

DPh-PFC-SIG

EUR-CEA-FC-978

ETUDE EXPERIMENTALE DES PERTES ET DES  
CHAMPS MAGNETIQUES DE BOBINES INSEREES DANS  
UNE ENCEINTE METALLIQUE POUR L'APPLICATION  
DU CHAUFFAGE PAR T.T.M.P.

J. BROSSAUD, J.P. PERIN, G. REY

Novembre 1978

CEA  
EURATOM

ASSOCIATION EURATOM-CEA

92260 Fontenay-aux-Roses (France)

DEPARTEMENT DE PHYSIQUE DU PLASMA  
ET DE LA FUSION CONTROLEE

J. BROSSAUD, J.P. PERIN, G. REY

ASSOCIATION EURATOM-CEA  
Département de Physique du Plasma et de la Fusion Contrôlée  
Service TGN - Centre d'Etudes Nucléaires  
85 X - 38041 GRENOBLE CEDEX (France)

RESUME :

Cette étude a pour but d'optimiser la configuration magnétique du T.T.M.P. dans le cas du Tokamak PETULA pour une ou trois longueurs d'onde.

Dans cette optique les dépendances de la distribution du champ magnétique et des caractéristiques électriques ( $R_{\text{eff}}$ , Q, L) de bobines intérieures à une enceinte métallique ont été étudiées en fonction des paramètres suivants :

- position et nombre des bobines.
- rayon et largeur des bobines.
- nombre de longueurs d'onde le long de l'axe du tore.

ABSTRACT :

The purpose of this work is the improvement of the T.T.M.P. configuration in the Tokamak PETULA in the case of one or three wavelengths.

The variation of the magnetic field distribution and the electrical characteristics coils ( $R_{\text{eff}}$ , Q, L) inside a metallic liner have been studied as functions of :

- position and number of coils.
- radius and width of coils.
- number of wavelengths along the axis of torus.

TABLE DES MATIERES

- INTRODUCTION
- ETUDE DE LA DISTRIBUTION DU CHAMP MAGNETIQUE
- ETUDE DES CIRCUITS COUPLES
- DESCRIPTION DE L'EXPERIENCE  
METHODE DE MESURE  $L, R //$
- RESULTATS DES BOBINES 2 TOURS  
RESULTATS DES BOBINES 1 TOUR  
DEPENDANCE FONCTIONNELLE ET POSSIBILITE D'EXTRAPOLATION
- APPLICATION A PELUTA
- CONCLUSION ET APPLICATION A DES MACHINES DE PLUS GRANDES TAILLES
- ANNEXE ECRAN ELECTROSTATIQUE

-----

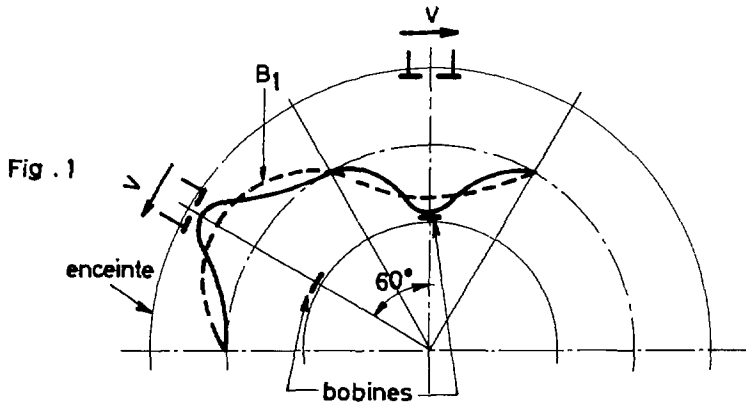
REALISATION DE LA CONFIGURATION MAGNETIQUE DU T.T.M.P.

D'une manière sommaire, une onde électromagnétique ayant une vitesse de phase  $v_\phi$  pourra communiquer de l'énergie à des ions animés d'une vitesse thermique moyenne  $v_i$ , lorsque ces deux vitesses seront voisines.

$$v_\phi = \lambda f = v_i = \sqrt{\frac{2kT_i}{M}}$$

où  $f$  est la fréquence d'oscillation de l'onde,  $M$  et  $T_i$  la masse et la température des particules et  $\lambda$  la longueur d'onde  $\lambda = \frac{2\pi R}{N_\lambda}$  où  $R$  est le grand rayon du tore et  $N_\lambda$  le nombre de longueurs d'onde.

La réalisation d'une onde de ce type est illustrée par la figure 1.



En attaquant en opposition de phase deux bobines, on obtient, à un instant donné, une distribution spatiale du champ magnétique indiqué en trait plein sur la figure, cette distribution se décompose en série de Fourier, l'harmonique 1 est indiqué en pointillé.

Le diamètre, la largeur, le nombre, et la position des bobines entre elles et par rapport à l'enceinte sont les paramètres qui permettent l'optimisation des bobines pour l'application du T.T.M.P.

#### BUT DE L'ETUDE.

Pour s'affranchir des problèmes liés à l'introduction de bobines à l'intérieur d'une enceinte classique métallique (pertes, champ électrique, matériau constituant la bobine), les bobines de PETULA ont été montées à l'extérieur d'une enceinte diélectrique permettant la pénétration du champ magnétique.

L'enceinte en alumine a été choisie à la fois pour ses excellentes propriétés électriques et ses bonnes caractéristiques dans l'ultra vide et au bombardement de particules énergétiques.

Néanmoins, toutes les grosses machines se construisent en utilisant des chambres à vide métalliques ; l'application du chauffage par T.T.M.P. est un objectif qui demande que les contraintes imposées par ce type de configuration soient étudiées.

L'étude expérimentale a consisté à mesurer les champs magnétiques et les caractéristiques électriques ( $R_{ff}$ ,  $Q$ ,  $L$ ) de bobines intérieures à une enceinte en acier inoxydable, en fonction du couplage entre l'enceinte et la bobine.

Une optimisation a été recherchée dans le cas de PETULA avec ses contraintes spécifiques (accès disponible, démontabilité des bobines, étude à 3 longueurs d'onde...).

Le plan de l'étude se décompose de la façon suivante :

- a) - Etude de la distribution du champ magnétique et recherche de la position des bobines pour obtenir une distribution spatiale quasi sinusoïdale dans le cas de trois longueurs d'onde.
- b) - Etude théorique simplifiée qui permet de prévoir l'évolution fonctionnelle des différents paramètres.
- c) - Etude expérimentale sur la maquette qui donne les résultats des mesures.
- d) - Discussion des résultats et possibilités d'extrapolation.
- e) - Application à PETULA.
- f) - Conclusion, extrapolation à des machines de grande taille, (TORE H.F., etc...).

En annexe l'étude de l'efficacité et minimisation des pertes d'un écran électrostatique incorporé à la bobine.

DISPOSITION DES BOBINES T.T.M.P. POUR OBTENIR UNE OU TROIS

LONGUEURS D'ONDE DANS LE TOKAMAK " PETULA".

Dans le cas de Pétula, compte tenu des queusots d'observation et des bobines  $B_\theta$ , nous pouvons avoir au plus 4 dispositions possibles pour les bobines T.T.M.P. :

- . soit deux bobines accolées (cas actuel de PETULA)
- . soit deux bobines écartées de  $15^\circ$
- . soit deux bobines écartées de  $30^\circ$
- . soit trois bobines disposées de  $15^\circ$  en  $15^\circ$ .

CAS DE TROIS LONGUEURS D'ONDE :

Pour étudier ces quatre configurations, un calcul préliminaire a été effectué en considérant les bobines toutes seules dans l'espace en géométrie cylindrique (plans des bobines parallèles).

Ce calcul a été complété par des mesures faites dans la configuration torique à vide (bobines seules dans l'espace) et en charge (bobines dans l'enceinte métallique).

Le champ magnétique créé par une bobine en un point de l'axe peut s'écrire :

$$B = \frac{\mu_0 i N}{2a} \sin^3 \theta$$

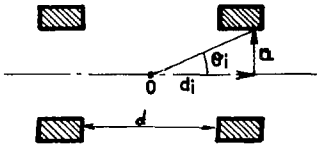
ou si  $L$  est l'inductance de cette bobine :

$$B = \frac{\mu_0 V N}{2a L \omega} \sin^3 \theta \quad \text{soit } B/V = K \frac{V}{\omega} \sin^3 \theta$$

avec  $K = \frac{\mu_0 N}{2a L}$  constante d'une bobine unique.

