Disposition des bobines refroidies à l'eau.

Fig. 5 Disposition des bobines supraconductrices.

Fig. 6 Profil du champ B des bobines supraconductrices.

Fig. 7 Géométrie du canon et trajectoires électroniques, $I = 5$ A.

Equipotentiellles: 1 kV, $V_e = 30$ kV.

Fig. 8 Géométrie du canon et trajectoires électroniques, $I = 10$ A.

Equipotentiellles: 1 kV, $V_e = 30$ kV.

Fig. 9 Anisotropie du faisceau et dispersion en fonction du diamètre intérieur de l'électrode de contrôle, $I = 5$ A.

Fig.10 Profil du champ B des bobines Andromeda.

Fig.11 Géométrie du canon et trajectoires électroniques, $I = 10$ A.

Equipotentiellles: 1 kV, $V_e = 29$ kV.

Fig.12 Définition des paramètres du canon à électrons.

- Fig.13 Bas: Profil du résonateur.
Haut: Dépendance en z du champ électrique (norme et phase).
Evolution de l'efficacité η .
- Facteur de qualité: 523 (Mode TE₀₂)
Fréquence de résonance: 45.118 GHz
Faisceau: $\alpha = 1.5$, $R_{\text{beam}} = 0.56$ cm, 80 kV.
- Fig.14 Puissance de sortie, efficacité et champ B optimal en fonction du courant du faisceau d'électrons.
- Fig.15 Courant d'accrochage en fonction de B.
- Fig.16 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 20 A.
Les intersections donnent les points de fonctionnement.
- Fig.17a Transmission (T), réflexion (R) et absorption (A) en fonction de la fréquence pour une fenêtre en alumine 995.
 $\epsilon_r = 9.604$, $\epsilon_i = -0.0037$, Epaisseur: 4.34 mm
Echelle linéaire.
- Fig.17b Transmission (T), réflexion (R) et absorption (A) en fonction de la fréquence pour une fenêtre en alumine 995.
 $\epsilon_r = 9.604$, $\epsilon_i = -0.0037$, Epaisseur: 4.34 mm
Echelle en décibels.
- Fig.18a Profil de température et contraintes thermiques dans la fenêtre en alumine pour une impulsion de 300 kW durant 10 ms.
 $\epsilon_r = 9.604$, $\text{tg } \delta = 3.7 \cdot 10^{-4}$, Mode TE₀₂
Rayon de la fenêtre: 2cm, épaisseur: 4.34 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.18b Profil de température et contraintes thermiques dans la fenêtre en alumine pour une puissance continue de 10 kW.
 $\epsilon_r = 9.604$, $\text{tg } \delta = 3.7 \cdot 10^{-4}$, Mode TE₀₂
Rayon de la fenêtre: 2cm, épaisseur: 4.34 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.

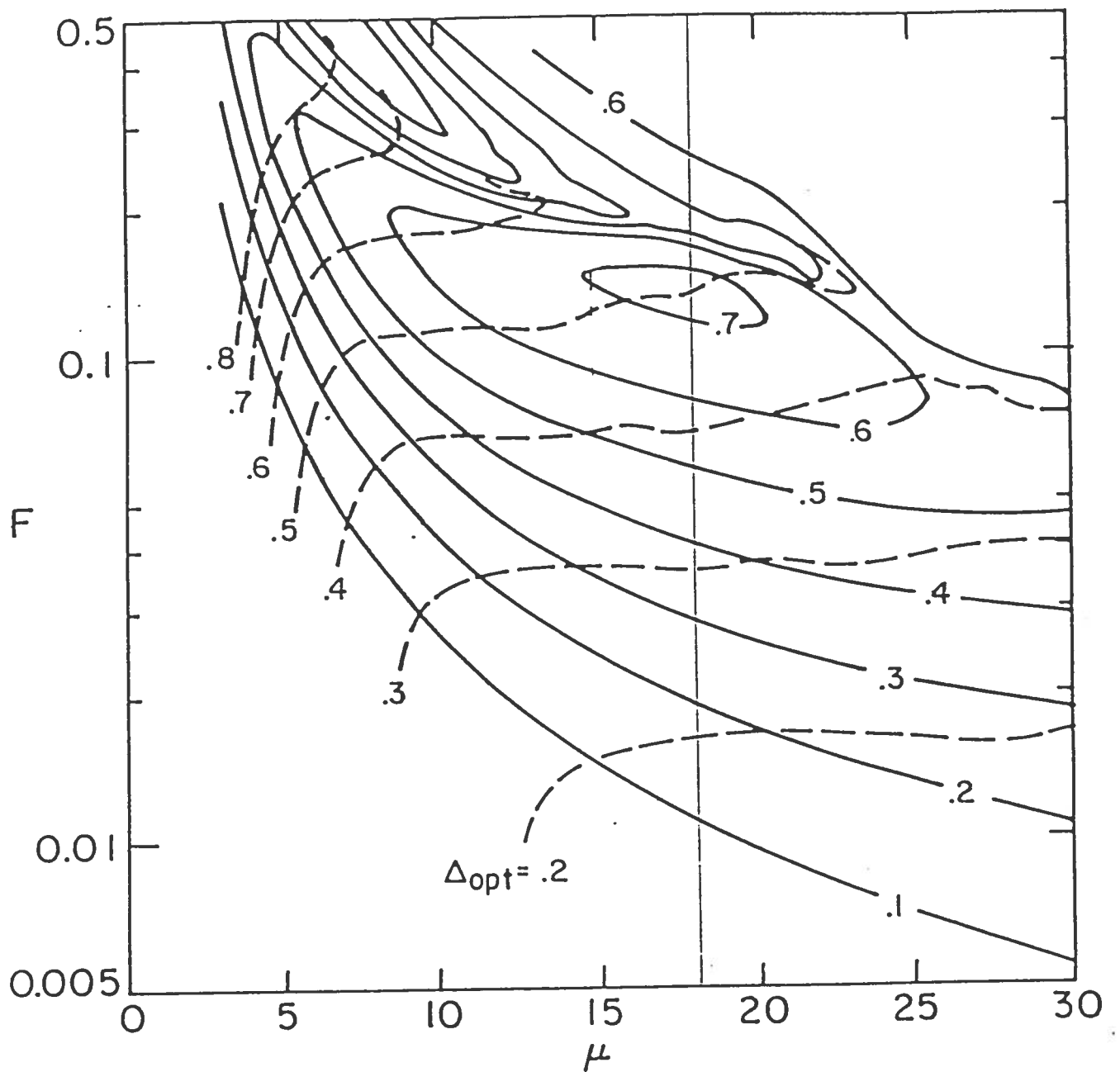


Fig. 1 Courbes dans le plan (μ, F) de l'isoefficacité η_L (traits pleins) d'un gyrotron travaillant à la fondamentale .

Traits interrompus: Δ

Source: Fig.2 de la réf. [1]

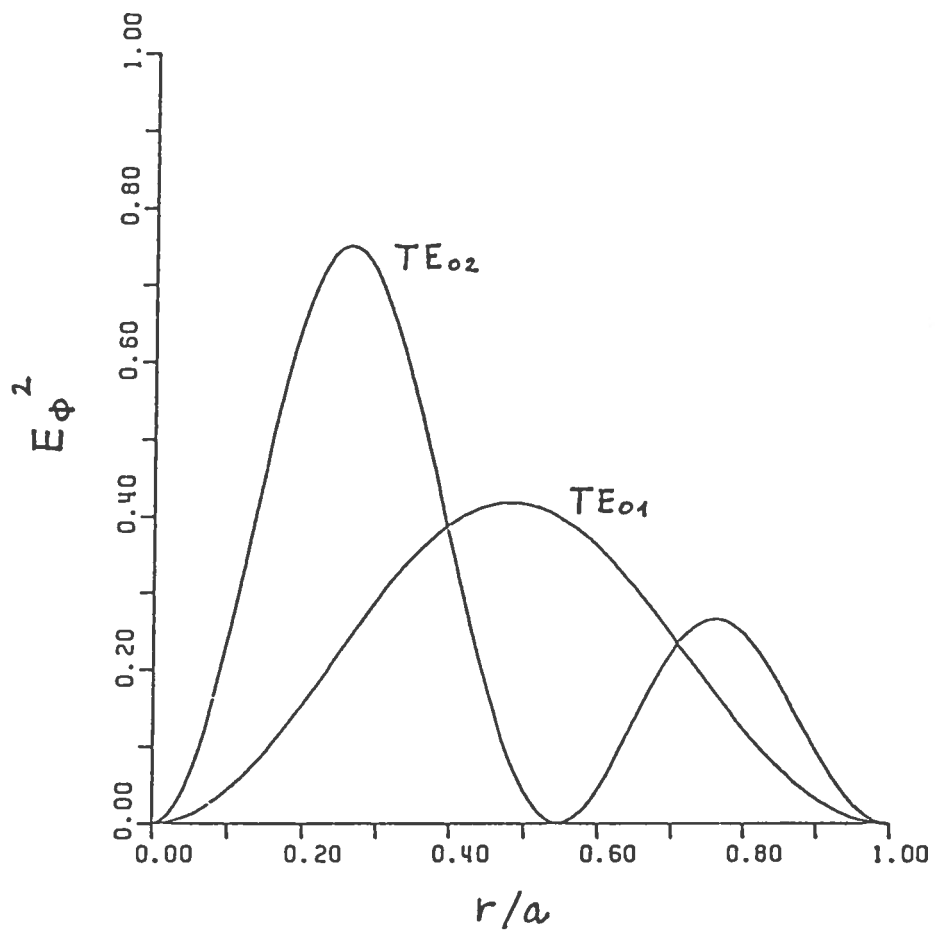


Fig. 2 Profil radial du carré du champ électrique (unité arbitraire). a = rayon du guide.

