

Pré-étude d'un gyrotron quasi-optique
où les miroirs sont à l'extérieur
des bobines

A. PERRENOUD - M.Q. TRAN - P. MUGGLI
(Groupe Gyrotron)

1. But de l'étude
2. Contraintes technologiques
3. Design 1 (Rext = 26 cm)
4. Design 2 (Rext = 30 cm)
5. Design 3 (Rext = 34 cm)
6. Conclusions provisoires

Apendice

- A. Le gyrotron actuel du CRPP

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

1. But de l'étude =====

Dans le gyrotron actuel, le résonateur est placé entièrement à l'intérieur des bobines. Le rayon extérieur des bobines Ophélie est par conséquent assez grand: 44 cm pour le conducteur et environ 60 cm pour le cryostat. Le but de cette étude est de concevoir un système de bobines plus petit, donc moins coûteux, avec les miroirs du résonateur en dehors des bobines. Le système est toujours du type "Helmoltz" dans la zone d'interaction, plus 2 bobines (bucking coils) dans la région du canon d'électrons. On cherchera quelles sont les fréquences les plus élevées qu'il est possible d'atteindre pour une taille de bobines donnée. Pouvoir atteindre 150 GHz serait un avantage décisif pour donner une suite à cette étude.

2. Contraintes technologiques =====

2.1 Dimension du résonateur -----

Si possible $d = 65$ cm. Plus le résonateur est long, plus les problèmes de "multimode" seront gênants.
A titre de comparaison, le NRL prévoit 76 cm.

2.2 Champ B_z -----

$$\text{Sur l'axe: } B_z = \frac{m}{e} \gamma \omega = 2\pi \frac{m}{e} f \gamma \quad \text{avec } \gamma = 1.137 \quad (70 \text{ kV})$$

Fréquence GHz	B_z Tesla	r_0 cm	$2r_0$ cm
120	4.874	1.608	3.2
130	5.280	1.545	3.1
140	5.687	1.489	3.0
150	6.093	1.438	2.9

Zone d'interaction de $-2r_0$ à $+2r_0$.

Gradient de $\pm 6\%$ sur 6.4 cm ($= 4 r_0$).

Espace libre minimum dans la zone d'interaction, c'est-à-dire entre les 2 bobines principales (écran refroidi à 77°K): 8 cm.

2.3 Isolation -----

Épaisseur du mandrin de bobinage: 1 cm, superisolation: 1cm, écran à 77°K: 1cm, soit en tout 3cm. Ces chiffres représentent un minimum absolu dans la zone du résonateur. Ailleurs, on peut se permettre une isolation plus généreuse.

Espace minimum entre 2 bobines à 4.5 °K: 0.5 cm.

2.4 Supraconducteur

On va se baser sur les caractéristiques que SMIT a données pour le conducteur utilisé à l'intérieur de la première couche des Ophélie, soit:

1000 A, 8.4 T, 4.2 °K, rapport Cu/Sc = 1.8

Le courant critique en fonction de B est montré aux figs. 1 et 2. On s'efforcera de trouver un design où la marge est de 1°K au moins. (Température de l'He liquide à 1.3 bar: 4.5° K.) Il est clair que si la marge est plus grande on peut utiliser un supraconducteur ayant un rapport Cu/Sc plus grand (diminution du coût).

Critical current density for conductor 1 at 5.5°K

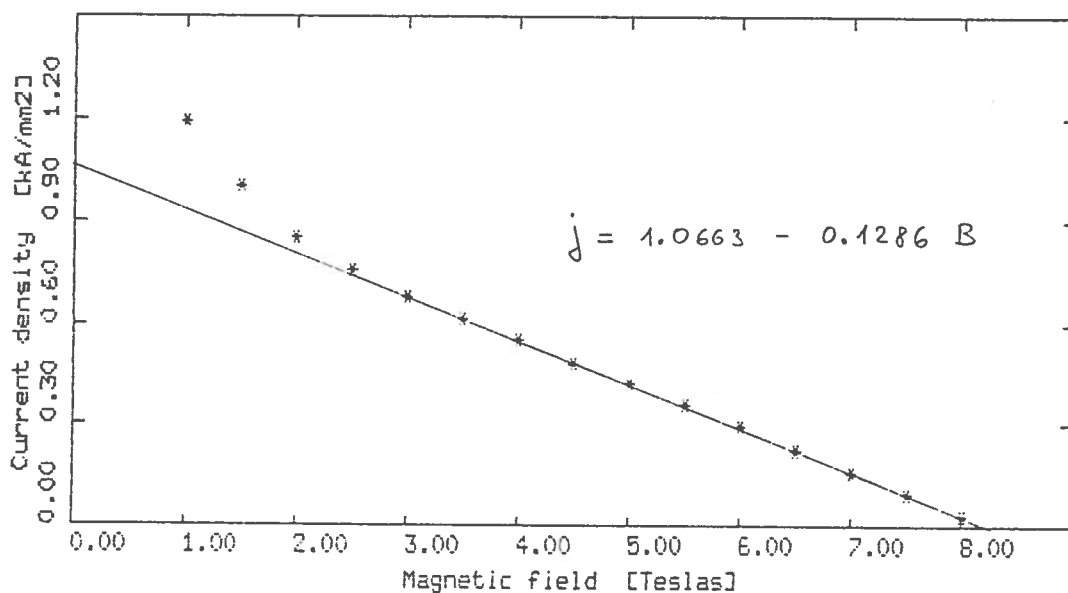


Fig.1

Critical current density for conductor 1 at 5.0°K

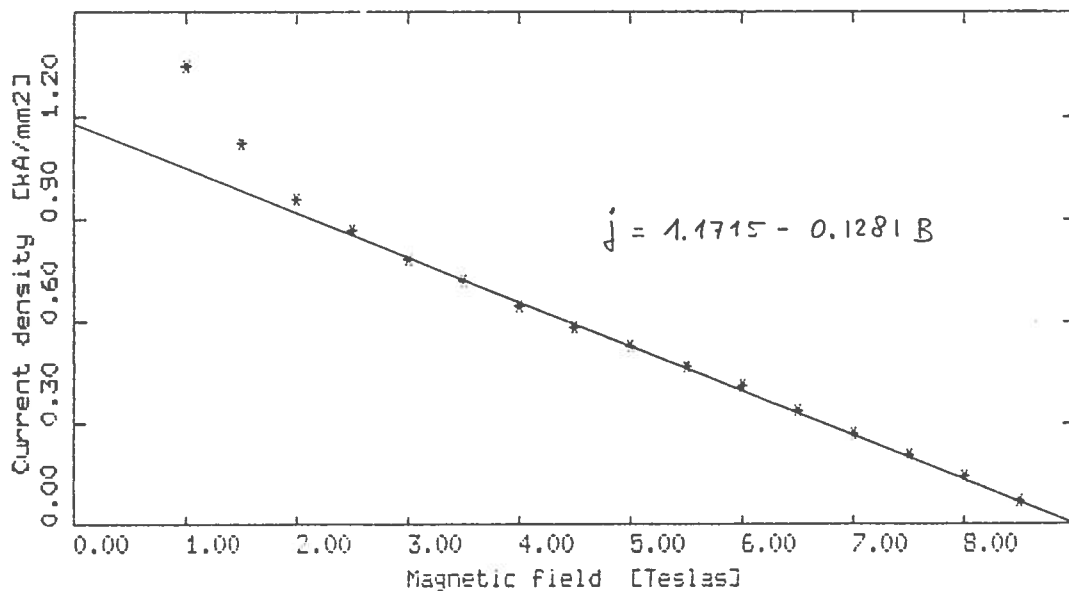


Fig.2

2.5 Montage de Helmholtz

Deux spires coaxiales de rayon R, parcourues chacune par un courant I, et séparées par une distance L créent un champ B relativement plat si R=L. Dans ce cas:

$$B_z = \frac{\mu_0 I}{R} \frac{8}{5\sqrt{5}} \left(1 - \frac{54}{25} \left(\frac{z}{R} \right)^4 \right) \quad (1)$$

Soit, pour Bz donné:

$$I = \frac{B_z R}{\mu_0} \frac{8}{5\sqrt{5}} = 11121 * B_z [T] * R [cm] \quad (2)$$

3. DESIGN 1 Rext à 77°K: 26 cm

=====

D'après le dessin (fig. 3) le plus petit rayon intérieur de la bobine est $a_1 = 13$ cm et le plus grand rayon extérieur $a_2 = 23$ cm. L'espace disponible en r n'étant que de 10 cm, on y met qu'une bobine. (Sur le dessin les axes r et z sont des axes de symétrie.)

Le rayon moyen est donc de 18 cm. Le nombre d'Ampères-tours nécessaires pour atteindre 6.09 Teslas (150 GHz) au centre des bobines vaut approximativement:

$$I = 11121 * 18 * 6.09 = 1.2 \text{ E}+06 \text{ At}$$

Vu l'écartement des bobines, le champ B_z présentera inévitablement 2 bosses et un minimum en $z = 0$, au milieu de la zone d'interaction. Il faut donc prendre pour I une valeur plus élevée, disons $1.4 \text{ E}+06 \text{ At}$. Admettant une densité de courant de l'ordre de 7000 A/cm^2 , la section d'une bobine aura 200 cm^2 . D'où les dimensions suivantes:

bobine	z1	z2	a1	a2	
1	7.	27.	13.	23.	[cm]
2	-27.	-7.	13.	23.	
3	-50.	-45.	10.	15.	(bucking coil)
4	-45.	-40.	10.	15.	(bucking coil)

Table la

Les courants et champs B maxima sur les conducteurs sont reportés dans les tables lb - ld ci-après pour 3 profils. Dans la colonne B_{max} , une (deux) astérisque(s) indique(ent) le dépassement du champ critique à 5.5 °K et 5.0 °K respectivement.

z cm	Bz	bobine	I MAt	j A/cm ²	Bmax conduc.	Bcrit @ 5.5°K	Bcrit @ 5.0°K
-3.2	6.09	1	2.051	10260	8.60 **	7.49	8.34
3.2	6.09	2	2.069	10345	8.61 **	7.49	8.34
-46.	0.295	3	0.075	2295	2.07	8.06	8.91
-45.	0.305	4	-0.312	12480	3.08	7.32	8.17

Table lb. Profil plat.

z cm	Bz	bobine	I MAt	j A/cm ²	Bmax conduc.	Bcrit @ 5.5°K	Bcrit @ 5.0°K
-3.2	6.27	1	1.800	8996	7.70 *	7.59	8.44
3.2	5.91	2	2.324	11620	9.51 **	7.39	8.24
-46.	0.295	3	0.083	3325	2.31	8.03	8.89
-45.	0.305	4	-0.349	13950	3.41	7.21	8.06

Table lc. Profil -6% sur 6.4 cm.

z cm	Bz	bobine	I MA	j A/cm ²	Bmax conduc.	Bcrit @ 5.5°K	Bcrit @ 5.0°K
-3.2	5.91	1	2.303	11520	9.50 **	7.40	8.25
3.2	6.27	2	1.814	9073	7.72 *	7.59	8.44
-46.	0.295	3	0.067	2665	1.83	8.08	8.94
-45.	0.305	4	-0.275	11000	2.74	7.44	8.29

Table 1d. Profil +6% sur 6.4 cm.

Le "profil plat" présente 2 maxima en z = ± 15.0 cm:

$$\frac{Bz(z = \pm 15.)}{Bz(z = 0.)} = \frac{7.19}{5.96} = 1.21$$

Le courant des "bucking coils" est indicatif. On a pas encore cherché à optimiser le champ dans la zone du canon d'électrons.

Sur la fig. 4 on a reporté j et Bmax pour les bobines 1 et 2. Par une règle de trois, on trouve la fréquence maximum atteignable avec ce design, en se fixant une marge de 1°K. Pour chaque profil, il suffit de tracer les droites reliant ces points à l'origine et de considérer les intersections avec la droite donnant le courant critique à 5.5 °K. Soit B' la plus grande de ces valeurs, alors Fmax = f * (B'/Bmax).

Profil plat: 150 * (7.77 / 8.60) = 131.7 GHz

- 6 % 150 * (7.55 / 9.50) = 119.2

+ 6 % 150 * (7.55 / 9.51) = 119.0

Self-inductances, Forces, énergie

		Profil plat			-6%		+6%		
tours	couches	Self H	Fz t	E kJ	Fz t	E kJ	Fz t	E kJ	
1	66	59	4.01	-93.6	625.0	-92.3	496.3	-92.2	768.9
2	66	59	4.01	108.3	627.1	110.6	771.9	103.8	497.2
3	16	29	0.06	-3.7	0.6	-4.7	0.7	-2.9	0.5
4	16	29	0.06	-11.0	0.7	-13.6	1.2	-8.7	0.4

Table 1e.