La mise en parallèle de plusieurs bobines donne au centre un champ résultant :

$$B = \sum_i \frac{\mu_0 N}{2a} \frac{V}{L'\omega} \sin^3 \theta_i$$



$$\text{où } \theta_i = \arctg \frac{a}{d_i}$$

$N$  :: nombre de spires

$a$  = rayon de la bobine

$d_i$  = distance du plan de la bobine au centre du système.

où  $L'$  est l'inductance présentée par chaque bobine en présence des autres, (pour 2 bobines  $L' = L + M(d)$ ,  $M(d)$  mutuelle entre les 2 bobines).

$$B/V = \sum_i K \frac{L}{L'\omega} \sin^3 \theta_i \quad (1)$$

soit  $R_{//}$  la résistance parallèle d'une bobine seule, la résistance présentée par deux bobines mises en parallèle sera :

$$R'_{//} = \frac{R_{//}}{2} \left(1 + \frac{M}{L}\right)^2$$

A puissance constante  $P$  la tension maximale applicable aux bobines sera :

$$V = (PR'_{//})^{1/2} \left(1 + \frac{M}{L}\right) \quad \text{avec } V_1 = (PR_{//})^{1/2}$$

$$B = \sum_i K V_1 \frac{L}{L'\omega} \sin^3 \theta_i \quad (2)$$



en tout point de l'axe la distribution du champ magnétique est donnée par :

$$f(x) = \sum_i \sin^3 \arctg \left| \frac{a}{x-d_i} \right| \quad (3)$$

où  $x$  représente la distance du point considéré à l'origine et  $d_i$  les abscisses des centres des bobines.

Dans les différentes configurations, on peut calculer, par décomposition en série de Fourier, la valeur du fondamental de la distribution du champ magnétique sur l'axe.

Dans le cas suivant :

$L = 2,9 \mu\text{H}$  bobine de 2 spires -

$a = 183 \text{ mm}$

largeur  $\varnothing 42 \text{ mm}$

diamètre de l'enceinte en acier inoxydable : 462 mm

puissance H.F. 10 MW - fréquence 200 kHz

Le tableau A récapitule, dans les quatre configurations étudiées, les résultats obtenus sur  $B/V$ , le B fondamental, et la tension aux bornes des bobines, par le modèle cylindrique et expérimentalement à vide et en charge.

T A B L E A U   A

3 longueurs d'onde, P = 10 MW, f = 200 kHz

		2 bobines accolées	2 bobines à 15°	2 bobines à 30°	3 bobines à 15°
B/V au centre de la configuration	modèle cylindrique	0,88 K/ω 16,6 G/kV	1,18 K/ω 22,2 G/kV	0,98 K/ω 18,5 G/kV	1,45 K/ω 27,3 G/kV
	expérimental à vide expérimental en charge		21,3 G/kV  16,6 G/kV	17,7 G/kV  14 G/kV	18,4 G/kV
B̃ fondamental (Gauss)	modèle cylindrique	1,36 K/ω V <sub>1</sub> 25,4 V <sub>1</sub> (kV)	1,33 K/ω V <sub>1</sub> 25,1 V <sub>1</sub> (kV)	1,01 K/ω V <sub>1</sub> 19,1 V <sub>1</sub> (kV)	1,36 K/ω 25,6 V <sub>1</sub> (kV)
	expérimental à vide expérimental en charge		750 G  320 G	580 G  255 G	285 G
V Max. aux bornes des bobines	modèle cylindrique	1,54 V <sub>1</sub>	1,13 V <sub>1</sub>	1,03 V <sub>1</sub>	0,94 V <sub>1</sub>
	expérimental à vide expérimental en charge		35 kV  19 kV	32 kV  18 kV	15,5 kV

### CONCLUSION

Le tableau A montre que la disposition à retenir est la disposition de deux bobines à 15° par sixième.

Les mesures effectuées sur les deux sixièmes prototypes montrent que le couplage prépondérant est celui entre bobine et liner, et que la mutuelle entre les bobines ne joue pratiquement pas.

Si  $R_{//}$  est la résistance parallèle d'une seule bobine dans le liner nous aurons :

$$\text{pour deux bobines } R'_{//} \approx \frac{R_{//}}{2}$$

$$\text{pour trois bobines } R''_{//} \approx \frac{R_{//}}{3}$$

Ceci explique que le cas de 3 bobines soit moins favorable. (La tension applicable aux bobines étant plus faible).

On notera d'autre part, que le modèle cylindrique permet d'approcher convenablement les configurations étudiées.

CAS D'UNE LONGUEUR D'ONDE

Pour réaliser une longueur d'onde il faut alimenter les bobines T.T.M.P. en phase par demi tore.

Trois cas ont été étudiés:

- . 3 groupes de deux bobines à 15°
- . 3 groupes de deux bobines à 30°
- . 3 groupes de trois bobines à 15°

La vitesse de phase d'une onde est donnée par :

$$v_{ph} = f\lambda \cdot$$

Pour une même vitesse de phase, travailler à une longueur d'onde au lieu de trois, permet de diviser la fréquence par trois.

La résistance parallèle varie comme  $\omega^{3/2}$ .

A puissance constante 'P' nous avons :

$$V = (2PR)^{1/2} \text{ d'où } V \text{ varie comme } \omega^{3/4}$$

$$\frac{B}{V} \sim \frac{1}{\omega} \text{ d'où } B \sim \omega^{-1/4}$$

Donc si l'on passe de trois à une longueur d'onde :

V est multiplié par 0,44

B est multiplié par 1,32

Le  $\tilde{B}$  fondamental est recalculé en décomposant en série de Fourier, la nouvelle configuration magnétique.

Le tableau B indique, pour P = 10 MW, f = 200/3 kHz et l longueur d'onde, les valeurs des différents paramètres pour les trois configurations.

TABLEAU B

(1 longueur d'onde - P = 10 MW, f =  $\frac{200}{3}$  kHz)

		2 bobines à 15°	2 bobines à 30°	3 bobines à 15°
R/V	modèle cylindrique expérimental à vide expérimental en charge	0,97 $\frac{K}{\omega}$ 52,5 G/kV 40,8 G/kV	.94 $\frac{K}{\omega}$ 49 G/kV 39 G/kV	1.45 $\frac{K}{\omega}$  54 G/kV
$\vec{B}$ fondamental (Gauss)	modèle cylindrique expérimental à vide expérimental en charge	0,48 $\frac{k}{\omega} V_1$ 810 G 340 G	.42 $\frac{K}{\omega} V_1$ 686 G 312 G	0,59 $\frac{K}{\omega} V_1$  380 G
V Max. aux bornes des bobines	modèle cylindrique expérimental à vide expérimental en charge	0,5 V1 15,4 kV 8,4 kV	0,45 V1 14 kV 8 kV	0,41 V1  7 kV

LEGENDE DES GRAPHIQUES.

- Fig. 1 - Distribution du champ magnétique d'une seule bobine le long de l'axe du tore.
- Fig. 2 - Distribution du champ magnétique de 2 bobines à  $15^\circ$  le long de l'axe du tore dans le cas de 3 longueurs d'onde.
- Fig. 3 - Distribution du champ magnétique de 2 bobines à  $30^\circ$  le long de l'axe du tore dans le cas de 3 longueurs d'onde.
- Fig. 4 - Distribution du champ magnétique de 3 bobines à  $15^\circ$  le long de l'axe du tore dans le cas de 3 longueurs d'onde.
- Fig. 5 - Distribution du champ magnétique le long de l'axe du tore de 3 groupes de 2 bobines à  $15^\circ$  dans le cas d'une longueur d'onde.
- Fig. 6 - Distribution du champ magnétique le long de l'axe du tore de 3 groupes de 2 bobines à  $30^\circ$  dans le cas d'une longueur d'onde.
- Fig. 7 - Distribution du champ magnétique le long de l'axe du tore de 3 groupes de 3 bobines à  $15^\circ$  dans le cas d'une longueur d'onde.

N.B. - Pour ces trois dernières figures, les courbes ont été obtenues par superposition des distributions soit de la figure 2, soit de la figure 3, soit de la figure 4.