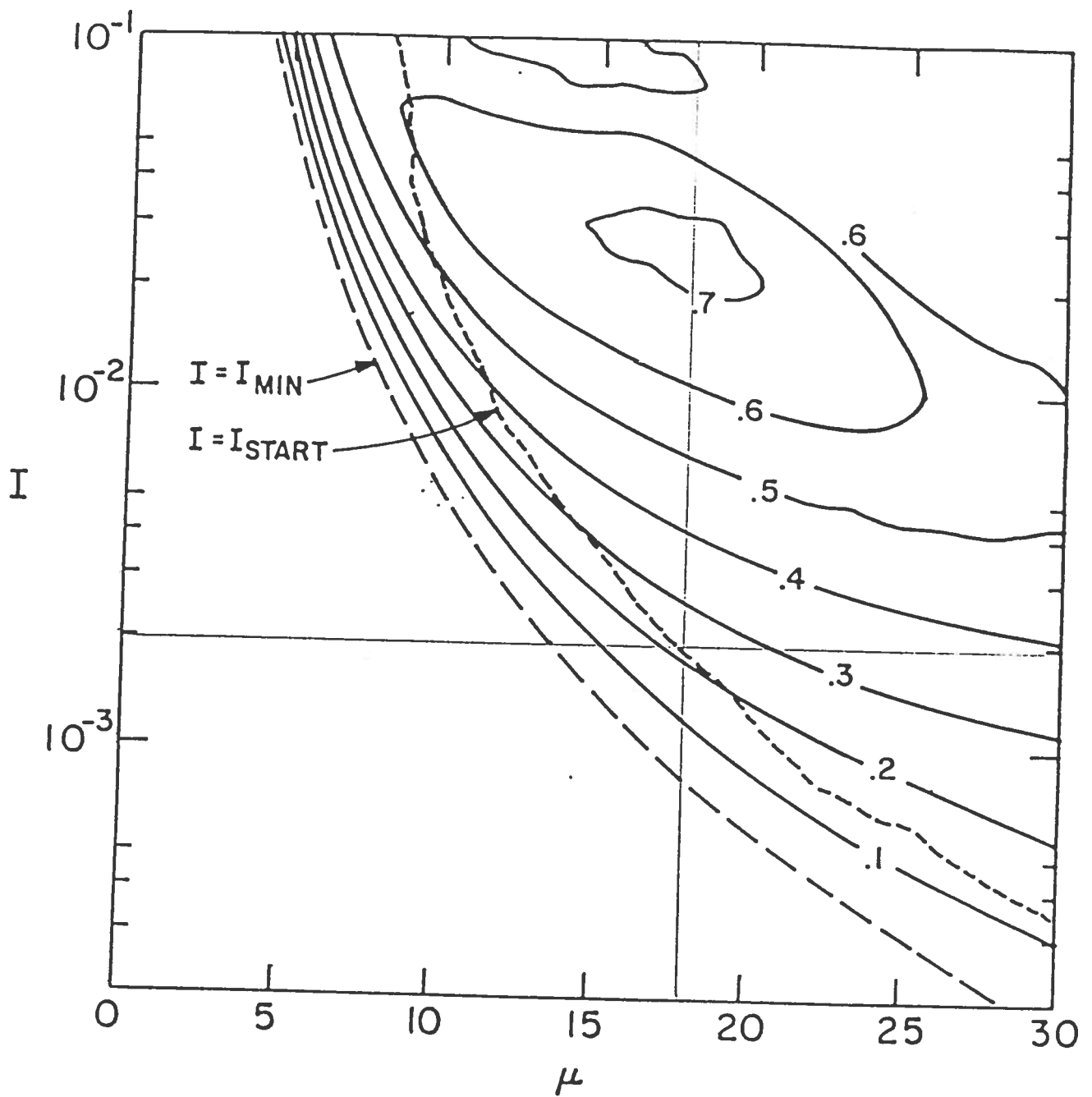


Fig. 3 Courbes dans le plan (μ, I) de l'isoefficacité η_L (traits pleins) d'un gyrotron travaillant à la fondamentale.

I_{MIN} : courant d'accrochage minimum

I_{START} : courant d'accrochage pour le champ B correspondant à l'efficacité non linéaire maximale

Source: Fig.3 de la réf. [1]

Fig 4

Original

www.gul

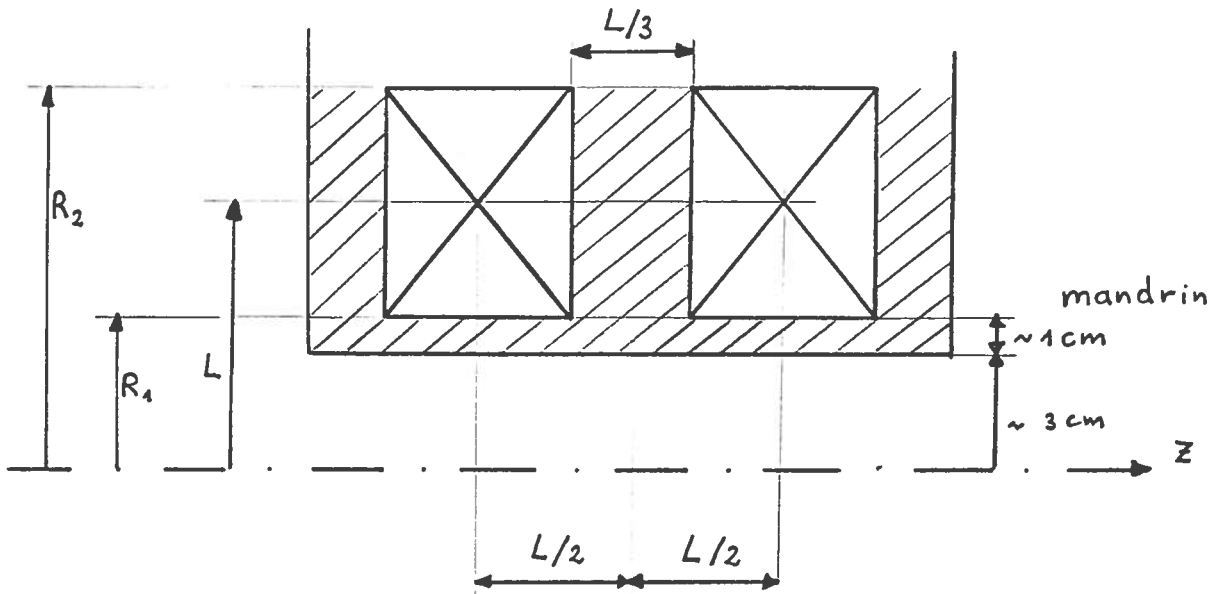


Fig. 4 Disposition des bobines refroidies à l'eau.

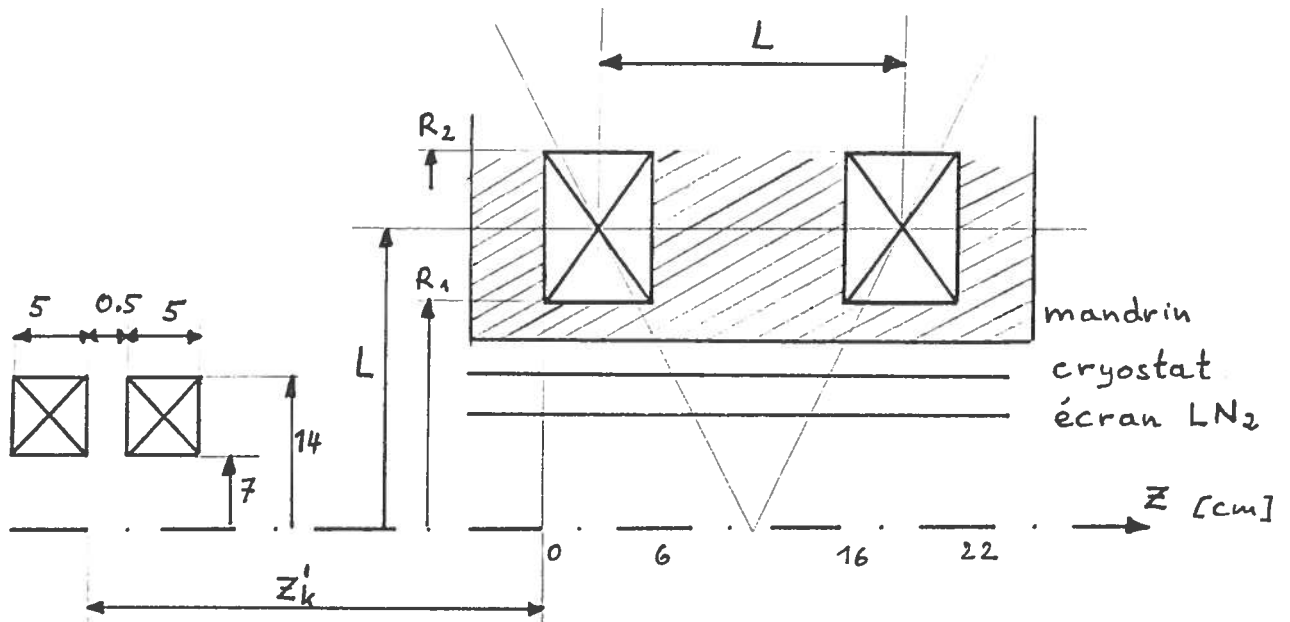


Fig. 5 Disposition des bobines supraconductrices.

CONTOUR PLOT OF STATIC MAGNETIC FIELD
 45 GHZ GYROTRON MAGNET $\alpha_c = -15$
 GYROTRON PROJECT
 CAPP 87/11/17. 17.05.20.

COIL	CURRENT A* 10^6	CURRENT DENSITY A/CM**2
1	.32119E+06	.66915E+04
2	.32021E+06	.66711E+04
3	-.79370E+04	-.22677E+03
4	-.80627E+04	-.23036E+03

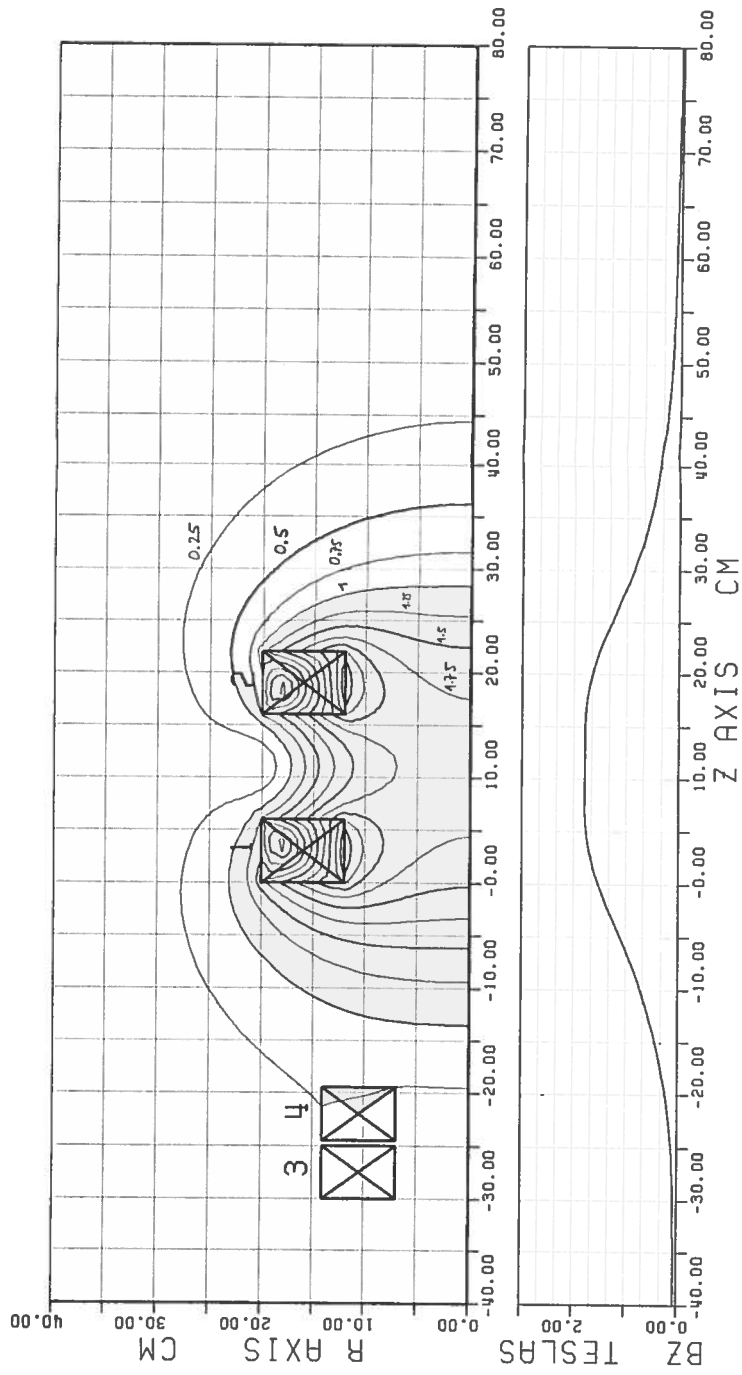


Fig. 6 Profil du champ B des bobines supraconductrices.