Conductor: width * height = 3.0 * 1.695 mm²

DESIGN 1

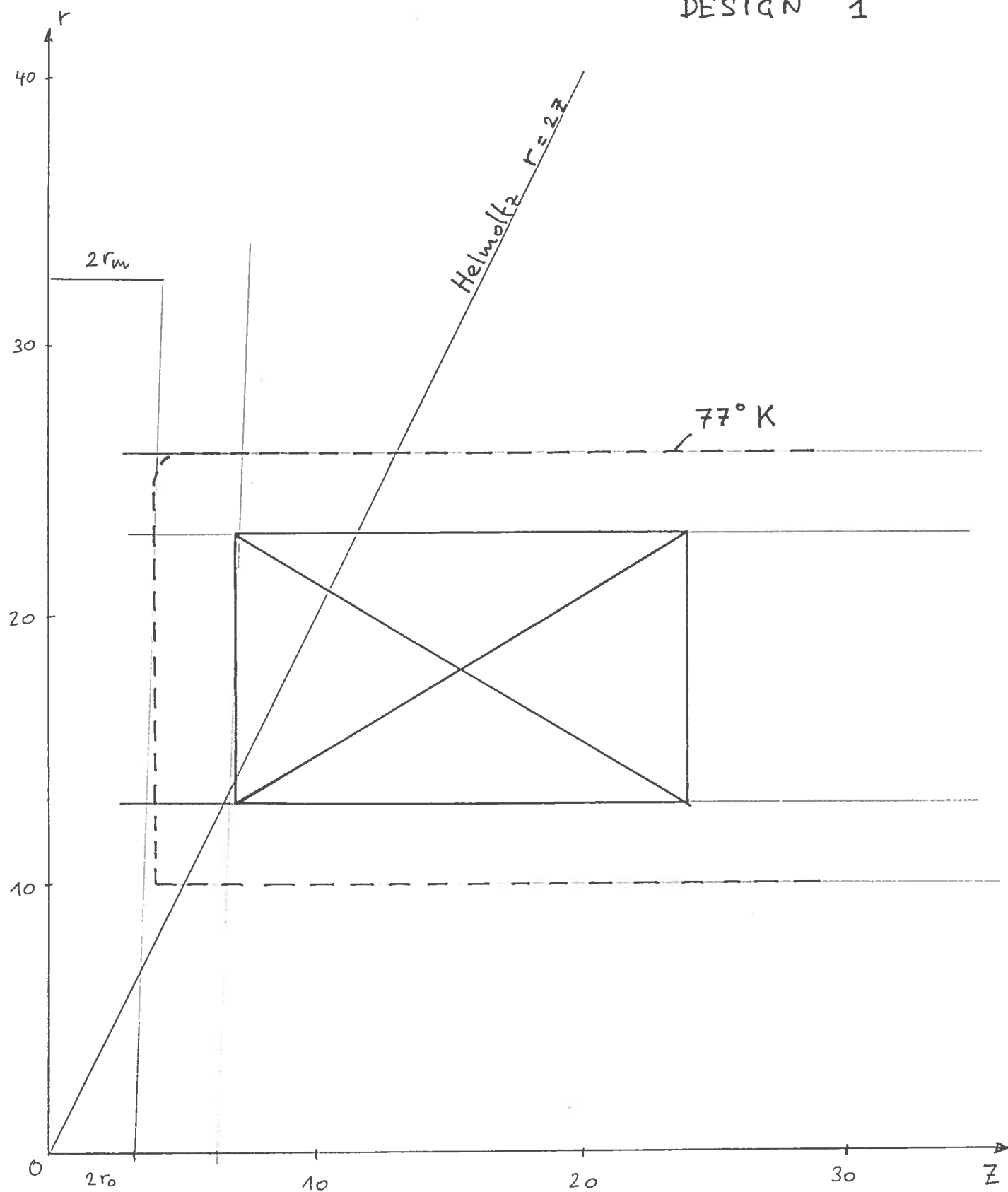


Fig. 3

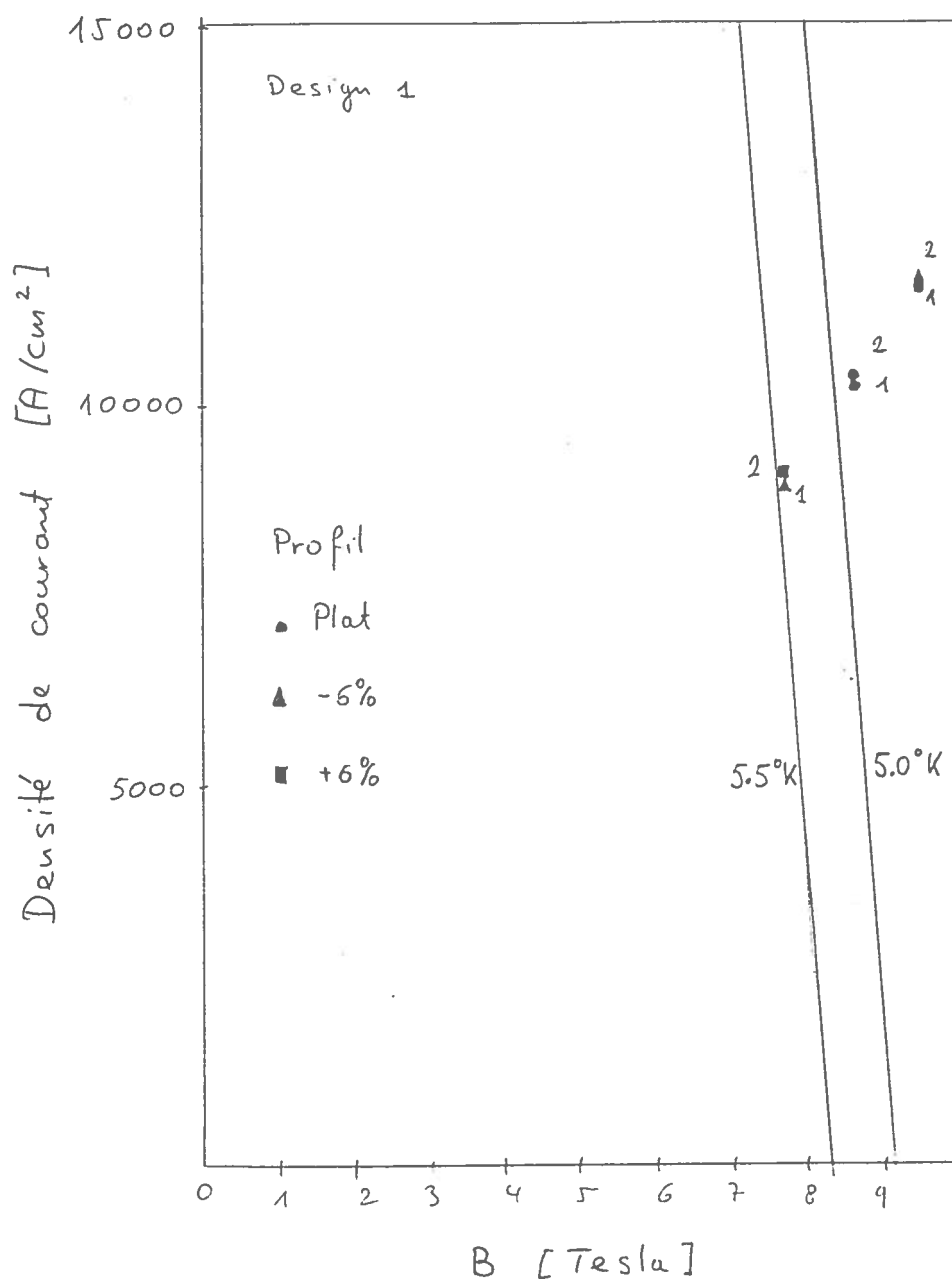


Fig. 4

4. DESIGN 2 Rext à 77°K: 30 cm
 =====

D'après le dessin (fig. 5) le plus petit rayon intérieur de la bobine est $a_1 = 13$ cm et le plus grand rayon extérieur $a_2 = 27$ cm. L'espace disponible en r est jugé suffisant pour y caser 2 bobines.