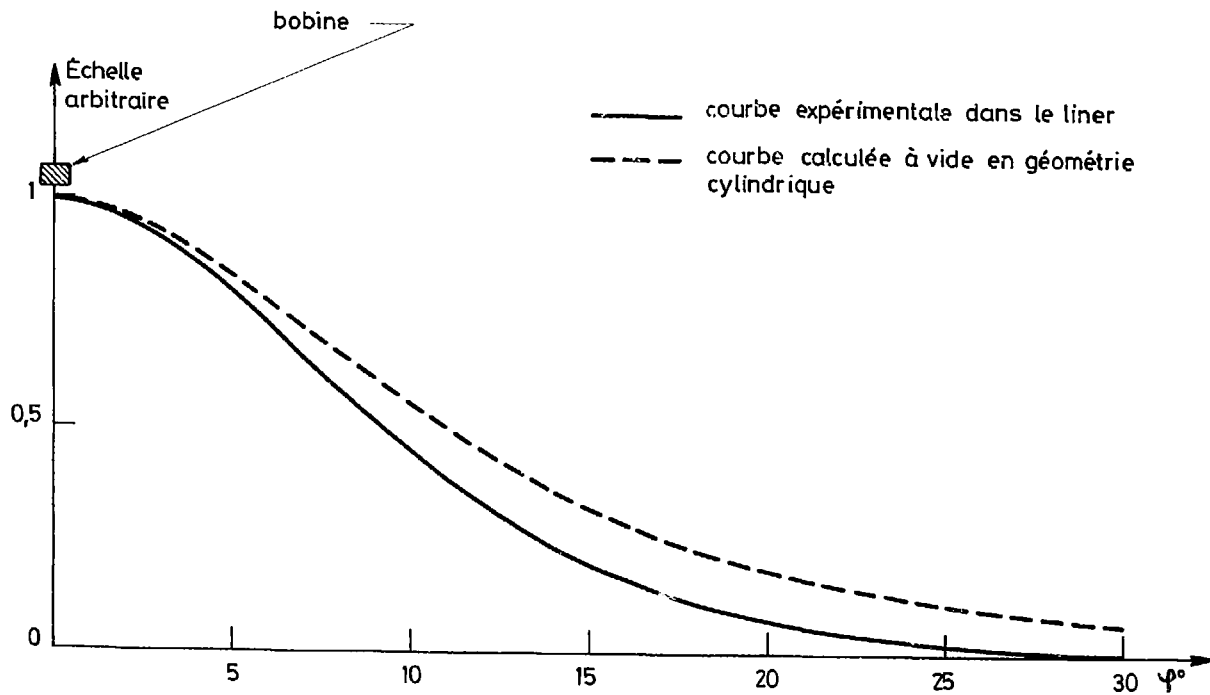


Fig . 1

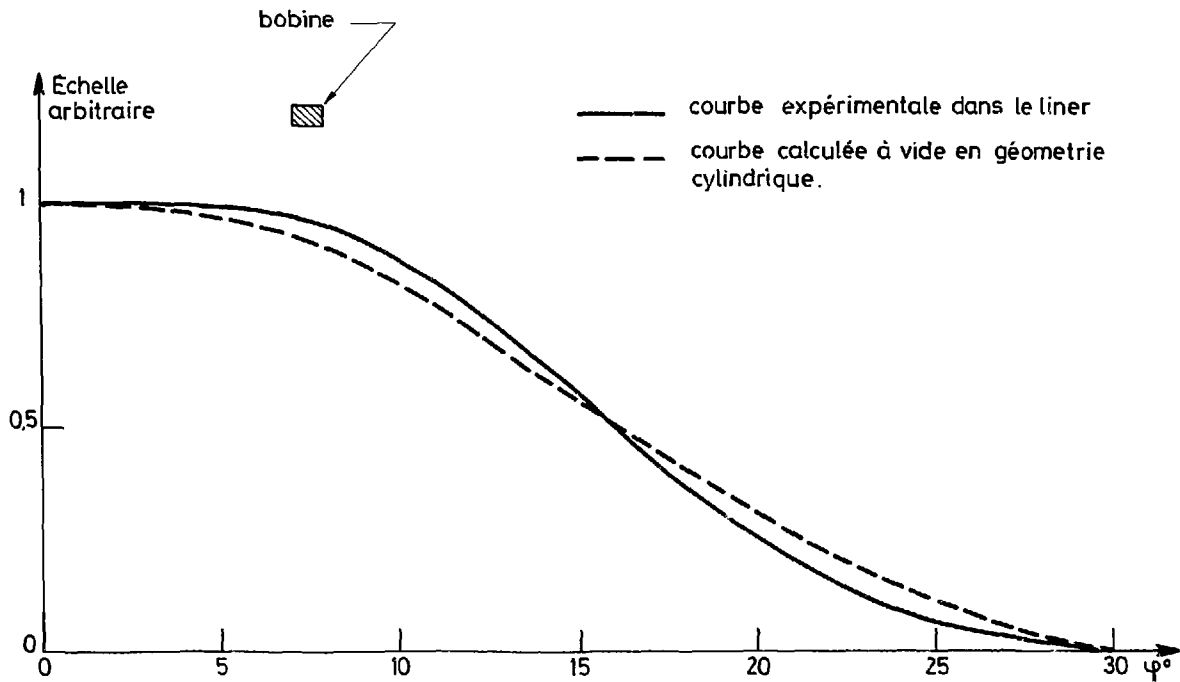


Fig. 2



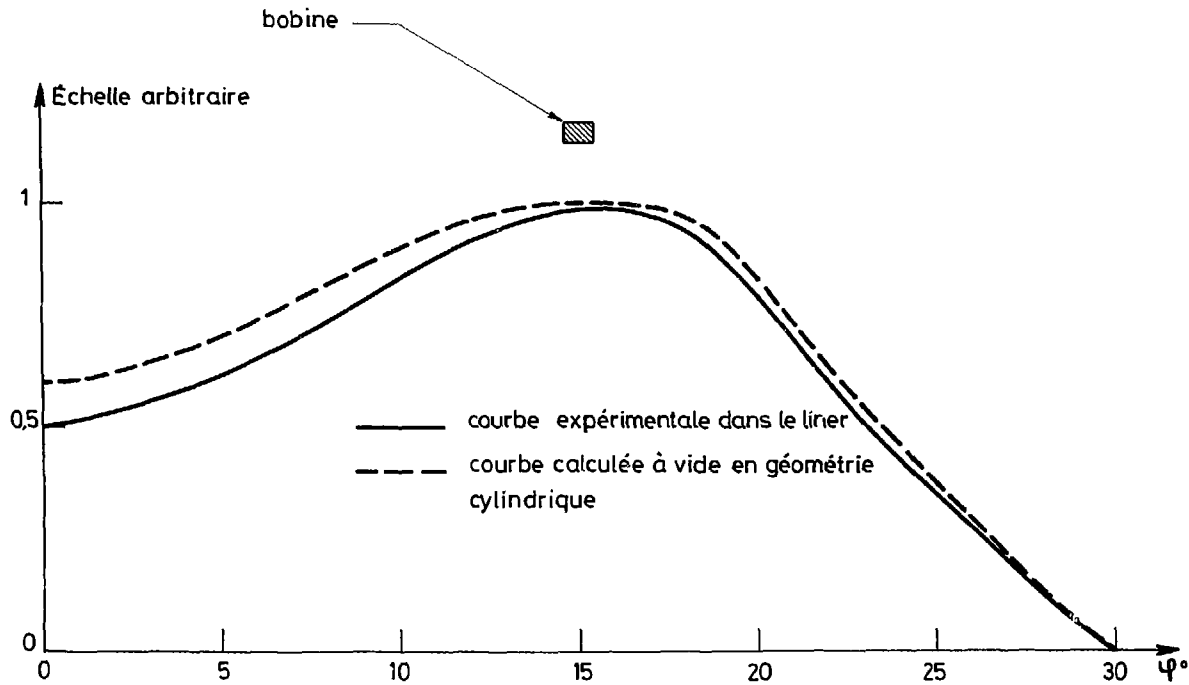


Fig. 3

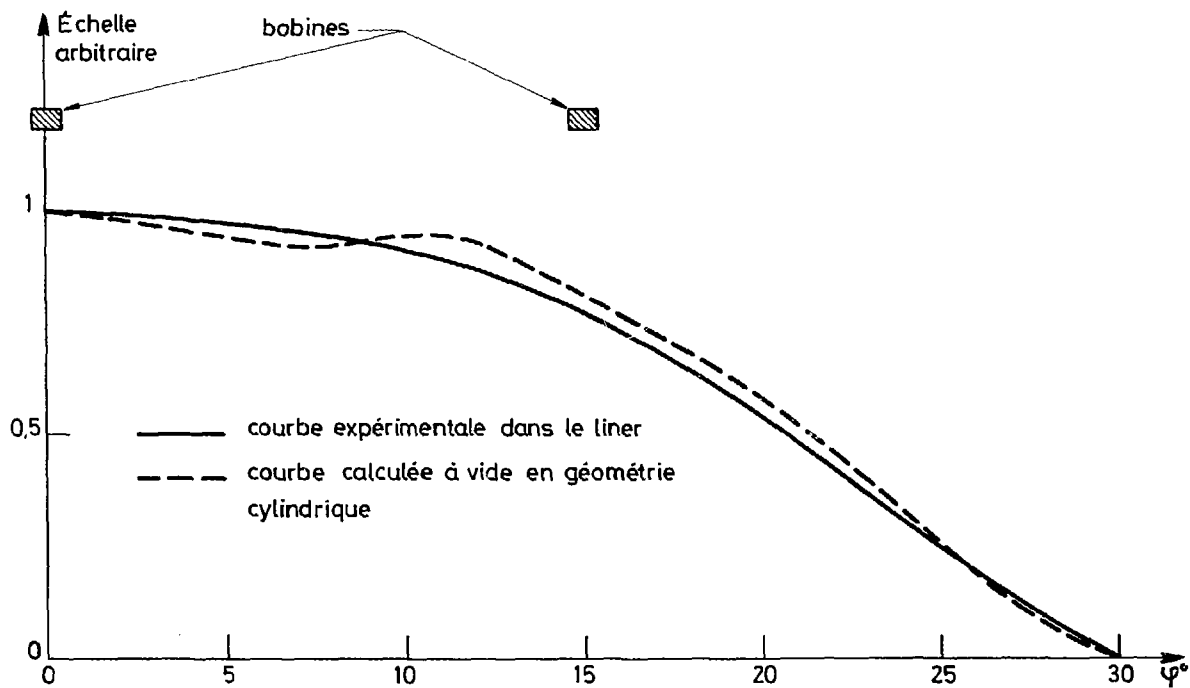


Fig. 4

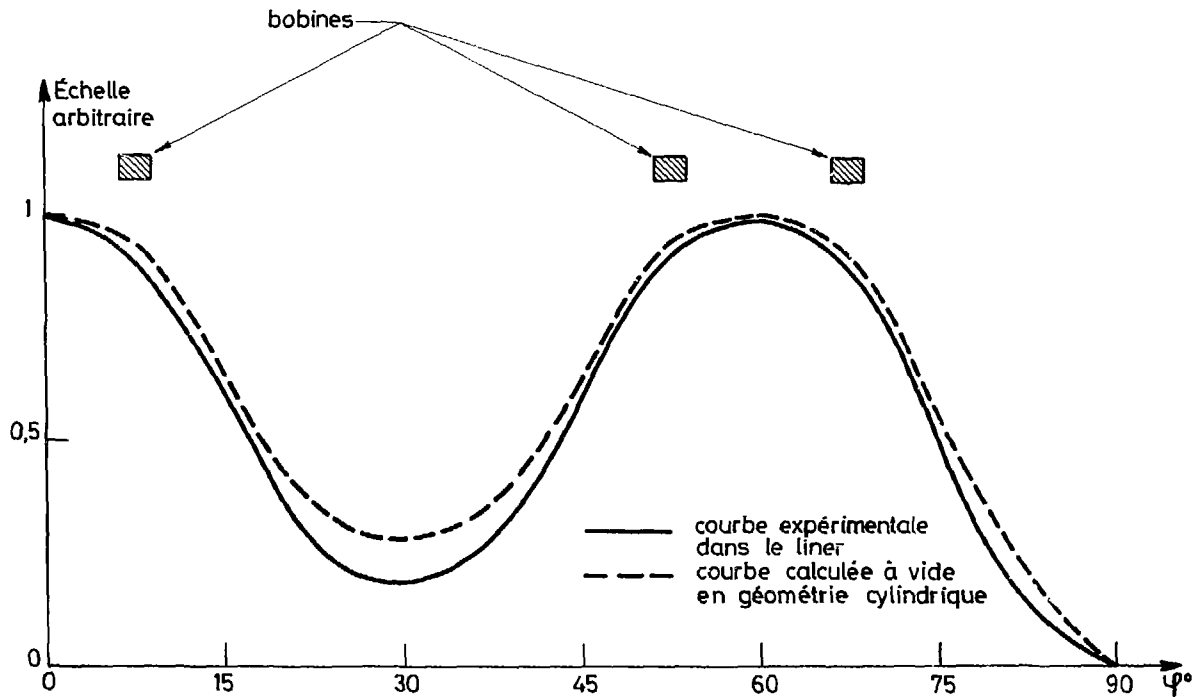