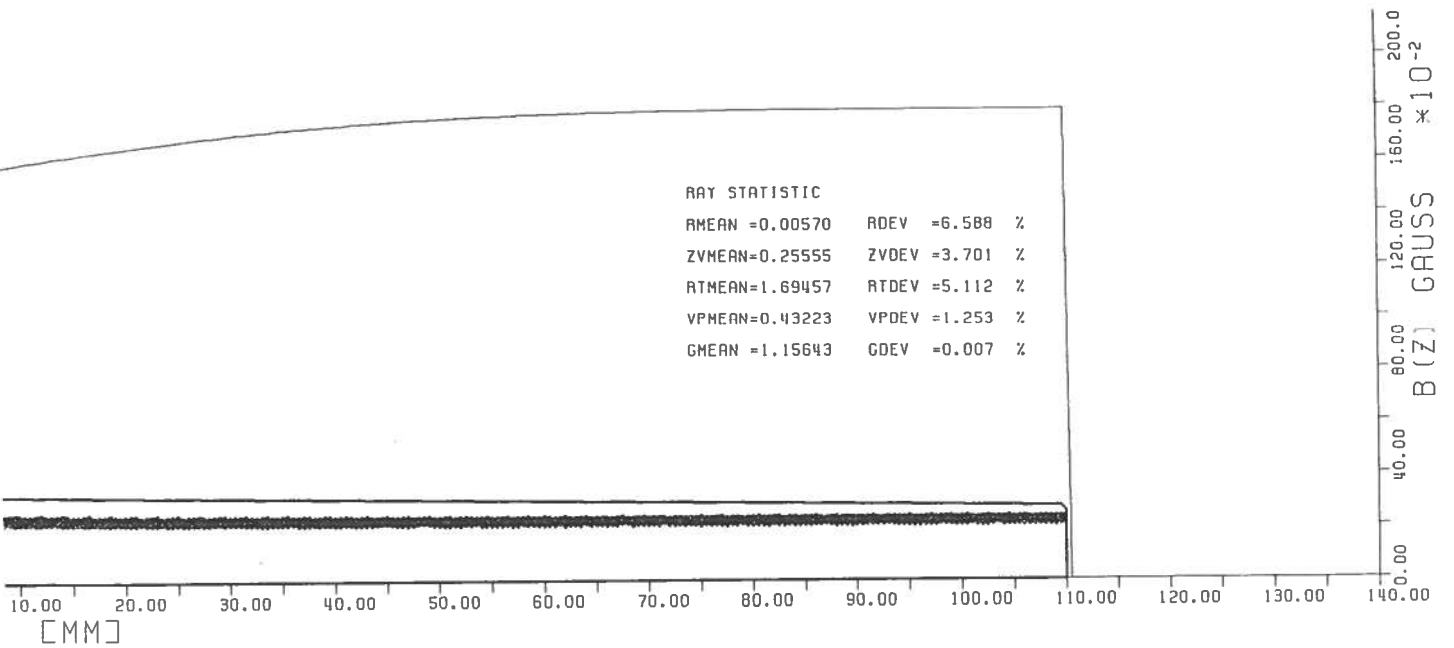
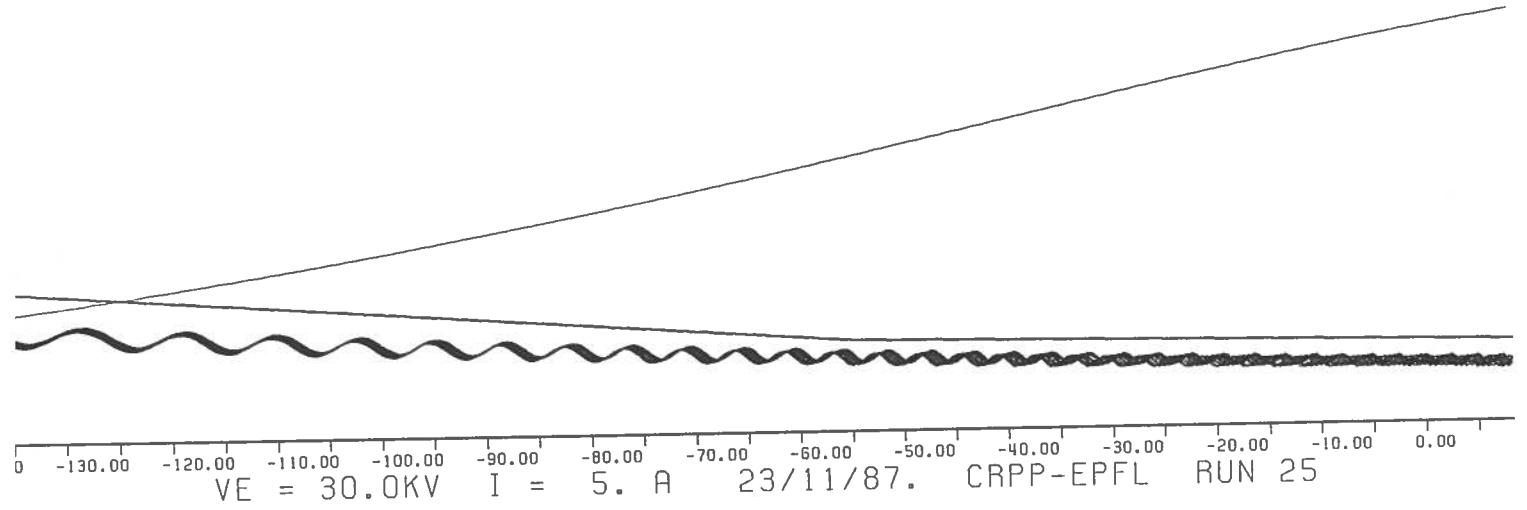
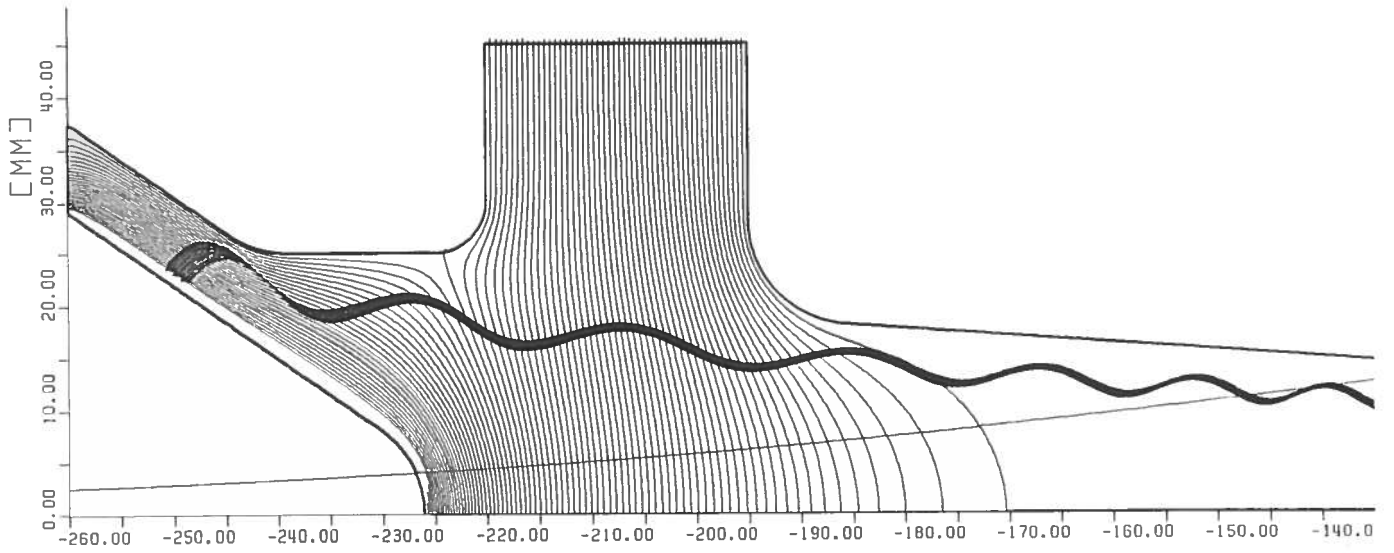
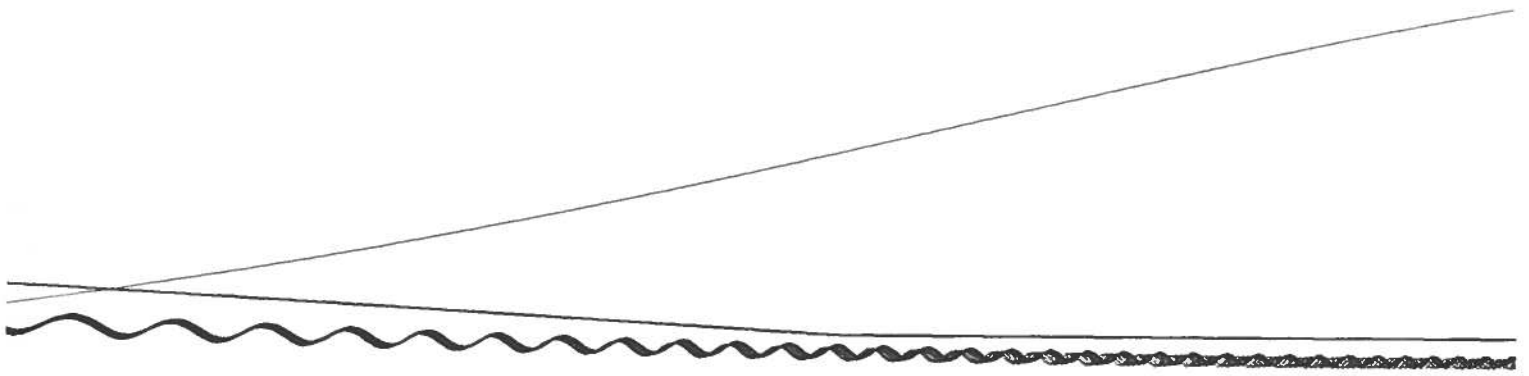
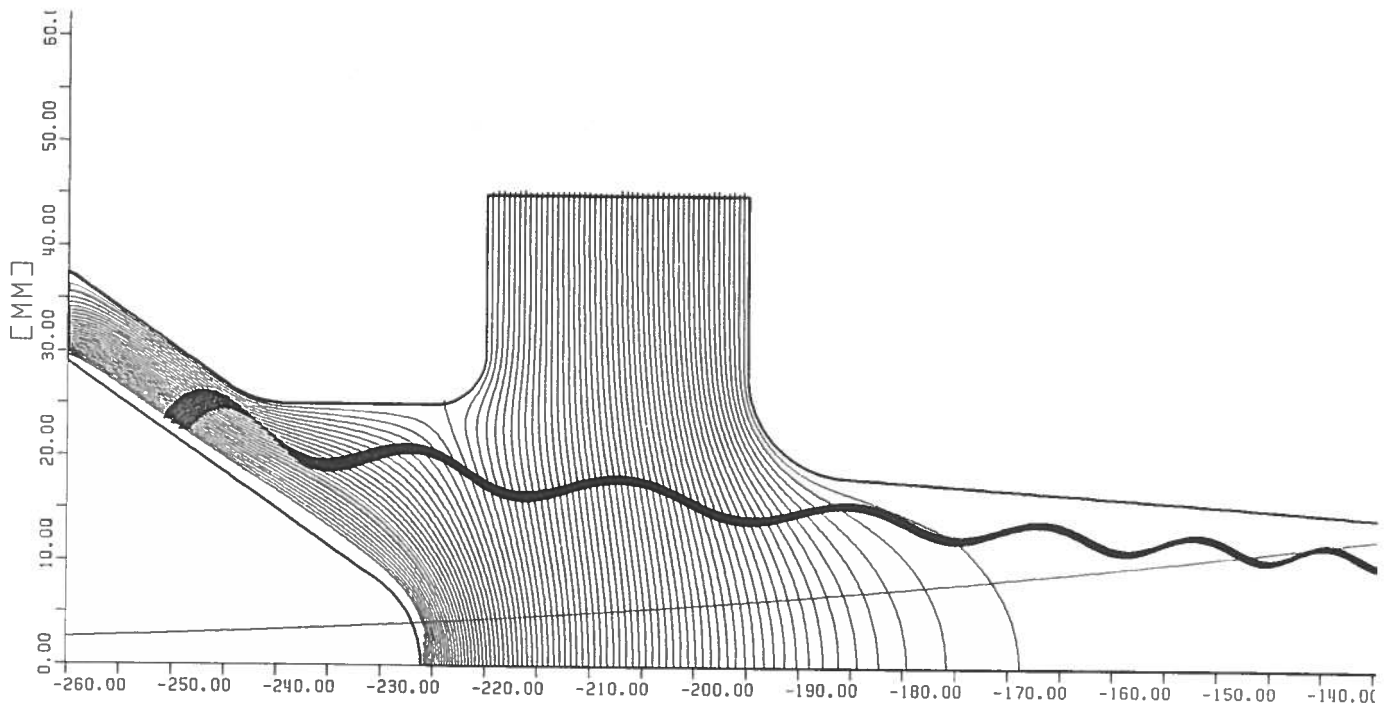