Le rayon moyen est donc de 20 cm. Le nombre d'Ampères-tours nécessaires pour atteindre 6.09 Teslas (150 GHz) au centre des bobines vaut approximativement:

$$I = 11121 * 20 * 6.09 = 1.35 \text{ E}+06 \text{ At}$$

L'écartement relatif des bobines est un peu moins marqué que dans le cas précédent. Néanmoins, prenons une valeur un peu plus élevée, soit $I = 1.5 \text{ E}+06 \text{ At}$. Avec $j = 7000 \text{ A/cm}^2$, la section d'une bobine aura environ 190 cm^2 . D'où les dimensions suivantes:

bobine	z1	z2	a1	a2	
1	7.	18.	13.	20.5	[cm]
2	-18.	-7.	13.	20.5	
3	8.	24.	21.	27.	
4	-24.	-8.	21.	27.	
5	-50.	-45.	10.	15.	(bucking coil)
6	-45.	-40.	10.	15.	(bucking coil)

Table 2a

Comme précédemment, les courants et champs B maxima sur les conducteurs sont reportés dans les 3 tables ci-après.

z cm	Bz	bobine	I MAt	j A/cm ²	Bmax conduc.	Bcrit @ 5.5°K	Bcrit @ 5.0°K
-3.2	6.09	1	0.435	5275	7.69	7.88	8.73
3.2	6.09	2	0.493	5977	7.75	7.83	8.68
-46.	0.295	3	1.428	14880	6.86	7.13	7.98
-45.	0.305	4	1.337	13920	6.52	7.21	8.06
		5	0.033	1310	1.72	8.19	9.04
		6	-0.255	10195	2.73	7.50	8.35

Table 2b. Profil plat.

z cm	Bz	bobine	I MAt	j A/cm ²	Bmax conduc.	Bcrit @ 5.5°K	Bcrit @ 5.0°K
-3.2	6.27	1	0.348	4214	6.82	7.96	8.82
3.2	5.91	2	0.582	7049	8.62 **	7.74	8.59
-46.	0.295	3	1.254	13070	6.16	7.28	8.13
-45.	0.305	4	1.512	15750	7.23 *	7.07	7.92
		5	0.037	1475	1.90	8.18	9.03
		6	-0.286	11430	3.02	7.40	8.25

Table 2c. Profil -6% sur 6.4 cm.

z cm	Bz	bobine	I MA	j A/cm ²	Bmax conduc.	Bcrit @ 5.5°K	Bcrit @ 5.0°K
-3.2	5.91	1	0.523	6336	8.57 *	7.80	8.65
3.2	6.27	2	0.405	4905	6.88	7.91	8.76
-46.	0.295	3	1.603	16695	7.56	6.99	7.84
-45.	0.305	4	1.162	12100	5.81	7.35	8.20
		5	0.029	1144	1.53	8.20	9.06
		6	-0.224	8958	2.44	7.60	8.45

Table 2d. Profil +6% sur 6.4 cm.

Le "profil plat" présente 2 maxima en z = ± 11.0 cm:

$$\frac{Bz(z = \pm 11.) - 6.3588}{6.0294 - 6.3588} = 1.055$$

Le courant des "bucking coils" est indicatif. On a pas encore cherché à optimiser le champ dans la zone du canon d'électrons.

Sur la fig. 6 on a reporté j et Bmax pour les bobines 1, 2, 3 et 4. Par la méthode décrite à la section 3, et avec les mêmes hypothèses, on trouve la fréquence maximum atteignable avec ce design:

Profil plat:	151.3 GHz
- 6 %	135.7
+ 6 %	137.4

Self-inductances, Forces, énergie

		Profil plat			-6%		+6%		
tours	couches	Self H	Fz t	E kJ	Fz t	E kJ	Fz t	E kJ	
1	36	44	0.81	9.5	129.5	0.8	93.5	21.8	171.0
2	36	44	0.81	-5.6	145.4	-17.9	188.7	3.2	107.7
3	53	35	1.77	-149.5	698.0	-138.7	554.9	-158.5	858.3
4	53	35	1.77	155.9	629.8	168.6	782.2	141.6	493.8
5	16	29	0.06	-1.3	0.2	-1.6	0.3	-1.0	0.2
6	16	29	0.06	-9.0	0.1	-11.2	0.0	-7.1	0.3

Table 2e.