Fig. 5

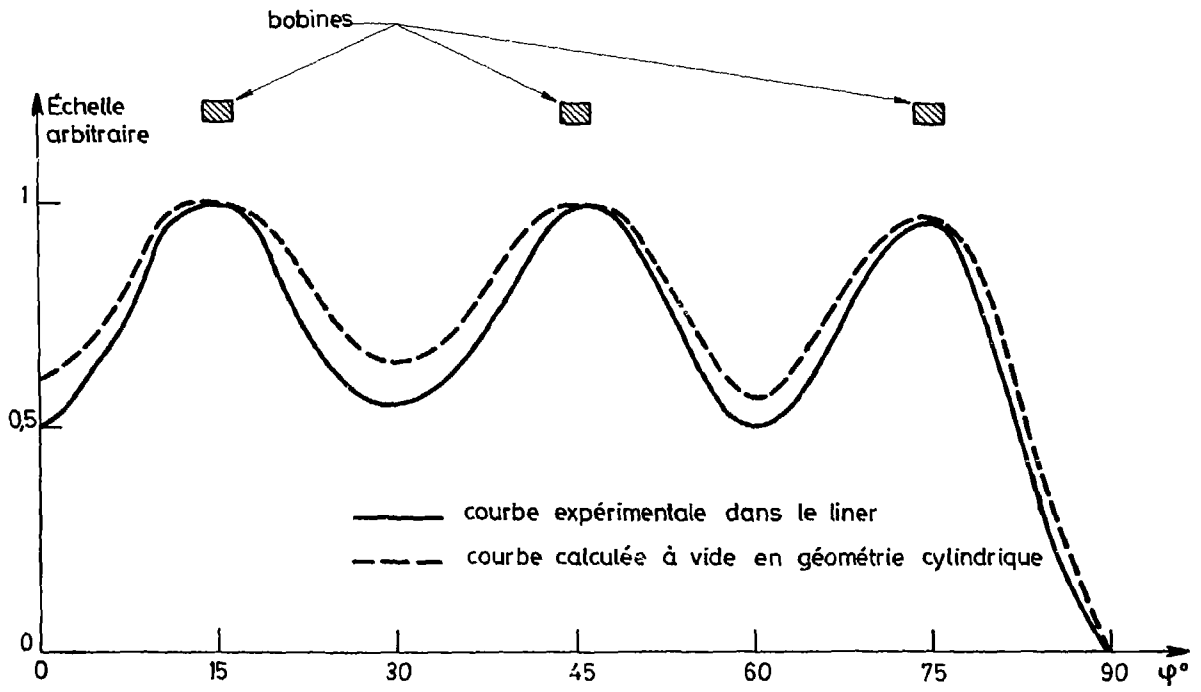


Fig. 6

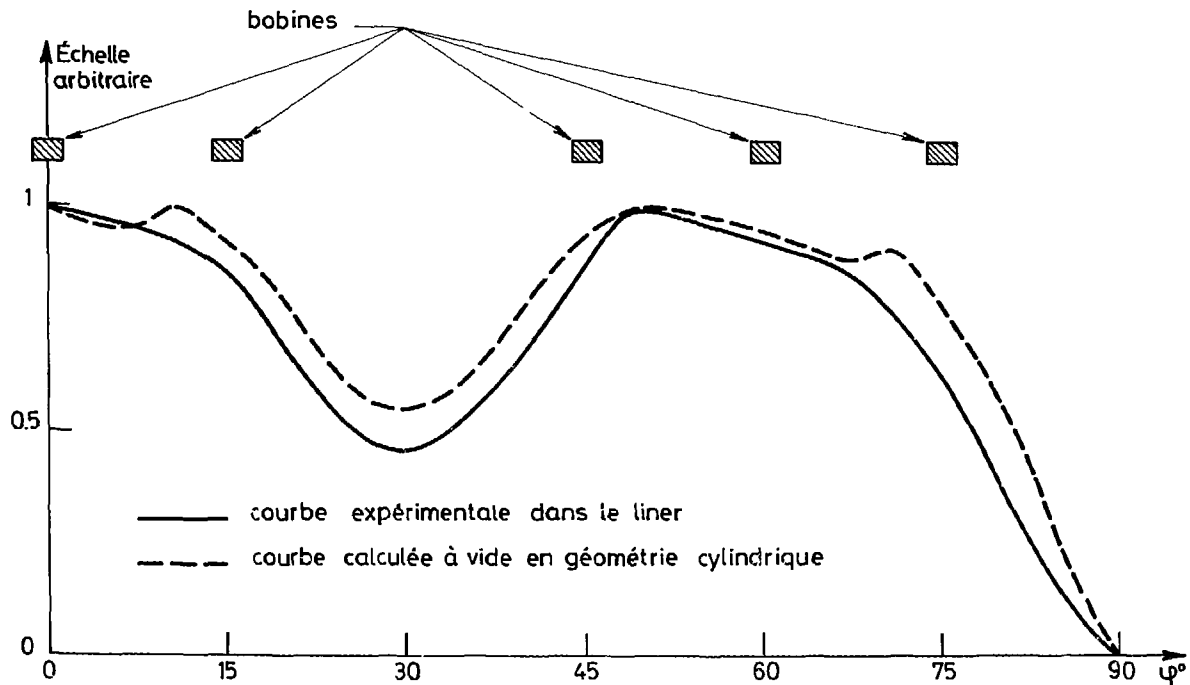
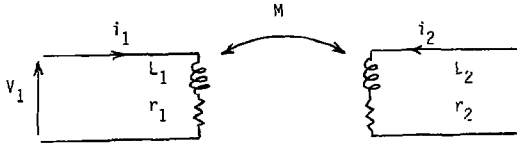


Fig. 7

ETUDE DES CIRCUITS COUPLES

Equations des circuits couplées.