Fig. 7 Géométrie du canon et trajectoires électroniques, I = 5 A.
Equipotentiellles: 1 kV, Ve = 30 kV.



VE = 30.0KV I = 10. A 23/11/87. CRPP-EPFL RUN 26

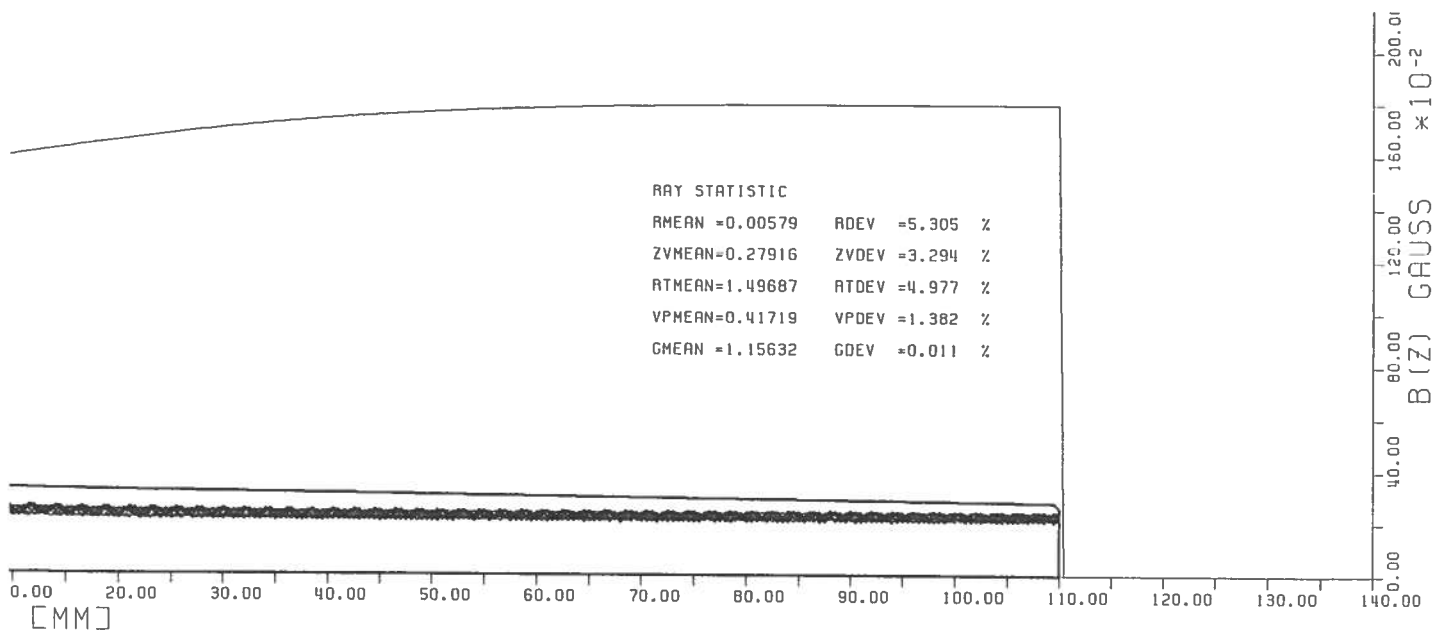


Fig. 8 Géométrie du canon et trajectoires électroniques, I = 10 A.
Equipotentiellles: 1 kV, Ve = 30 kV.

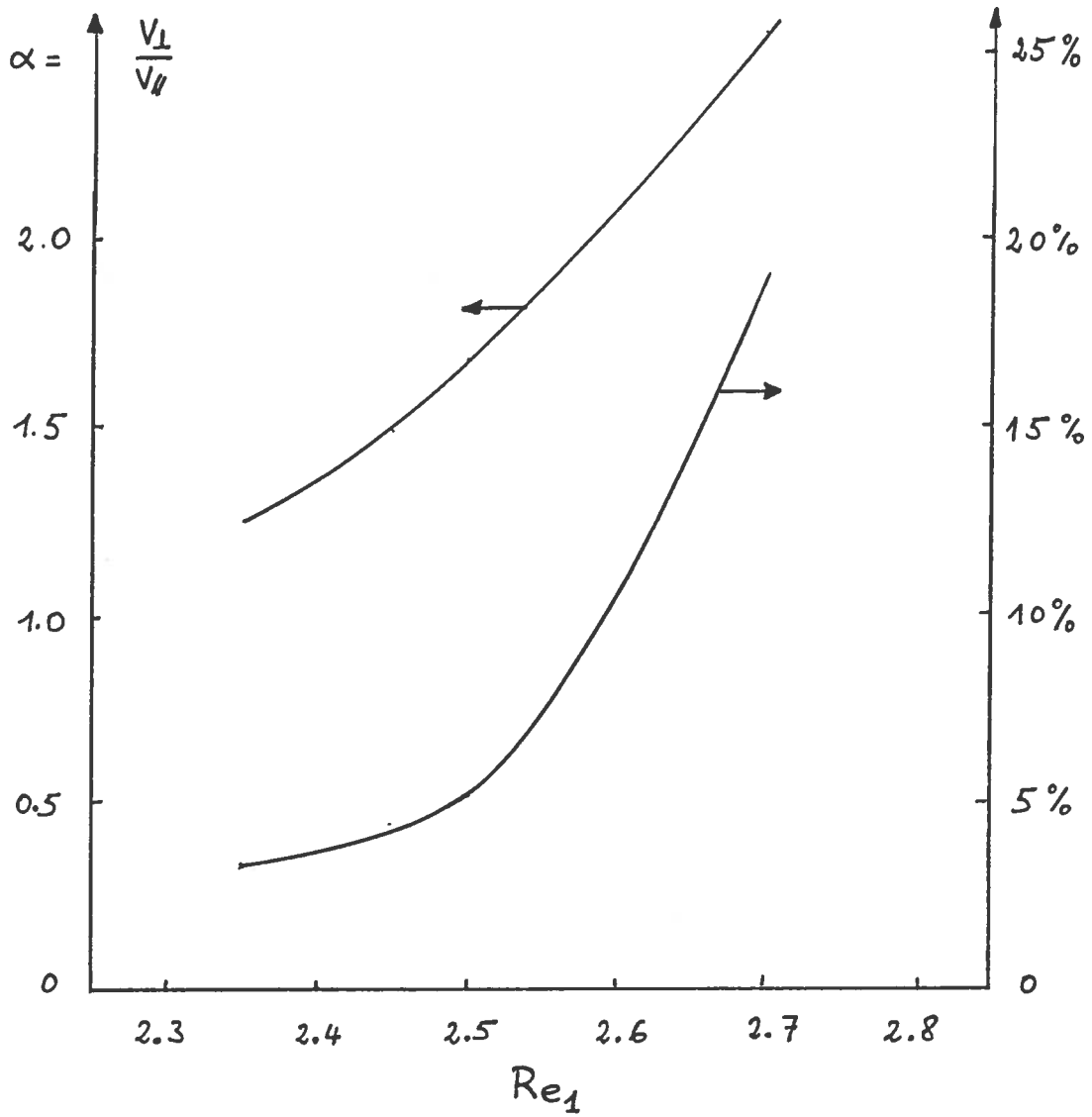


Fig. 9 Anisotropie du faisceau et dispersion en fonction du diamètre intérieur de l'électrode de contrôle, $I = 5$ A.