Conductor: width * height = 3.0 * 1.695 mm²

DESIGN 2

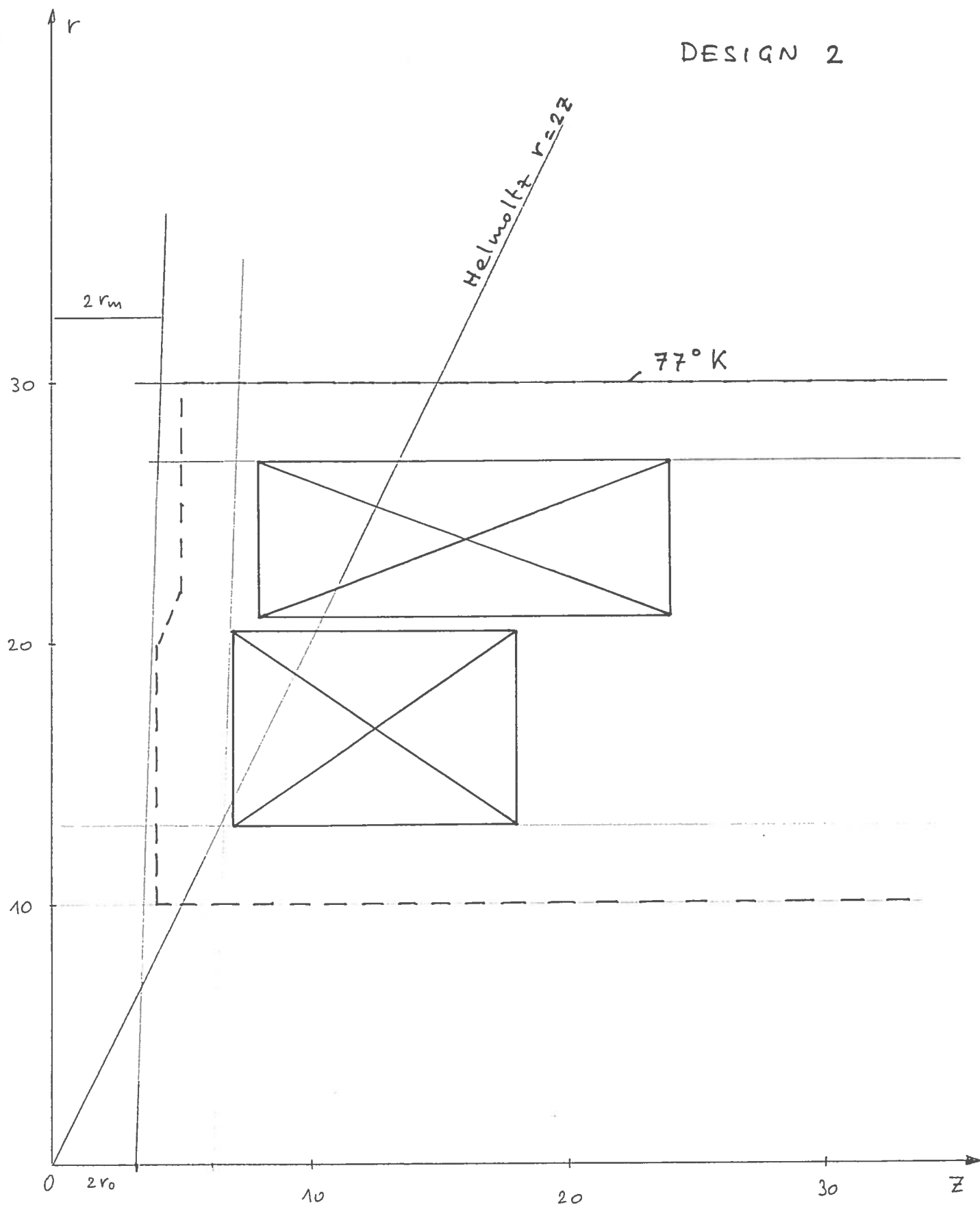


Fig 5

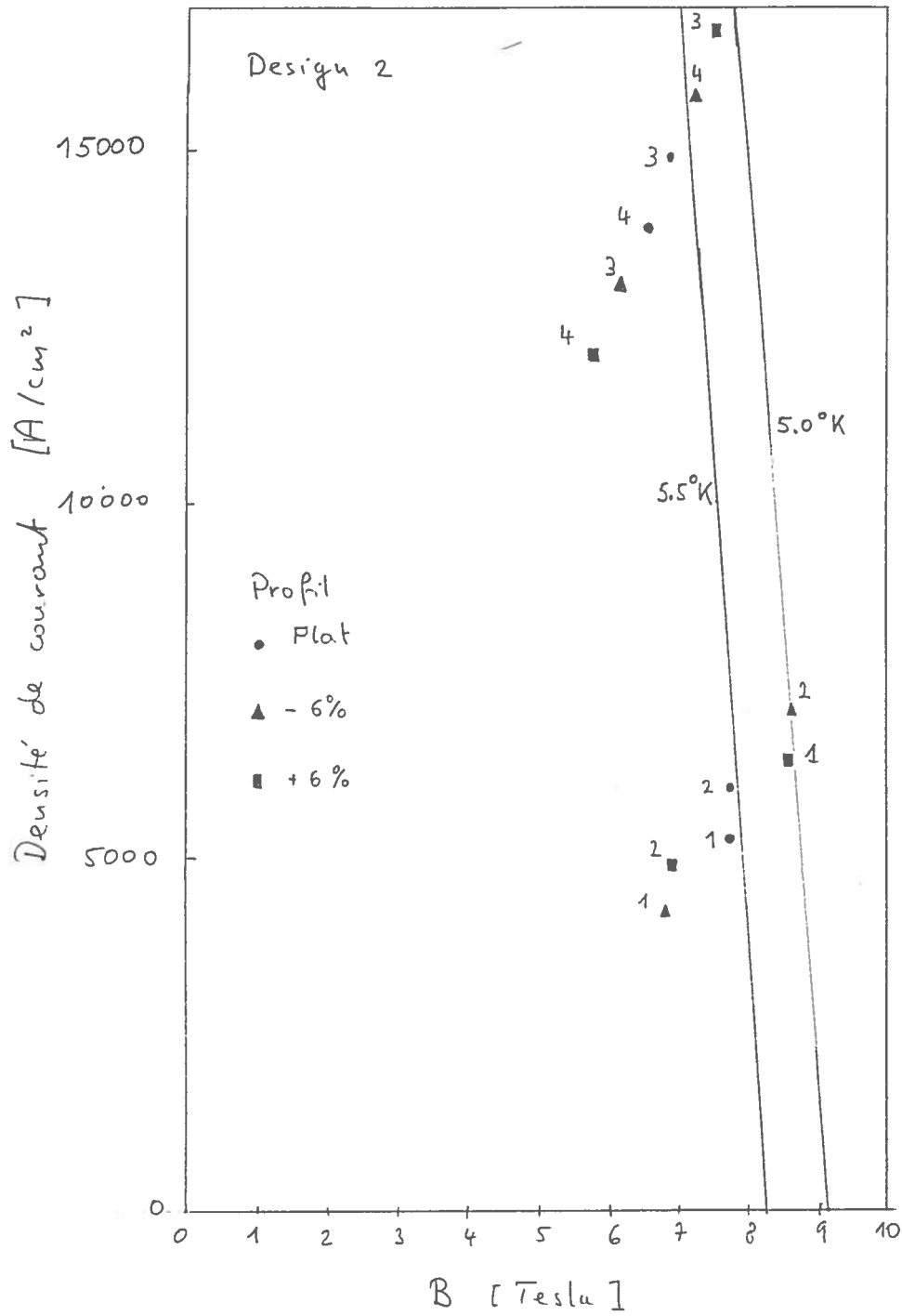


Fig. 6

5. DESIGN 3 Rext à 77°K: 34 cm
 =====

D'après le dessin (fig. 7) le plus petit rayon intérieur de la bobine est $a_1 = 13$ cm et le plus grand rayon extérieur $a_2 = 31$ cm. L'espace disponible en r est jugé suffisant pour y caser 3 bobines.

Le rayon moyen est donc de 22 cm. Le nombre d'Ampères-tours nécessaires pour atteindre 6.09 Teslas (150 GHz) au centre des bobines vaut approximativement:

$$I = 11121 * 22 * 6.09 = 1.5 \text{ E}+06 \text{ At}$$

Prenant $j = 7000 \text{ A/cm}^2$, cela nous conduit à une surface de 210 cm². D'où les dimensions suivantes:

bobine	z1	z2	a1	a2	
1	7.	15.	13.	18.	[cm]
2	-15.	-7.	13.	18.	
3	7.5	20.	18.5	24.	
4	-20.	-7.5	18.5	24.	
5	8.	26	24.5	31.	
6	-26.	-8.	24.5	31.	
7	-55.	-50.	10.	15.	(bucking coil)
8	-50.	-45.	10.	15.	(bucking coil)

Table 3a

Comme précédemment, les courants et champs B maxima sur les conducteurs sont reportés dans les 3 tables ci-après.

z cm	Bz	bobine	I MAt	j A/cm ²	Bmax conduc.	Bcrit @ 5.5°K	Bcrit @ 5.0°K
-3.2	6.09	1	0.089	2224	7.10	8.12	8.97
3.2	6.09	2	0.108	2710	7.01	8.08	8.93
-46.	0.295	3	0.335	4871	7.35	7.91	8.76
-45.	0.305	4	0.338	4922	7.22	7.91	8.76
		5	1.595	13630	6.87	7.23	8.08
		6	1.545	13220	6.71	7.26	8.11
		7	0.008	315	1.72	8.27	9.12
		8	-0.234	9356	2.65	7.56	8.41