Soient  $L_1$ ,  $r_1$  et  $Q_1$  l'inductance, la résistance et le coefficient de surtension d'une bobine toute seule dans l'espace,  $L_2$ ,  $r_2$ ,  $Q_2$  les caractéristiques du circuit couplé à la bobine 1 par une mutuelle  $M$ .



On peut écrire :

$$V_1 = (r_1 + jL_1\omega) i_1 + jM\omega i_2$$

$$0 = jM\omega i_1 + (r_2 + jL_2\omega) i_2$$

avec  $k^2 = \frac{M^2}{L_1 L_2}$  il vient :

$$\frac{V_1}{i_1} = r_1 \left(1 + k^2 \frac{Q_1 Q_2}{1 + Q_2^2}\right) + jL_1\omega \left(1 - k^2 \frac{Q_2^2}{1 + Q_2^2}\right)$$

$$\frac{V_1}{i_2} = -\frac{L_2}{M} \left[ r_1 \left(1 + k^2 \frac{Q_1 Q_2}{1 + Q_2^2}\right) + \frac{L_1\omega}{Q_2} \left(1 + \frac{k^2 Q_2^2}{1 + Q_2^2}\right) \right] + j \left[ L_1\omega \left(1 - \frac{k^2 Q_2^2}{1 + Q_2^2}\right) - \frac{r_1}{Q_2} \left(1 + \frac{k^2 Q_1 Q_2}{1 + Q_2^2}\right) \right]$$

Vu coté source, l'ensemble du circuit couplé est équivalent à une bobine  $L$ ,  $r$ ,  $Q$  dans laquelle est dépensée une puissance  $P$ .

$$L = L_1 (1 - k^2 \frac{Q_2^2}{1+Q_2^2})$$

$$r = r_1 (1 + k^2 \frac{Q_1 Q_2}{1 + Q_2^2})$$

$$Q = Q_1 \frac{1 + (1-k^2) Q_2^2}{1 + (1+k^2 Q_1/Q_2) Q_2^2}$$

$$P = P_1 \frac{r_1}{r} \frac{1 + Q_1^2}{1 + Q_2^2}$$

Formules approchées quand  $Q_1$  et  $Q_2 \gg 1$

$$L = L_1 (1 - k^2)$$

$$r = r_1 (1 + k^2 \frac{Q_1}{Q_2})$$

$$Q = Q_1 \frac{1 - k^2}{1 + k^2 Q_1/Q_2}$$

$$P = P_1 \frac{1 + k^2 Q_1/Q_2}{(1 - k^2)^2}$$

$$|\frac{V_1}{I_2}| = M \omega \frac{1-k^2}{k^2} = \frac{1-k^2}{k} \omega \sqrt{L_1 L_2}$$

#### EVOLUTION DES CARACTERISTIQUES D'UN CIRCUIT EN H.F.

##### a) Evolution de l'inductance.

L'expression de l'inductance pour une bobine peu épaisse s'écrit :

$$L = \frac{\pi}{2} \mu_0 K \left(\frac{2a}{T}\right) a N^2 \frac{2a}{T}$$

où :  $a$  est le rayon de la bobine  
 $l$  est la largeur de la bobine  
 $N$  est le nombre de tour  
 $K$  une fonction de  $\frac{2a}{l}$

Pour une bobine de rapport d'aspect donné ( $\frac{2a}{l}$  constant)  
 $L$  varie comme  $aN^2$ .

b) Evolution de la résistance.

En supposant que le courant circule dans l'épaisseur de  
peau d'une manière uniforme :

$$r = \rho \frac{L}{s} \text{ où } \rho \text{ est la résistivité.}$$

$$L = 2\pi aN \quad L \text{ la longueur des spires.}$$

$$s = \delta \frac{2l}{N} \quad N \text{ nombre de tours}$$

$l$  largeur de la bobine

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\mu_0 \omega}} \quad \delta \text{ épaisseur de peau}$$

On obtient :

$$r = \pi \sqrt{\frac{\mu_0 \rho \omega}{2}} \times \frac{a}{l} N^2$$

Nota :

La section  $s$  est est une section optimiste :

On ne tient pas compte de la distribution de courant  
dans le conducteur : concentration des courants aux extrémités  
du conducteur et vers l'intérieur.



En supposant le courant uniforme mais localisé dans la partie intérieure de la bobine : la résistance est multipliée par 2 ce qui doit donner une meilleure représentation de la réalité.

c) Expression du coefficient de surtension.

$$Q = \frac{L\omega}{r} = \sqrt{\frac{2\mu_0\omega}{\rho}} \times K \left(\frac{2a}{r}\right) \times a$$

Le nota du § précédent s'applique également au coefficient de surtension.

- Expression de la résistance équivalent à un circuit oscillant.

En supposant les conducteurs sans perte :

$$R_{//} = Q L \omega$$

$$R_{//} = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{2\mu_0\omega^3}{\rho}} \frac{2a}{r} K^2 \left(\frac{2a}{r}\right) a^2 n^2$$

Le  $R_{//}$  peut être divisé par 2 en tenant compte de la remarque des § précédents.

d) Expression du couplage.

Nous prendrons ici l'expression approchée, valable si le solénoïde secondaire est long par rapport à la bobine primaire.

$$M \sim \frac{\mu_0}{2} \pi \frac{a^2 N_1 N_2}{\sqrt{A^2 + L^2/4}}$$

où A est le rayon du solénoïde secondaire

L est la largeur du solénoïde secondaire

$N_2$  est le nombre de tours du solénoïde secondaire.

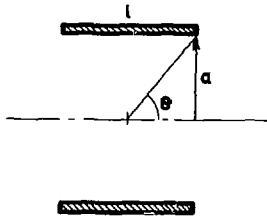
d'où le coefficient de couplage  $k^2$  :

$$k^2 = \frac{M^2}{L_1 L_2} = \left(\frac{a}{A}\right)^2 \frac{1}{L K \left(\frac{2a}{l}\right) K \left(\frac{2A}{L}\right) \left(1 + \frac{4A^2}{L^2}\right)}$$

$$k^2 = \left(\frac{a}{A}\right)^3 \frac{1}{\frac{2a}{l} K \left(\frac{2a}{l}\right) \left(\frac{l}{2A} + \frac{2A}{l}\right) K \left(\frac{2A}{l}\right)}$$

e) Etude de la configuration magnétique.

- Champ magnétique au centre d'une bobine seule dans l'espace.



En supposant que l'espace entre spires n'est pas trop grand par rapport à la largeur de cuivre on peut écrire :

$$B = \mu_0 \frac{N}{l} \cos \theta$$

$$B = \frac{\mu_0 N}{\sqrt{4a^2 + l^2}} \frac{V}{L\omega}$$

$$L = \frac{\mu_0 \pi}{2} \frac{2a}{l} K \left(\frac{2a}{l}\right) a N^2$$

$$\frac{B}{V} = \frac{1}{\pi K \left(\frac{2a}{l}\right) \sqrt{1 + \frac{4a^2}{l^2}} N\omega a^2}$$

Remarque : A rapport d'aspect donné ( $\frac{2a}{l}$  constant),  $\frac{B}{V}$  varie  
comme  $\frac{1}{N\omega a^2}$

D'autre part la fonction  $K\left(\frac{2a}{l}\right) \sqrt{1 + \frac{4a^2}{l^2}}$   
est une fonction douce si  $\frac{l}{2a} > 0,5$  (bobine pas trop plate)

- Champ magnétique créé par une bobine couplée.