CONTOUR PLOT OF STATIC MAGNETIC FIELD
 45 GHZ ANDROMEDA GYROTRON MAGNET

COIL	CURRENT A*1	CURRENT DENSITY A/CM**2
1	.32500E+04	.77381E+02
2	.32500E+04	.77381E+02
3	.40470E+06	.62979E+04
4	.40470E+06	.62979E+04
5	.69140E+06	.67191E+04

GYROTRON PROJECT
 CRPP 87/11/26. 12.22.19.

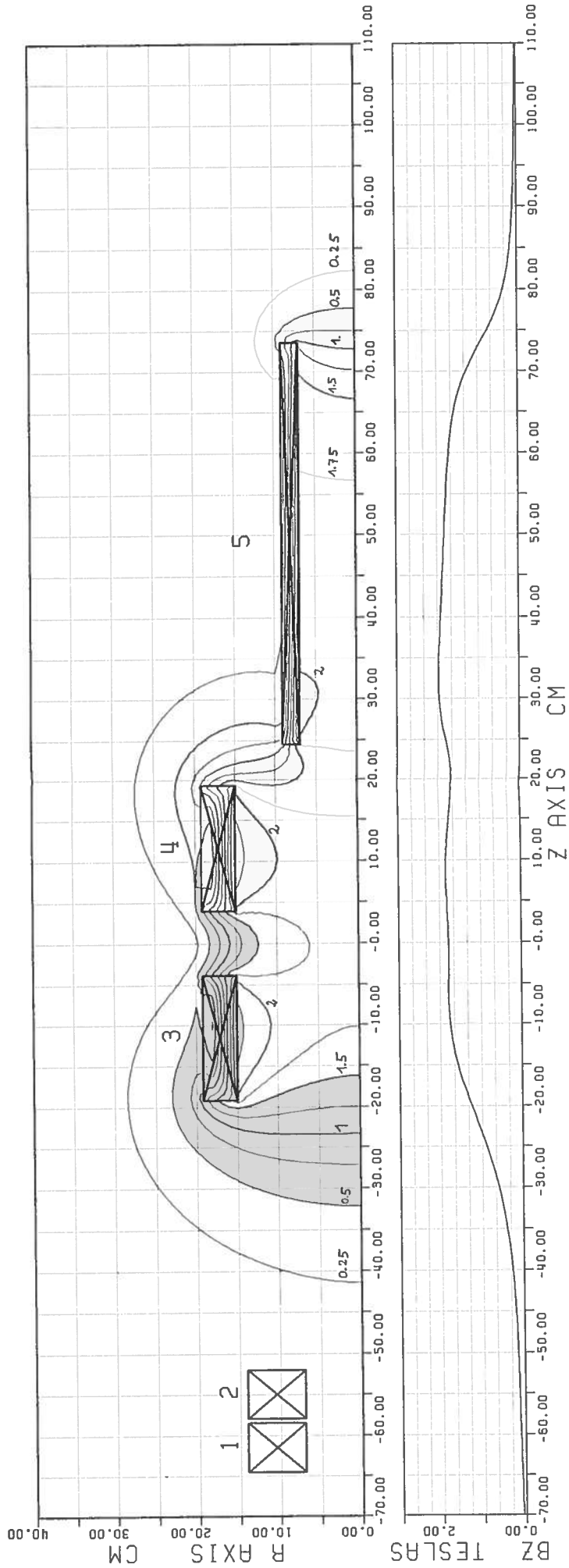


Fig.10 Profil du champ B des bobines Andromeda.

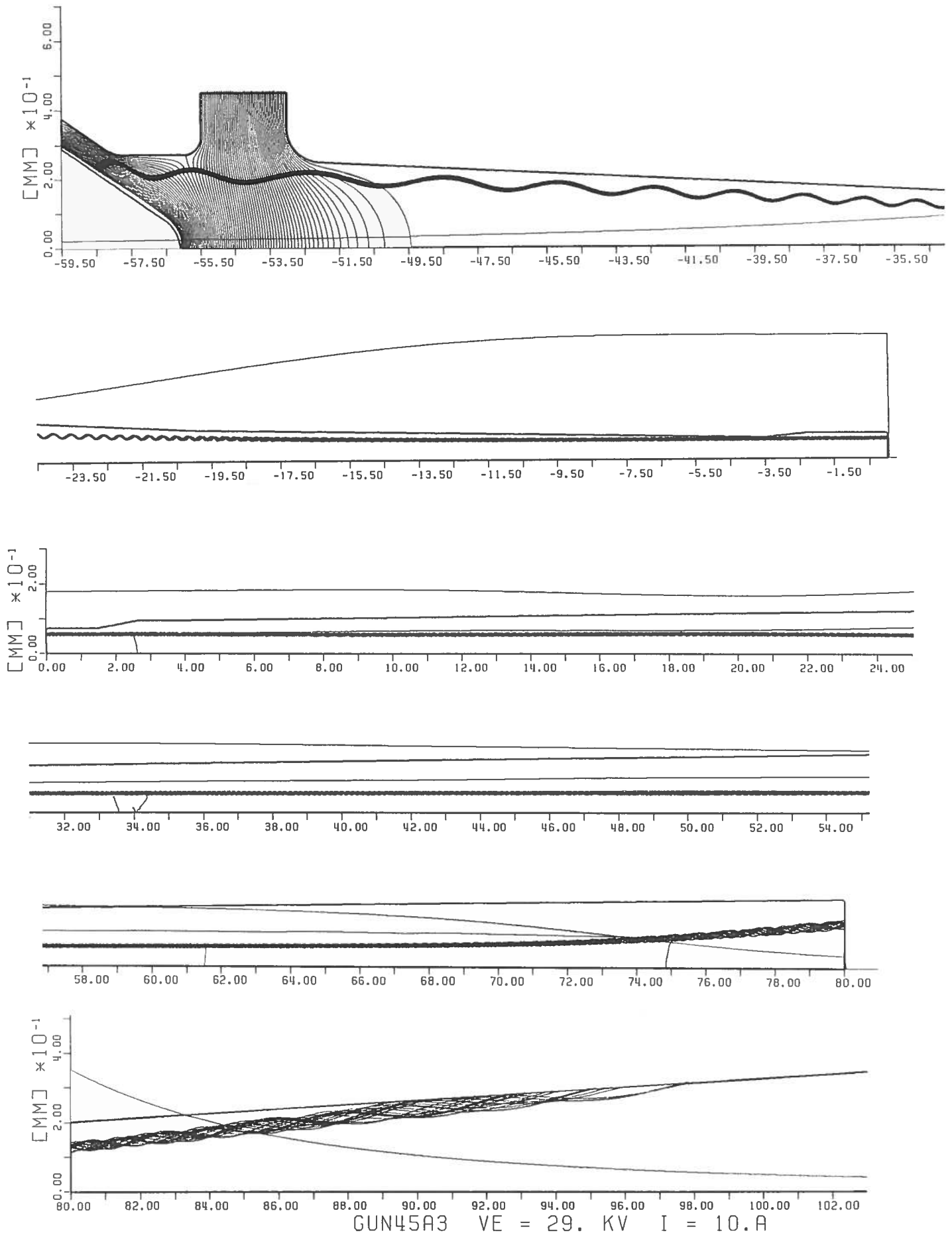


Fig.11 Géométrie du canon et trajectoires électroniques, $I = 10$ A.
Equipotentiellles: 1 kv, $V_e = 29$ kv.

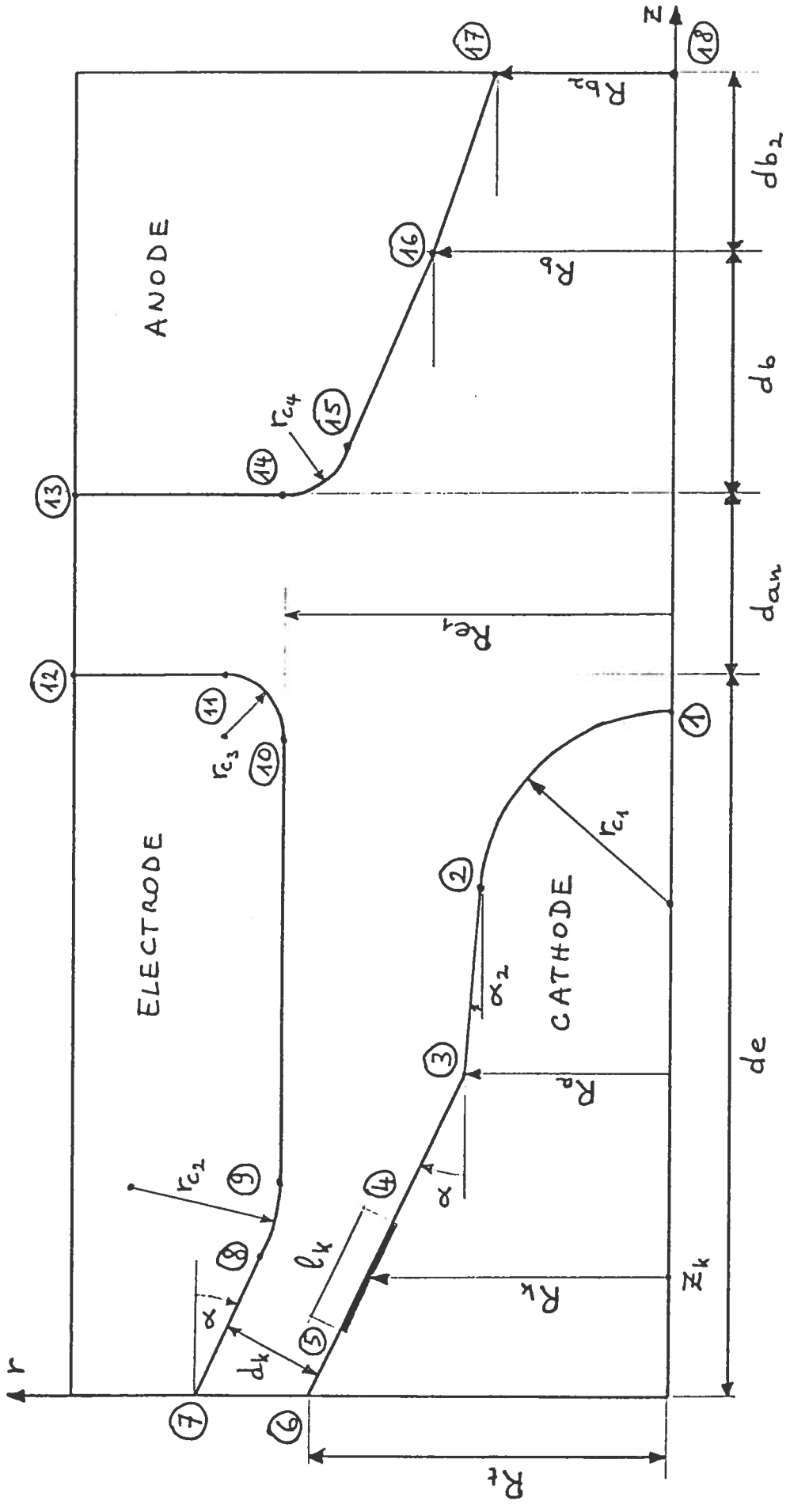


Fig.12 Définition des paramètres du canon à électrons.