Table 3b. Profil plat.

z cm	Bz	bobine	I MAt	j A/cm ²	Bmax conduc.	Bcrit @ 5.5°K	Bcrit @ 5.0°K
-3.2	6.27	1	0.106	2661	6.34	8.08	8.94
3.2	5.91	2	0.184	4590	8.00 *	7.93	8.79
-46.	0.295	3	0.393	5718	6.31	7.85	8.70
-45.	0.305	4	0.404	5875	7.95 *	7.83	8.69
		5	1.088	9299	5.11	7.57	8.42
		6	1.752	14970	7.39 *	7.13	7.98
		7	0.011	428	1.87	8.26	9.11
		8	-0.260	10410	2.90	7.48	8.33

Table 3c. Profil -6% sur 6.4 cm.

z cm	Bz	bobine	I MA	j A/cm ²	Bmax conduc.	Bcrit @ 5.5°K	Bcrit @ 5.0°K
-3.2	5.91	1	0.212	5304	8.11 *	7.88	8.73
3.2	6.27	2	0.163	4068	6.53	7.98	8.83
-46.	0.295	3	0.439	6385	7.86 *	7.80	8.85
-45.	0.305	4	0.431	6275	6.07	7.80	8.66
		5	1.664	14225	7.06	7.19	8.03
		6	0.943	8058	4.61	7.67	8.52
		7	0.011	345	1.29	8.26	9.12
		8	-0.260	6803	2.00	7.76	8.61

Table 3d. Profil +6% sur 6.4 cm.

Le "profil plat" présente 2 maxima en $z = \pm 9.0$ cm:

$$\begin{aligned} Bz (z = \pm 9.) &= 6.1778 \\ \text{-----} &= \text{-----} = 1.019 \\ Bz (z = 0.) &= 6.0628 \end{aligned}$$

Le courant des "bucking coils" est indicatif. On a pas encore cherché à optimiser le champ dans la zone du canon d'électrons.

Sur la fig. 8 on a reporté j et B_{max} pour les bobines 1 à 6. Par la méthode décrite à la section 3, et avec les mêmes hypothèses, on trouve la fréquence maximum atteignable avec ce design:

Profil plat:	157.2 GHz
- 6 %	145.5
+ 6 %	148.8

Self-inductances, Forces, énergie

		Profil plat			-6%		+6%		
tours	couches	Self H	Fz t	E kJ	Fz t	E kJ	Fz t	E kJ	
1	26	29	0.20	2.5	22.0	-0.3	23.7	11.0	58.1
2	26	29	0.20	-2.5	26.6	-9.2	50.2	1.3	36.6
3	41	32	0.82	2.4	153.8	-17.1	155.9	10.9	215.7
4	41	32	0.82	0.8	153.1	-10.5	200.6	25.8	165.1
5	60	38	3.16	-208.1	1040.	-165.4	572.1	-192.4	1123.
6	60	38	3.16	213.8	985.2	213.4	1216.	151.0	459.8
7	16	29	0.06	-0.3	0.0	-0.4	0.0	-0.5	0.0
8	16	29	0.06	-8.6	0.4	-10.5	0.3	-7.1	2.6

Table 3e.