Si  $k^2$  est le coefficient de couplage entre les 2 circuits,  
le courant qui circule dans la bobine 1 est donné par :

$$I_1 = \frac{V_1}{L\omega} = \frac{V_1}{L_1(1-k^2)\omega}$$

$$B_1 = \frac{\mu_0 N_1}{\sqrt{4a^2 + l^2}} \frac{V_1}{L_1(1-k^2)\omega}$$

Le couplage a pour effet d'augmenter  $I_1(L < L_1)$ .

Par contre le courant  $I_2$  qui circule dans le solénoïde  
secondaire crée un champ magnétique en opposition :

$$I_2 = \frac{V_1 k}{\omega \sqrt{L_1 L_2} (1-k^2)}$$

$$B_2 = \frac{\mu_0 N_2}{\sqrt{4A^2 + L^2}} I_2$$

Le champ résultant est  $(B_1 - B_2)$ , en le normant par rap-  
port à la valeur du champ  $B$  produit par la bobine primaire toute  
seule dans l'espace :

$$\frac{B_1}{B} = \frac{1}{1 - k^2}$$

$$\frac{B_2}{B} = \frac{k^2}{1 - k^2} K\left(\frac{2a}{l}\right) \sqrt{1 + \frac{4a^2}{l^2}}$$

$$\text{avec } k = \frac{a}{A} \left( \frac{1}{L K \left(\frac{2a}{l}\right) K \left(\frac{2A}{l}\right) \sqrt{1 + \frac{4A^2}{l^2}}} \right)^{1/2}$$

$$\frac{B_1 - B_2}{B} = \frac{B_c}{B_0} = \frac{1 - k^2 K \left(\frac{2a}{l}\right) \sqrt{1 + \frac{4a^2}{l^2}}}{1 - k^2}$$

Remarque : pour des bobines pas trop plates ( $\frac{l}{2a} > 0,6$ ), la fonction  $K \left(\frac{2a}{l}\right) \left(1 + \frac{4a^2}{l^2}\right)^{1/2}$  est proche de 1, le champ magnétique en charge est voisin de celui à vide à tension constante aux bornes des bobines.

f) Expression de la puissance.

Les équations générales des circuits couplés donnent :

$$\frac{P}{P_1} = \frac{1 + \frac{Q_1}{Q_2} k^2}{(1 - k^2)^2}$$

La valeur absolue de la puissance dépensée dans chaque bobine peut s'écrire :

$$P = \frac{V_1}{2R_{//1}}$$

$$R_{//1} = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{2 \mu_0^3 \omega^3}{\rho}} \frac{2a}{l} k^2 \left(\frac{2a}{l}\right) a^2 N^2$$

$$V_1 = B N_1 \omega a^2 \pi K \left(\frac{2a}{l}\right) \sqrt{1 + \frac{4a^2}{l^2}}$$

$$B = \frac{1 - K \left(\frac{2a}{l}\right) \sqrt{1 + \frac{4a^2}{l^2}} k^2}{1 - k^2} B_0$$

ou  $B_0$  est le champ de la bobine toute seule dans l'espace

$$P = \frac{1 + k^2 \frac{Q_1}{Q_2}}{(1 - k^2)^2} \frac{1 - K \left(\frac{2a}{l}\right) \sqrt{1 + \frac{4a^2}{l^2}} k^2}{1 - k^2} 2\pi \sqrt{\frac{\rho \omega}{2 \mu_0^3}} \left(\frac{1}{2a} + \frac{2a}{l}\right) B_0^2 a^2$$

Remarques : à couplage et rapport d'aspect donné ( $k^2$  et  $\frac{2a}{l}$  constant) la puissance dissipée est proportionnelle à  $B^2 a^2$ .

- la puissance est probablement à multiplier par 2 d'après les remarques des § précédents.

- le terme  $\frac{1}{2a} + \frac{2a}{l}$  est minimal pour

$\frac{1}{2a} = \frac{2a}{l}$  c'est à dire pour des bobines carrées.

g) Légende des graphiques.

- Fig. 1 : les fonctions  $K(\frac{2a}{l})$ ,  $K(\frac{2a}{l})\sqrt{1 + \frac{4a^2}{l^2}}$ ,  $\frac{2a}{l} K$  et

$(\frac{2a}{l} + \frac{1}{2a})K(\frac{2a}{l})$  qui interviennent dans le calcul des inductances, couplage et champ magnétique sont représentées en fonction de  $\frac{l}{2a}$ .

- Fig. 2 : la fonction  $\frac{P}{P_1}$  est exprimée en fonction des coefficients de couplage et pour différentes valeurs de  $Q_1/Q_2$  :

$$\frac{P}{P_1} = \frac{1 + k^2 Q_1/Q_2}{(1 - k^2)^2}$$

- Fig. 3 : la fonction  $P = f(Q_1)$  à  $k^2 = 0,3$  pour différentes valeurs de  $Q_2$ .

On suppose l'inductance  $L_1$  constante :