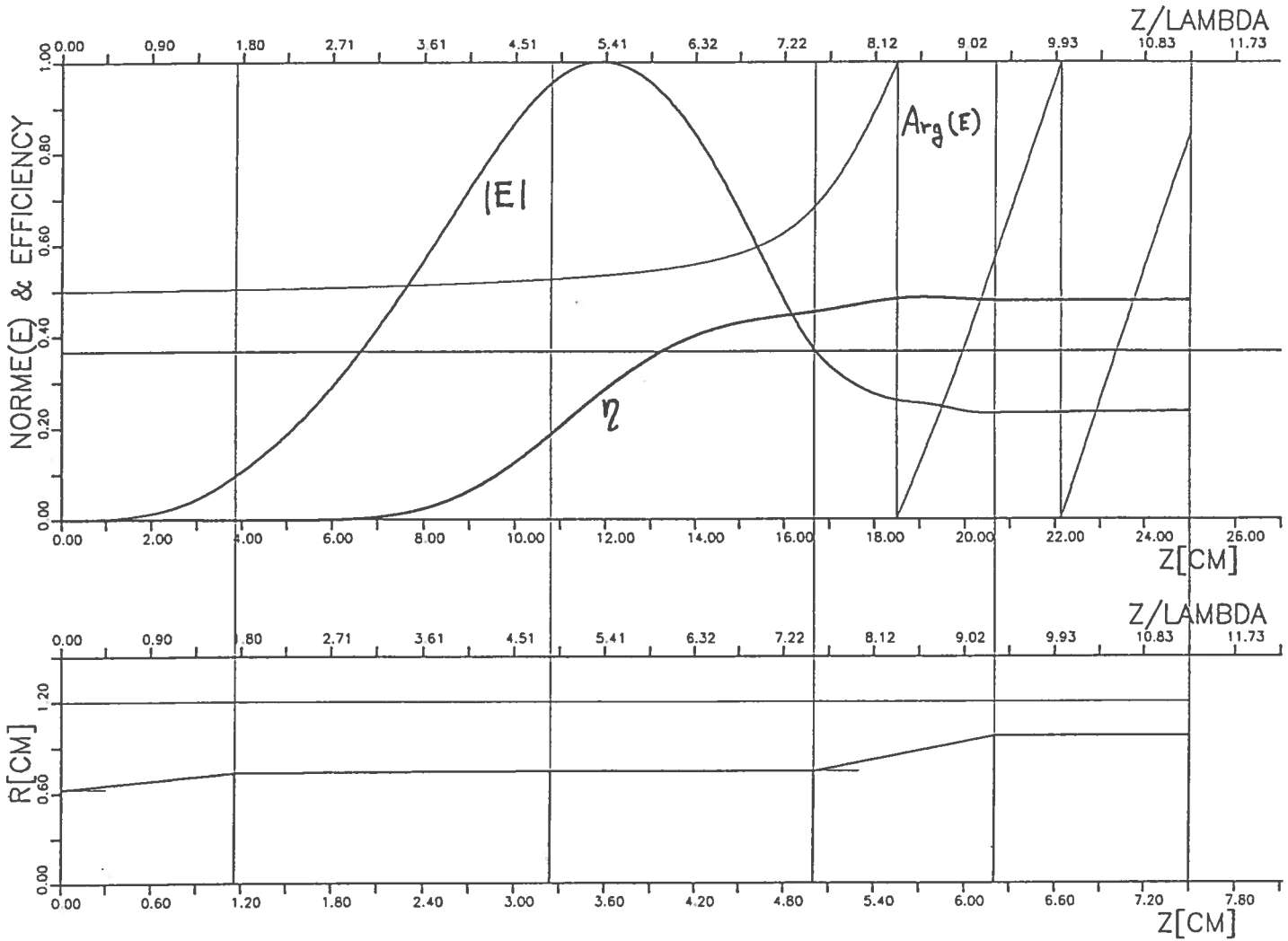


Fig.13 Bas: Profil du résonateur.
Haut: Dépendance en z du champ électrique (norme et phase).
Evolution de l'efficacité .

Facteur de qualité: 523 (Mode TE_{02})
Fréquence de résonance: 45.118 GHz
Faisceau: $\alpha = 1.5$, $R_{beam} = 0.56$ cm, 80 kV.

Q-FACTOR	523
MODE TE	0 2
F-RES [GHZ]	45.118
U-CATH [KV]	80
ALPHA	1.50
R-BEAM [CM]	0.560

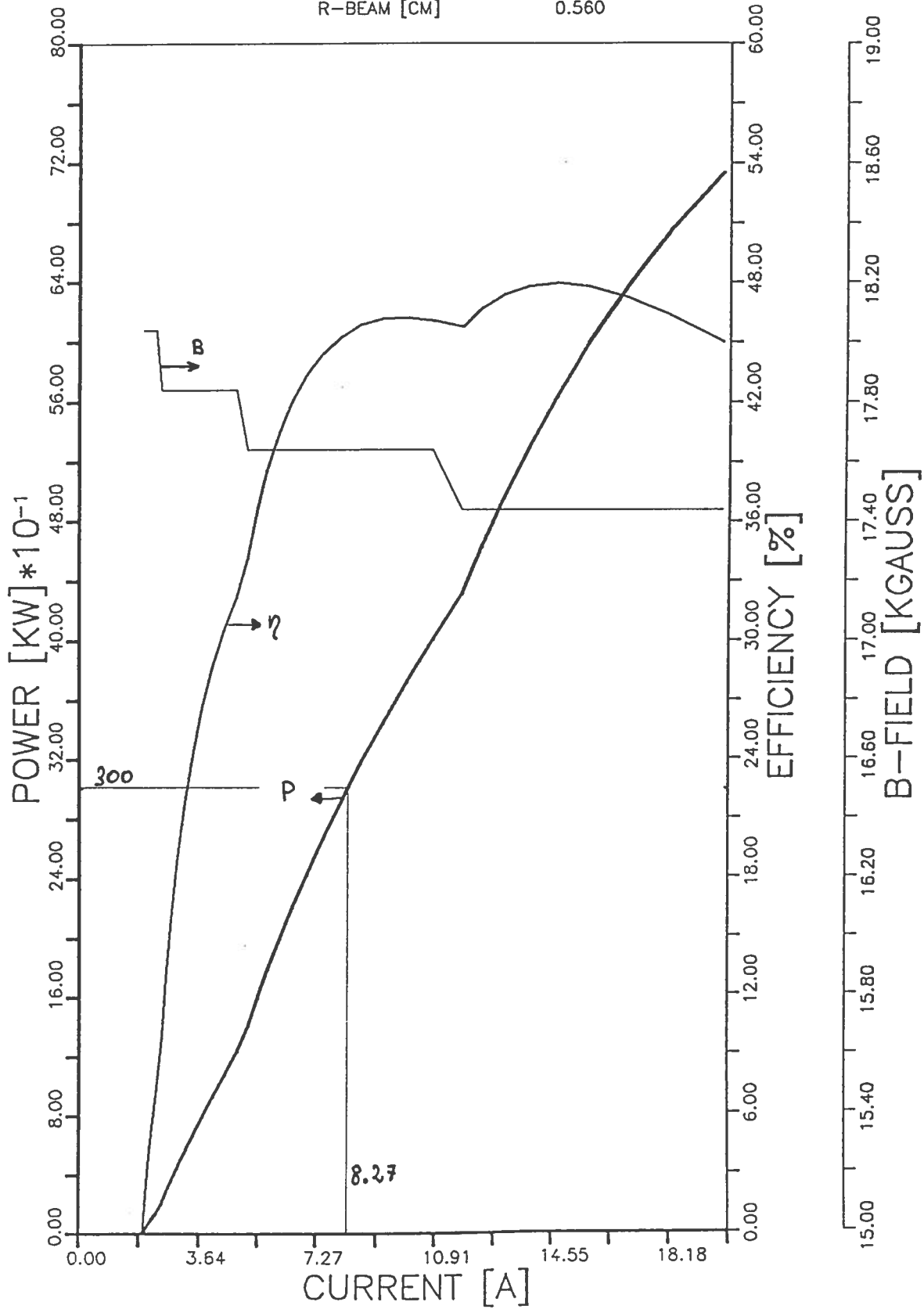


Fig.14 Puissance de sortie, efficacité et champ B optimal en fonction du courant du faisceau d'électrons.

COLD-Q	523	MINIMUM :	
MODE TE	0 2	I-START [A]	1.949
COLD-F [CHZ]	45.118	B-FIELD [KG]	18.040
U-CATH [KV]	80		
ALPHA	1.50		
R-BEAM [CM]	0.560		

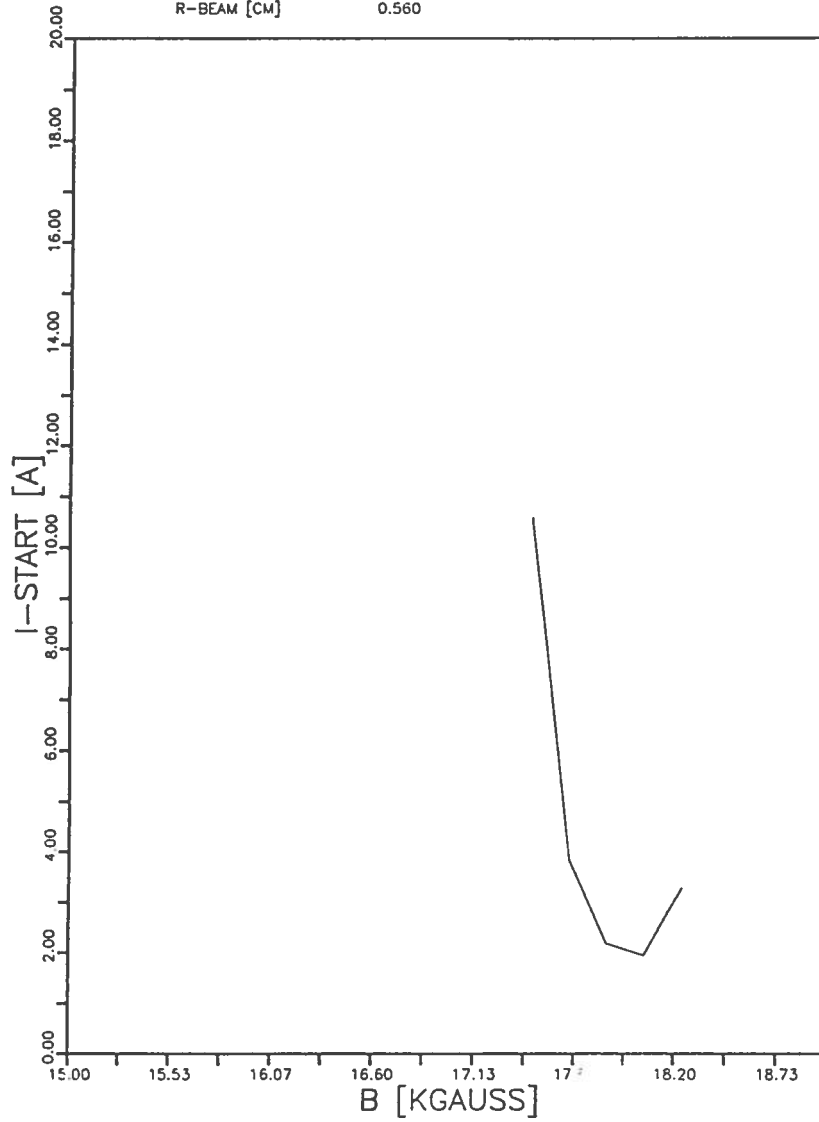


Fig.15 Courant d'accrochage en fonction de B.