Conductor: width * height = 3.00 * 1.695 mm²

DESIGN 3

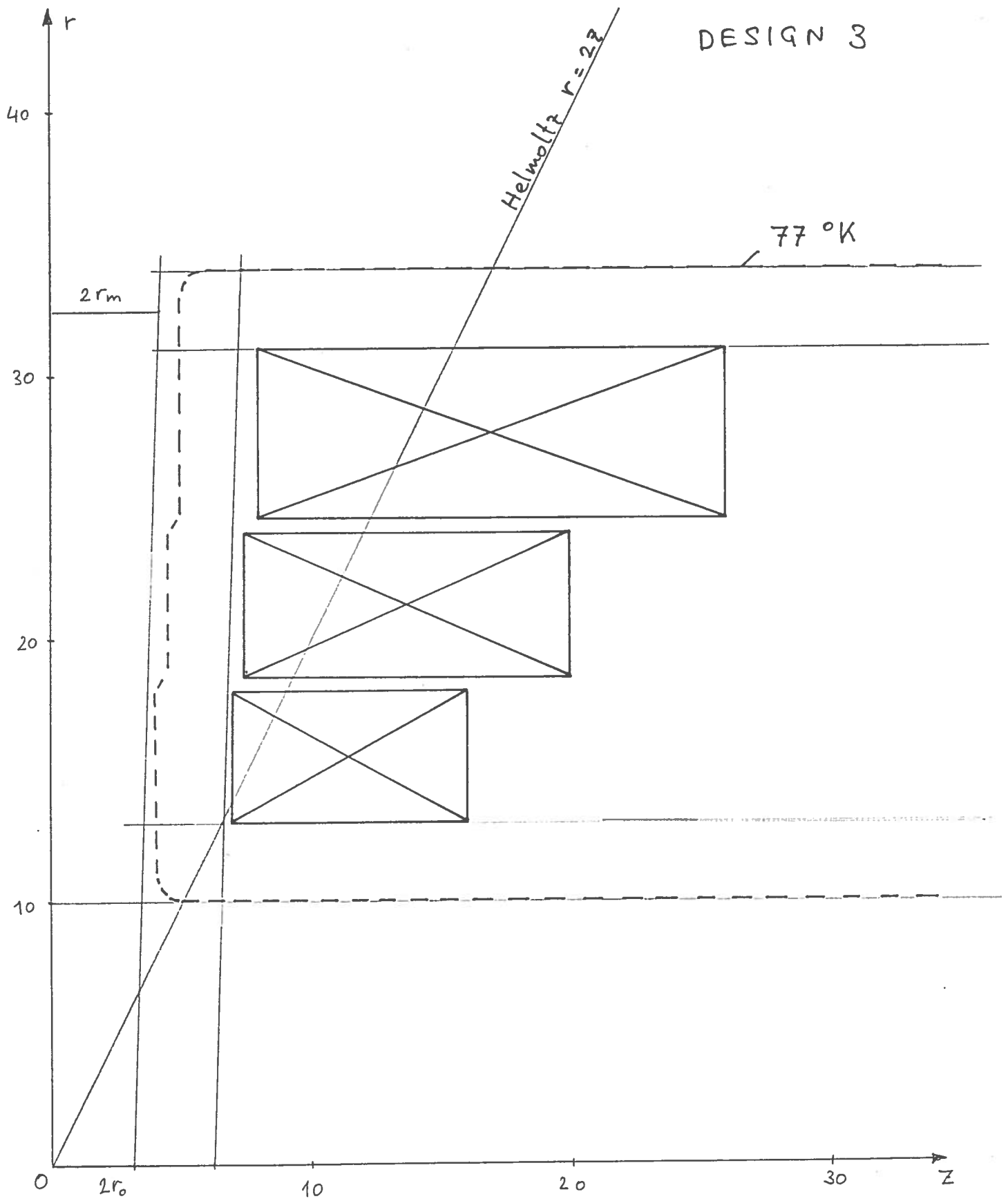


Fig. 7

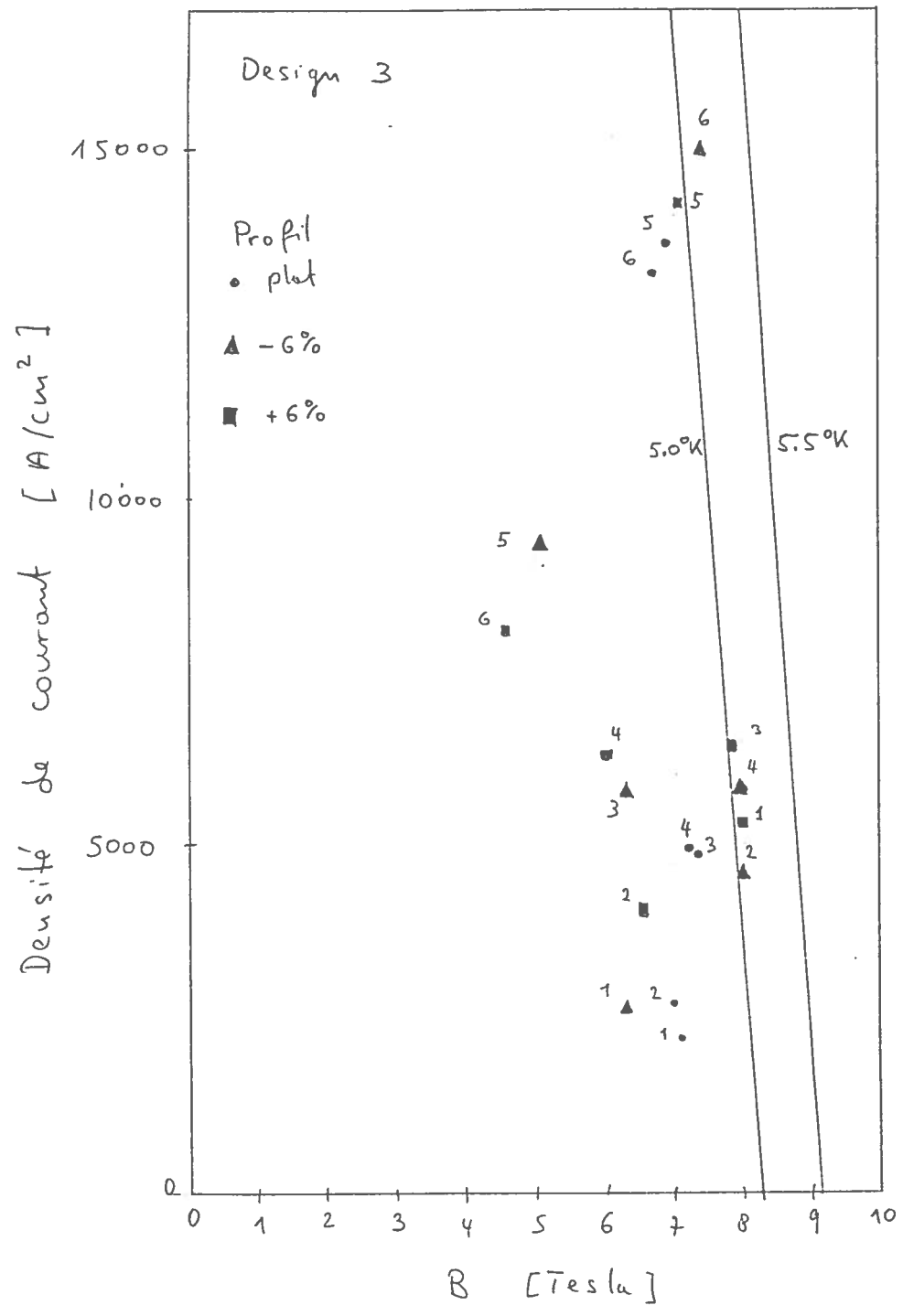


Fig. 8

6. Conclusions provisoires

=====

La fig. 9 résume les fréquences qu'il est possible d'atteindre. Avec le type de supraconducteur considéré, il semble que 150 GHz soit possible. Les densités de courant sont cependant assez élevées dans certaines bobines (10000 à 15000 A/cm²).

Dans le design 3, on pourrait augmenter la largeur ($z_2 - z_1$) des bobines puisque B_z est plat à 1.9 % près dans la zone d'interaction, ce qui est très (trop) bon.