$$P = \frac{V^2}{L_1 \omega} \frac{1 + k^2 Q_1/Q_2}{Q_1 (1 - k^2)^2}$$

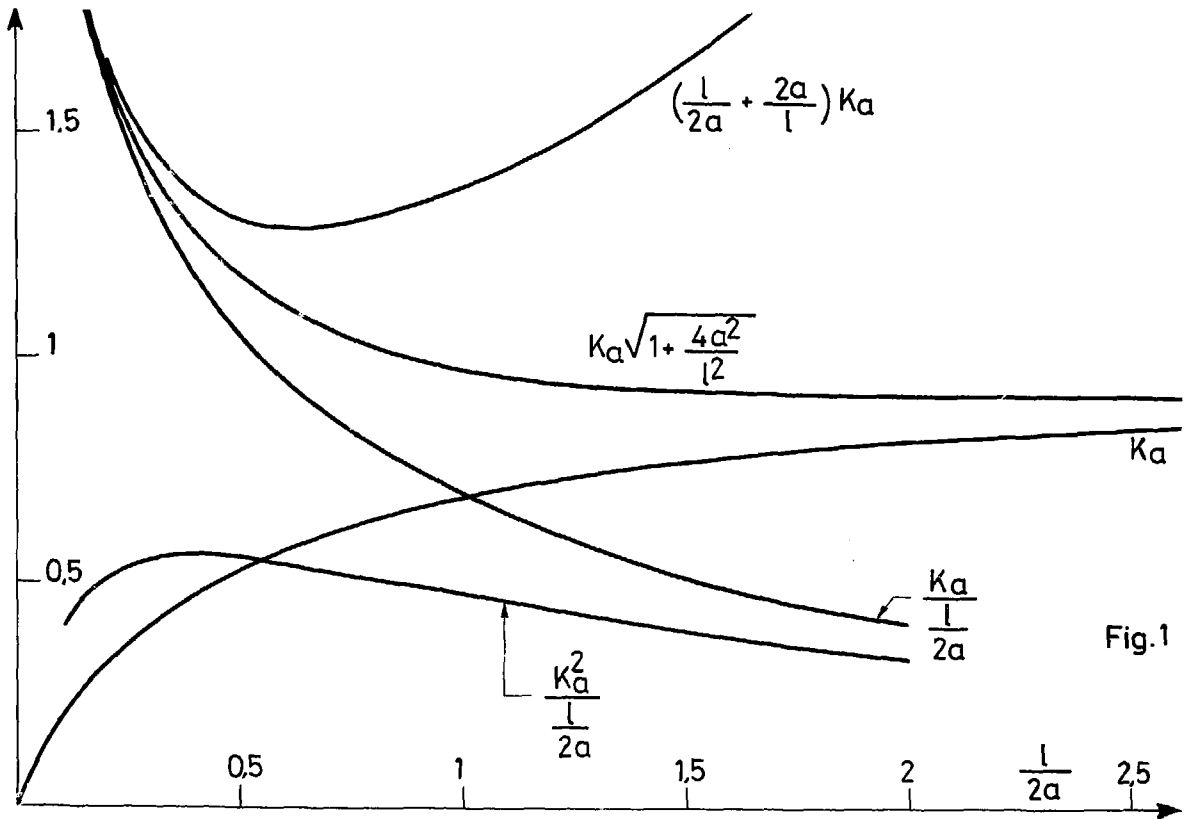


Fig.1

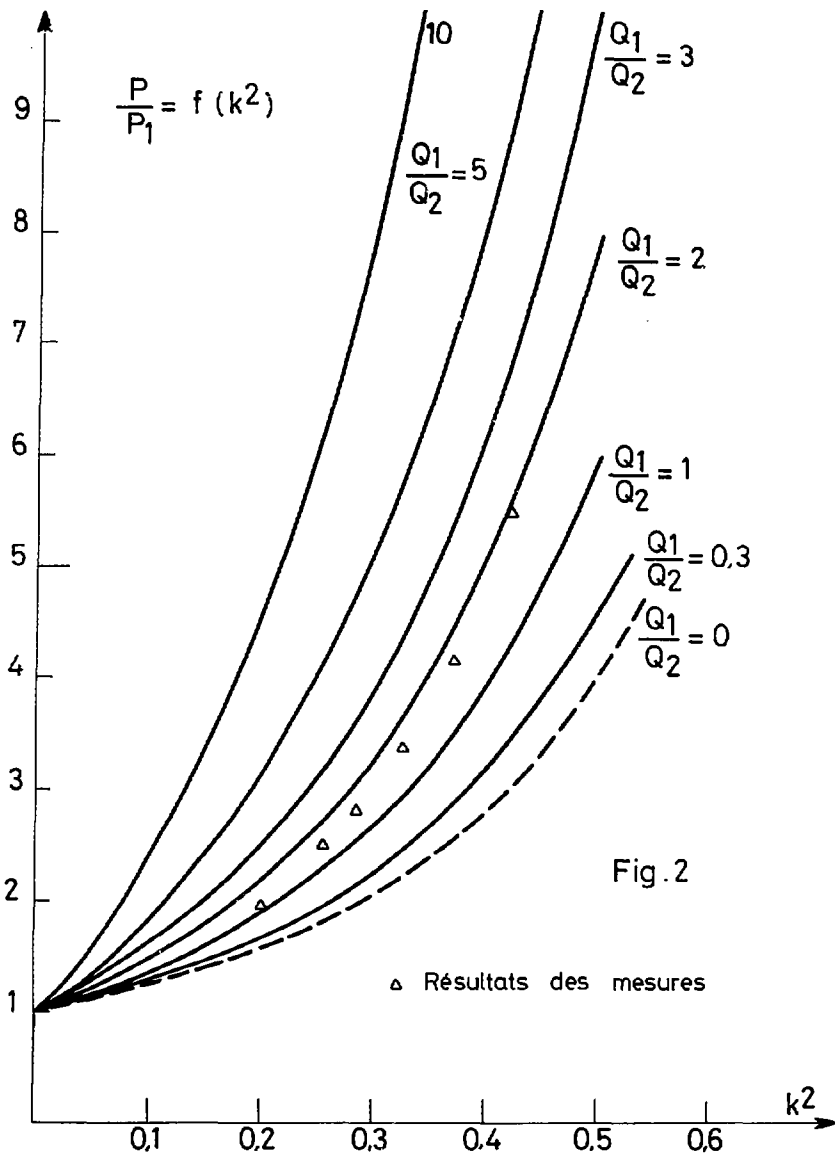


Fig. 2

$$P = f(Q_1) \quad k^2 = 0,3$$

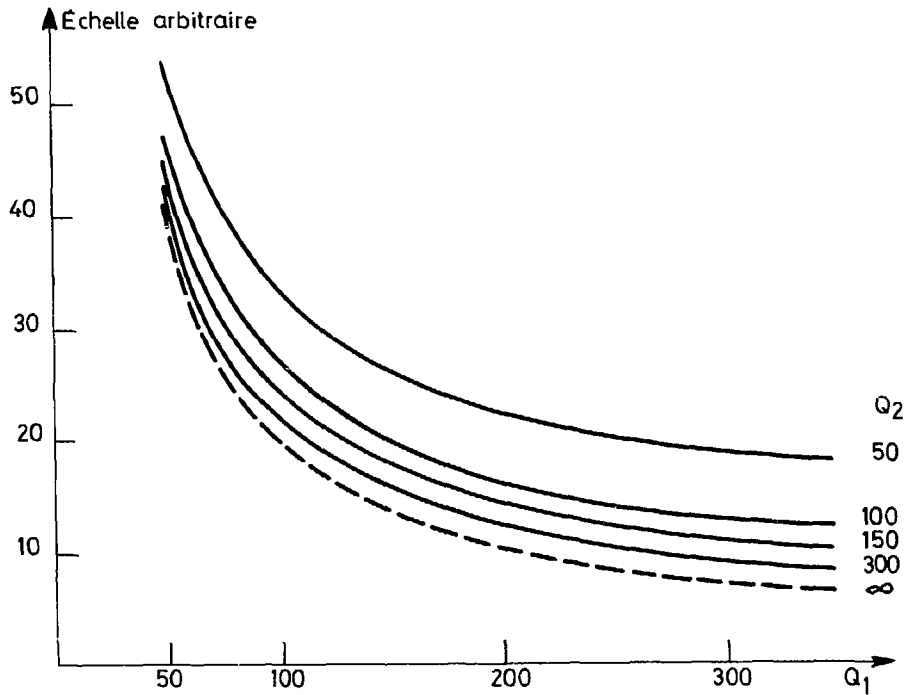


Fig. 3



## ETUDE EXPERIMENTALE

### Description de l'expérience :

Les dimensions géométriques de la maquette en acier inoxydable, représentant 1/6 de l'enceinte de Pétula sont les suivantes:

- grand rayon du tore : 720 mm
- petit diamètre intérieur : 462 mm
- petit diamètre extérieur : 470 mm

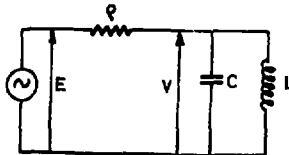
La géométrie de Pétula laisse, pour les bobines T.T.M.P., trois emplacements disponibles par sixième .

L'étude de la distribution du champ magnétique (cf. le chapitre correspondant) montre un optimum pour deux bobines situées dans deux intervalles adjacents et mises en parallèle (voir schéma du montage).

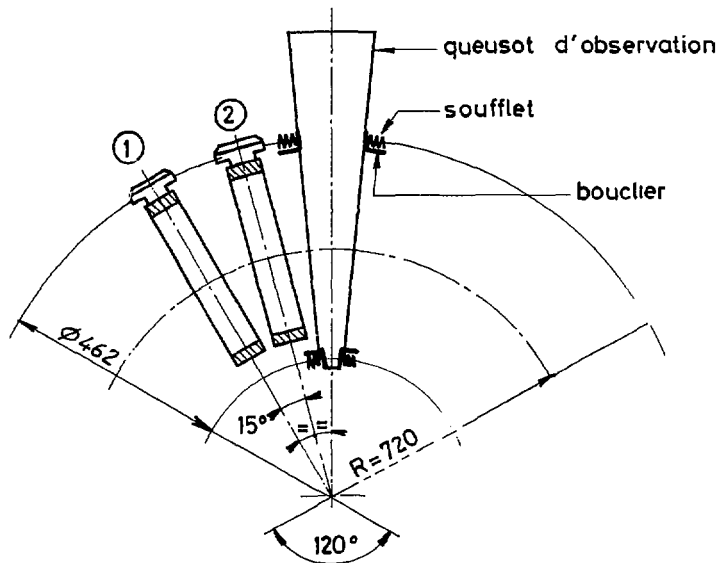
Pour des couples de bobines de différents diamètres, les caractéristiques électriques :  $L$ ,  $R_{//}$ ,  $Q$ ,  $B/V$ , à vide (bobines toutes seules dans l'espace) et en charge (bobines mises dans le sixième) ont été mesurées.

### - Mesures des caractéristiques des bobines.

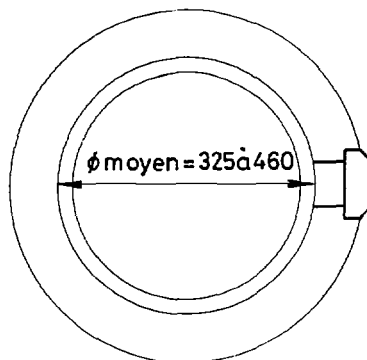
Un générateur attaque à travers une résistance pure un circuit bouchon constitué de la bobine et d'un condensateur à très faible perte.



à la résonance on déduit :



① et ② bobines alimentées en parallèle et en phase



position de la bobine dans la chambre à vide

SCHÉMA DE MONTAGE

$$L = \frac{1}{C\omega^2}$$

$$R_{//} = \frac{\rho V}{E-V}$$

$$Q = \frac{R_{//}}{L\omega}$$

Le champ magnétique est mesuré entre les deux bobines, à l'aide d'une sonde de flux.

- Résultats des bobines deux tours.

L'ensemble des résultats à vide et en charge, est donné dans le tableau suivant.

Les bobines sont situées dans des plans méridiens espacés de  $\frac{\pi}{12}$ , le centre des bobines est situé à 72 cm de l'axe de révolution du système, le diamètre 2a des bobines est variable.