Q-FACTOR = 523
 OCO = 1.0820
 B [KGAUSS]= 17.4400
 VTVZ = 1.50
 U-CATH[KV]= 80000
 R-BEAM[CM]= 0.560

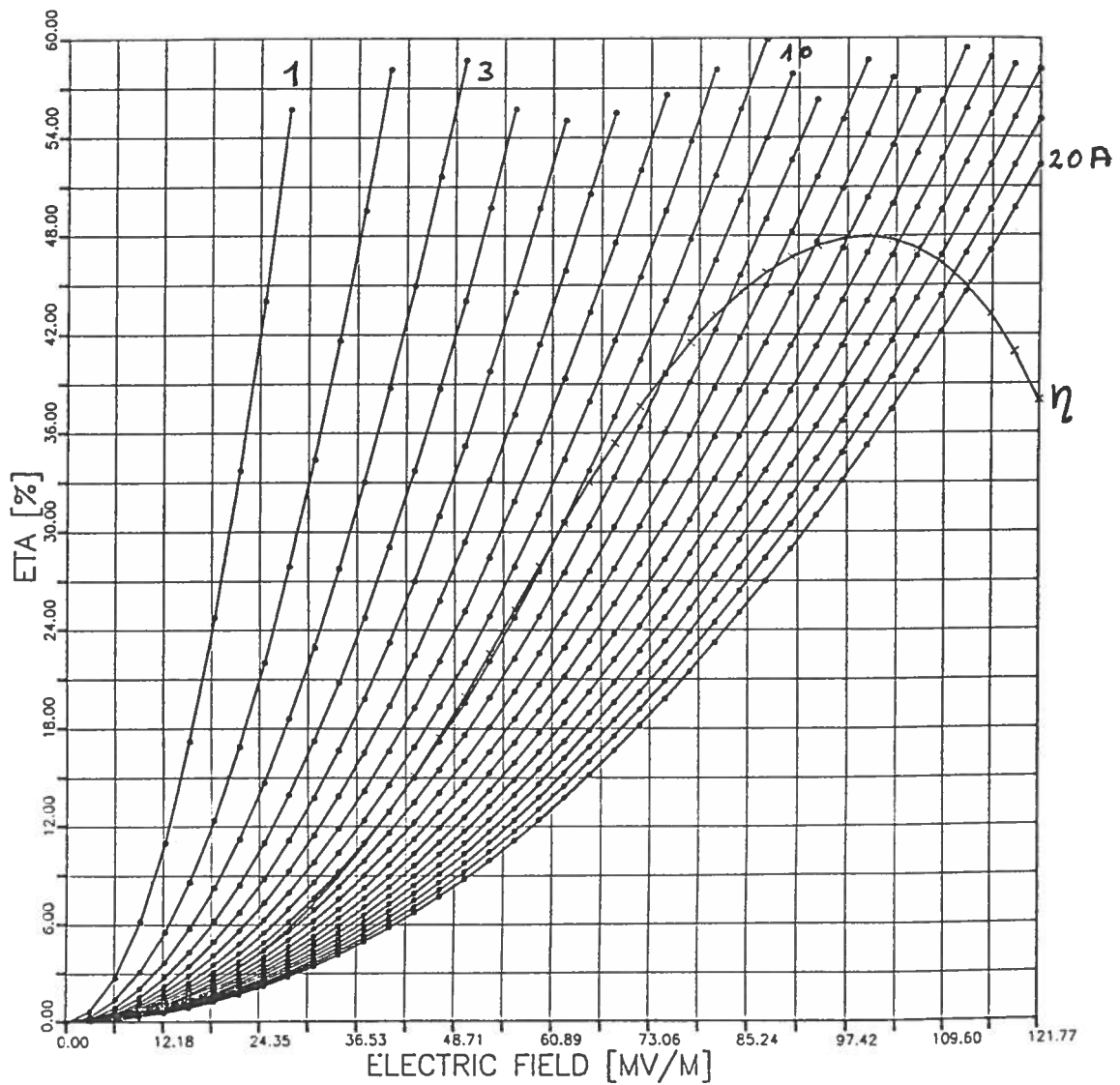


Fig.16 Efficacité η en fonction du champ électrique.
 Les paraboles figurent la puissance extraite du résonateur
 divisée par le courant du faisceau pour $I = 1$ à 20 A.
 Les intersections donnent les points de fonctionnement.

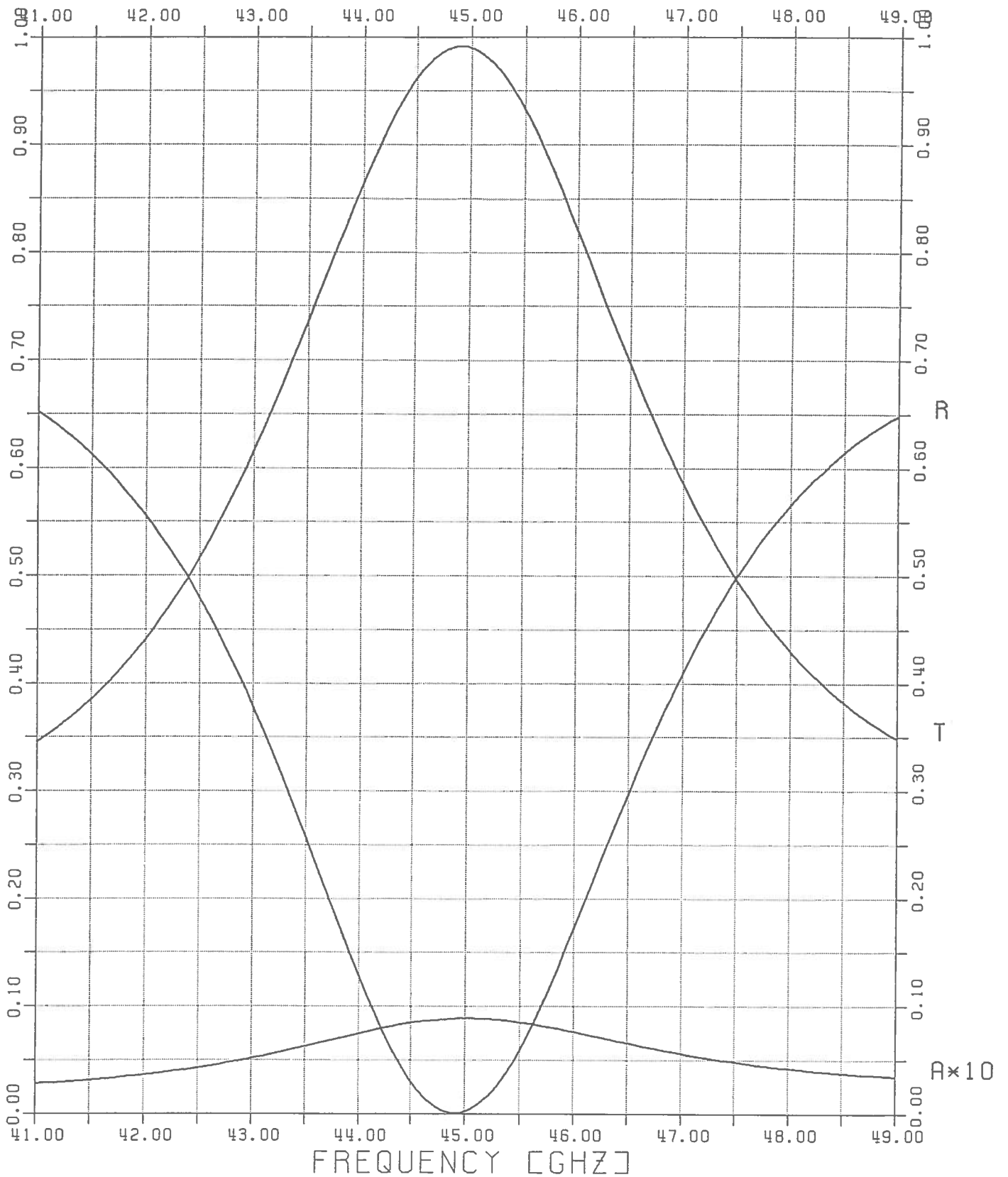


Fig.17a Transmission (T), reflexion (R) et absorption (A) en fonction de la fréquence pour une fenêtre en alumine 995.

$\xi_r = 9.604$, $\xi_i = -0.0037$, Epaisseur: 4.34 mm

Echelle linéaire.