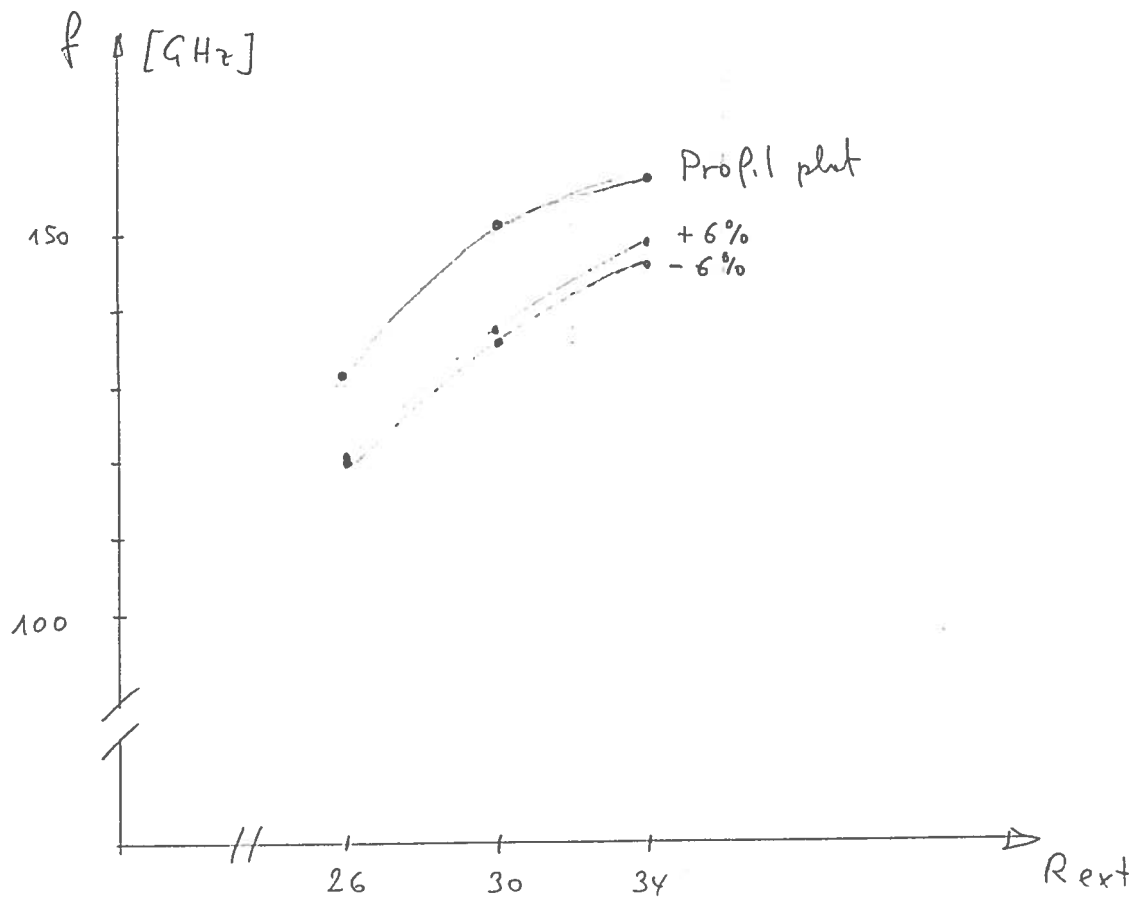


Fig. 9

APPENDICE A Le gyrotron actuel du CRPP

=====

Dimensions des bobines:

bobine	z1	z2	a1	a2	spires
1	0.	18.	24.	44. [cm]	7128
2	38.	56.	24.	44.	7128
3	-27.	-19.8	9.5	15.	2520 (bucking coil)
4	-19.2	-12.	9.5	15.	2520 (bucking coil)

Table 4a

Les courants et champs B maxima sur les conducteurs sont reportés dans les 4 tables ci-après.

z cm	Bz	bobine	I MA	j A/cm ²	Bmax conduc.	Bcrit @ 5.5°K	Bcrit @ 5.0°K
24.8	4.874	1	2.027	5629	6.62	7.85	8.71
31.2	4.874	2	1.976	5489	6.52	7.86	8.72
-22.5	0.244	3	-0.127	3198	2.19	8.04	8.90
-21.5	0.244	4	-0.272	6861	3.52	7.76	8.61

Table 4b. Profil plat.

z cm	Bz	bobine	I MA	j A/cm ²	Bmax conduc.	Bcrit @ 5.5°K	Bcrit @ 5.0°K
24.8	5.020	1	2.537	7048	7.88 *	7.74	8.59
31.2	4.728	2	1.471	4086	5.28	7.97	8.83
-22.5	0.244	3	-0.152	3832	2.56	7.99	8.85
-21.5	0.244	4	-0.321	8110	4.14	7.66	8.51

Table 4c. Profil -6% sur 6.4 cm.

z cm	Bz	bobine	I MA	j A/cm ²	Bmax conduc.	Bcrit @ 5.5°K	Bcrit @ 5.0°K
24.8	4.728	1	1.516	4211	5.38	7.96	8.82
31.2	5.020	2	2.481	6893	7.76 *	7.76	8.61
-22.5	0.244	3	-0.102	2563	1.82	8.09	8.95
-21.5	0.244	4	-0.222	5612	2.91	7.86	8.71

Table 4d. Profil +6% sur 6.4 cm.

z cm	Bz	bobine	I MA	j A/cm ²	Bmax conduc.	Bcrit @ 5.5°K	Bcrit @ 5.0°K
24.8		1	2.7	7500	8.22 *	7.71	8.56
31.2		2	1.14	3167	4.42	8.05	8.90
-22.5		3	-0.215	5429	2.81	7.87	8.72
-21.5		4	-0.215	5429	3.89	7.87	8.72

Table 4e. "Gradient mode" (contrat).

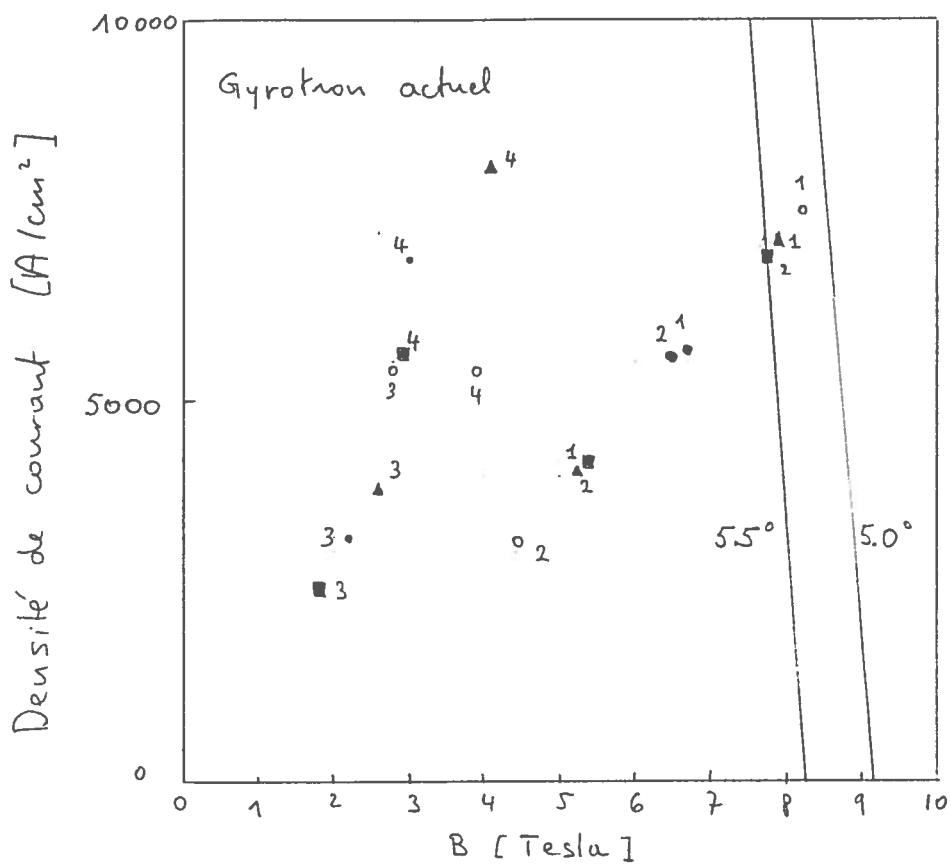
Sur la fig. 10 on a reporté j et Bmax pour les bobines 1 à 4. Par la méthode décrite à la section 3, et avec les mêmes hypothèses, on trouve la fréquence maximum atteignable avec ce design:

Profil plat:	141.0 GHz
- 6 %	118.0
+ 6 %	120.0
"gradient"	112.5

Self-inductances, Forces, énergie

Self H	Profil plat		gradient		+6%	
	Fz t	E kJ	Fz t	E kJ	Fz t	E kJ
32.8	254.7	1602.	204.5	2556.	234.2	1006.
32.8	-237.1	1550.	-182.7	642.0	-222.5	2259.
1.55	1.3	0.8	-1.5	1.6	0.8	0.6
1.55	-18.9	3.6	-20.3	5.8	-12.5	2.5

Table 5e.



- Flat
- Gradient
- ▲ -6%
- +6%

fig. 10