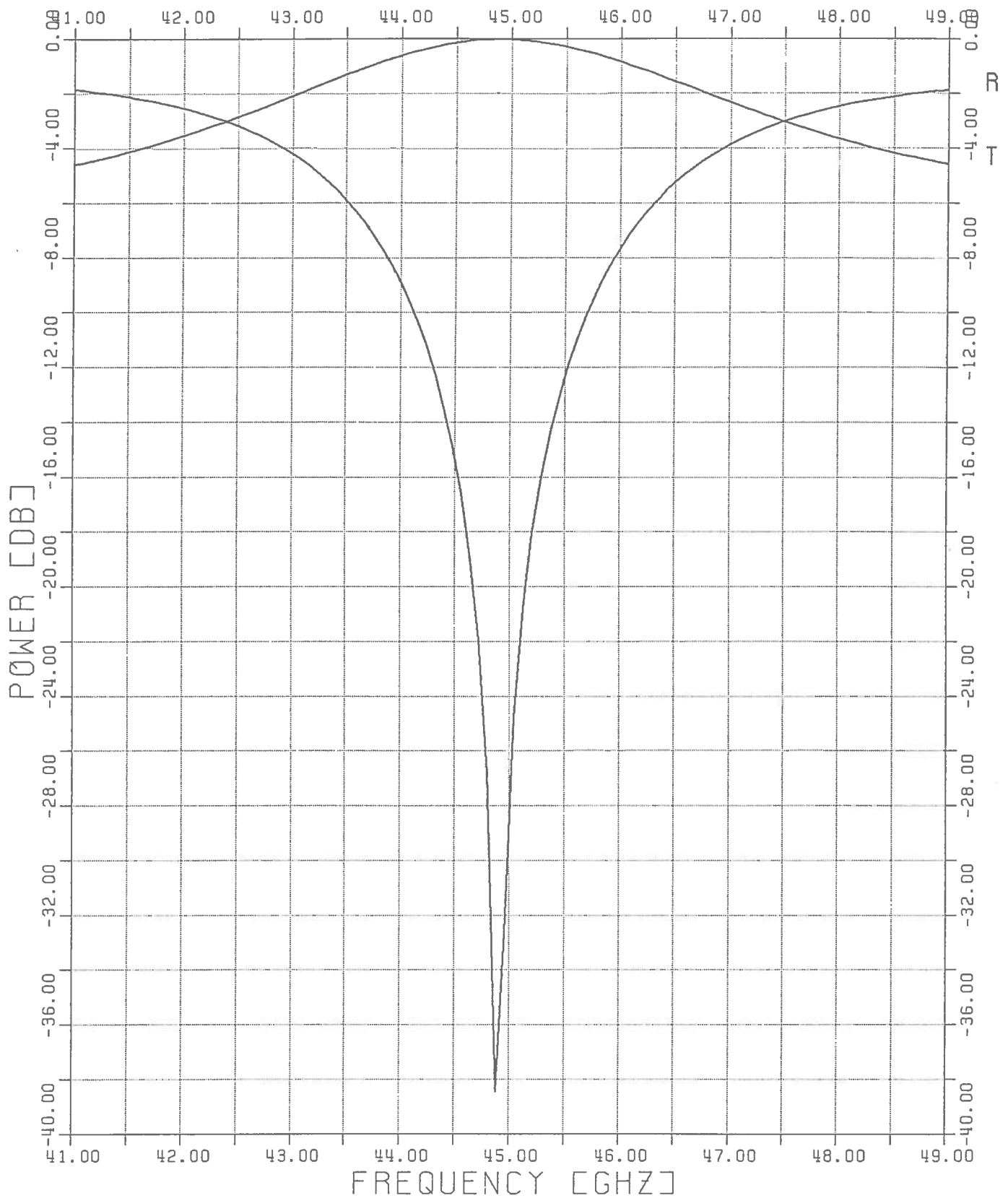


Fig.17b Transmission (T), reflexion (R) en fonction de la fréquence pour une fenêtre en alumine 995.

$\epsilon_r = 9.604$, $\epsilon_i = -0.0037$, Epaisseur: 4.34 mm

Echelle en décibels.

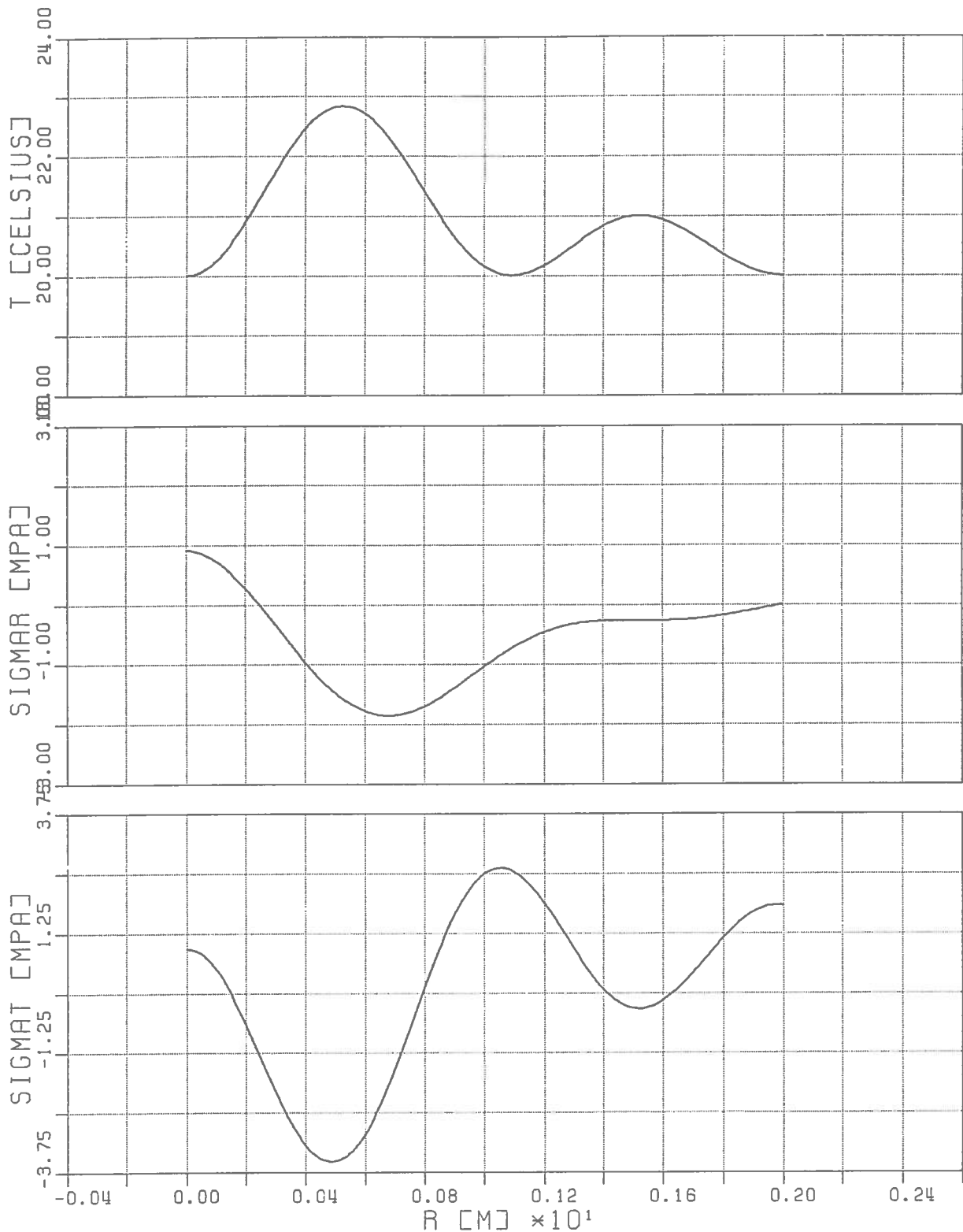


Fig.18a Profil de température et contraintes thermiques dans la fenêtre en alumine pour une impulsion de 300 kW durant 10 ms.

$\epsilon_r = 9.604$, $\text{tg } \delta = 3.7 \cdot 10^{-4}$, Mode TE₀₂
 Rayon de la fenêtre: 2cm, épaisseur: 4.34 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.

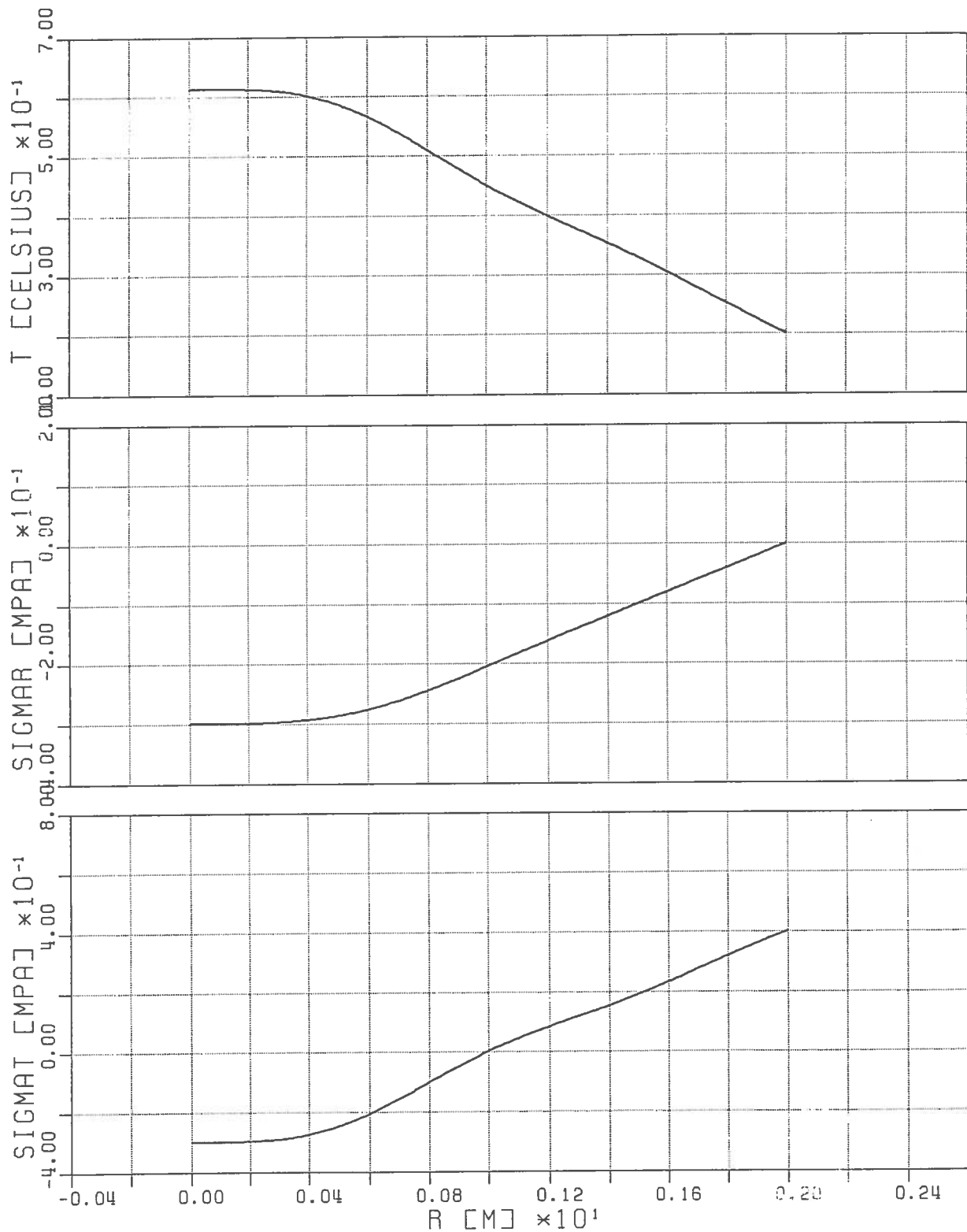


Fig.18b Profil de température et contraintes thermiques dans la fenêtre en alumine pour une puissance continue de 10 kW.

$\epsilon_r = 9.604$, $\text{tg } \delta = 3.7 \cdot 10^{-4}$, Mode TE₀₂
 Rayon de la fenêtre: 2cm, épaisseur: 4.34 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.