Les bobines sont réalisées avec du mēplat de cuivre de 16 mm de large et de 2 mm d'épaisseur.

TABLEAU DES RESULTATS SUR COUPLE DE BOBINES 2 TOURS

Mesures à vide					Mesures en charge									
2a mm	L1 μH	B/V G/kV	R <sub>  </sub> /1 Ω	Q <sub>1</sub>	$\frac{Q_1}{2a}$	$\frac{L_1}{2a}$	$\frac{R_1}{a^2}$	L1 μH	B/V G/kV	R <sub>  </sub> Ω	Q	k <sup>2</sup>	$\frac{B_c}{B_v}$	$\frac{k^2}{(a/A)^3}$
460	2,25	15	666	235	51	48	314	0,63	4,5	12	15	0,72	0,3	0,73
445	2,07	15,5	595	229	51	46	300	0,88	6,9	36	32	0,58	0,45	0,65
420	1,97	17,2	541	218	51	46	306	1	9,5	56	45	0,49	0,55	0,65
400	1,84	19,1	450	195	48	46	281	1,07	11,7	82	61	0,42	0,61	0,65
385	1,80	20,2	420	186	48	46	283	1,13	14,3	100	70	0,37	0,71	0,64
366	1,65	21,3	377	182	49	45	281	1,1	16,6	111	80	0,33	0,78	0,66
350	1,56	23,1	334	170	49	44	272	1,1	18,7	118	85	0,28	0,81	0,64
338	1,46	24,5	302	165	48	43	264	1,1	21,9	123	89	0,25	0,89	0,64
325	1,35	28,3	270	159	49	41	255	1,1	23,7	142	103	0,20	0,84	0,57
moyenne					49	45	284							

Nota : Les valeurs de B/V Q et R<sub>||</sub> sont données à 200 kHz.

Rappelons que B/V varie comme ω<sup>-1</sup>, Q comme ω<sup>1/2</sup> et R<sub>||</sub> comme ω<sup>3/2</sup>.

- Résultats des bobines 1 tour.

Deux couples de bobines 1 tour, de diamètre 366 mm ont été réalisés à partir d'un méplat de cuivre de 2 mm d'épaisseur et de deux largeurs différentes: 16 et 40 mm.

Les mesures ont été faites, les bobines étant dans deux plans méridiens espacés de  $\frac{\pi}{12}$  comme dans le cas des bobines 2 tours.

Les résultats sont résumés dans le tableau ci-dessus :

Largeur cuivre mm	2a mm	L <sub>1</sub> μH	$\frac{B_1}{V}$ (G/kV)	R <sub>//1</sub> (Ω)	Q <sub>1</sub>	$\frac{L}{\mu H}$	k <sup>2</sup>	B/V (G/kV)	R <sub>//</sub> (Ω)	Q
16	366	0,55	32	69	100	0,42	0,24	23	31	59
X		0,45	39	83	147	0,32	0,29			
40	366	0,45	38	60	106	0,32	0,29	28	28	70
X		0,35	49	90	205	0,22	0,37			
Mesures à vide						Mesures en charge				

Remarque : la longueur des connexions ne devient plus négligeable par rapport à la longueur de cuivre de la bobine.

L'inductance de la connexion est évaluée à 0,1  $\mu\text{H}$  (mesure en courtcircuit) et la résistance à 20% de la résistance de la bobine avec méplat de cuivre de 16 mm et à près de 50% pour la bobine à méplat de 40 mm.

Les lignes marquées \* sont les valeurs corrigées, en tenant compte des connexions.

Ces chiffres sont à considérer avec prudence car les corrections sont importantes; les dimensions de PETULA ne sont pas bien adaptées à des bobines 1 tour.

#### Dépendance fonctionnelle - Amélioration des résultats.

##### - Termes selfiques.

Le calcul de l'inductance à partir des formules établies au chapitre " étude des circuits couplés " donne des résultats qui sont en très bon accord avec les mesures.

Calcul de l'inductance d'une bobine :

$$L = \frac{\pi}{2} \mu_0 \frac{2a}{l} k \left(\frac{2a}{l}\right) a N^2$$

- avec :  $2 a = 0,366 \text{ m.}$   
 $l = 0,032 \text{ m. (largeur de cuivre.)}$

$$L = 3,06 \mu\text{H}$$

- avec :  $2 a = 0,366 \text{ m.}$   
 $l = 0,037 \text{ m. (largeur de bobine).}$

$$L = 2,93 \mu\text{H}$$

pour 2,88  $\mu\text{H}$  mesuré.

Mutuelle entre les deux bobines.

On suppose les bobines coaxiales, la mutuelle est donnée par la formule :

$$M = N_1 N_2 f a \quad \text{ou } f \text{ est une fonction } \frac{d}{2a} = \frac{\text{distance}}{\text{diamètre}}$$

$$\begin{aligned} \text{- avec : } d &= 183 \\ 2a &= 366 \quad \frac{d}{2a} = 0,5 \quad f = 0,005 \end{aligned}$$

$$M = 0,36 \mu\text{M}$$

résultat confirmé par la mesure.

Inductance apparente des deux bobines en parallèle.

$$L_1 = \frac{L + M}{2} \approx 1,7 \mu\text{M}$$

pour 1,65 mesurée.

- Calcul du B/V.

Le calcul et la mesure coïncide (le calcul est équivalent au calcul de la self).

- Calcul du couplage.

$$\text{La formule } k^2 = \left(\frac{a}{A}\right)^3 \frac{1}{\frac{2a}{L} k \left(\frac{2a}{L}\right) \left(\frac{L}{2A} + \frac{2A}{L}\right) k \left(\frac{2A}{L}\right)}$$

n'est valable que si le solénoïde secondaire est long.

Les courants induits dans l'enceinte sont en fait localisés sensiblement au droit des bobines primaires, la largeur L ne correspond pas aux dimensions géométriques.

Néanmoins la dépendance en  $(\frac{a}{A})^3$  se vérifie bien (cf. dernière colonne du Tableau I).

Les résultats mesurés sur une seule bobine à vide et en charge sont bien vérifiés par le calcul en employant pour le calcul de la mutuelle, la formule générale (sans limitation sur le domaine de validité).

$$M = \pi \mu_0 a^2 \frac{N_1 N_2}{4L} (r_1 B_1 - r_2 B_2)$$

$$\text{où } r_1 = \sqrt{A^2 + \frac{(L+1)^2}{4}} \quad \text{et } B_i \text{ une fonction de } \frac{a}{A} \text{ et de } \left(\frac{A}{r_i}\right)^2$$
$$r_2 = \sqrt{A^2 + \frac{(L-1)^2}{4}}$$

Cette formule permet de définir la dimension L dans laquelle circulent les courants induits :

Avec une bobine 2 tours de 366 mm de diamètre et de 37 mm de large on mesure un couplage  $k^2 = 0,28$

En appliquant la formule générale de la mutuelle on obtient :

L	1	21	31	41	51
$k^2$	0,22	0,27	0,28	0,29	0,26

On peut considérer que le courant induit dans l'enceinte circule sur une longueur L égale 2 à 3 fois la longueur de la bobine primaire.



Nota :

L'application de la formule simplifiée, donne des résultats trop faibles :  $k^2 < 0,2$ .

- Termes resistifs.

L'application de la formule établie dans le chapitre "circuits couplés" donne des résultats très optimistes :

$$r = \pi \sqrt{\frac{\mu_0 \rho \omega}{2}} \frac{a}{T} N^2$$

En prenant  $\rho = 210^{-8} \Omega m$ ,  $f = 210^5$  Hz,  $N = 2$ ,  $a = 0,183$  m  
 $l = 32.10^{-3}$  m (largeur de cuivre)

D'où :  $r = 9$  m $\Omega$   
 $Q = 400$   
 $R_{//} = 1440 \Omega$ .

Pour les bobines en parallèle on obtiendrait :

$$Q = 450$$
$$R_{//} = 910 \Omega$$

Les mesures (cf tableau) donnent des résultats 2,5 fois plus faibles.

Nota :

La mesure donne les pertes globales du circuit oscillant donc y compris les pertes dans le conducteur et dans les connexions. D'autre part le calcul suppose une répartition uniforme du courant tout autour de la spire.

En pratique en prenant une circulation du courant sur la face interne de la spire et une  $\text{tg } \delta$  des condensateurs de  $10^{-3}$ , on pourra prévoir les pertes du C.O.

Evolution fonctionnelle de Q, R<sub>11</sub>.

Dans les colonnes 5 et 7 du Tableau 1 on a indiqué les rapports  $\frac{Q}{2a}$  et  $\frac{R_{11}}{a}$  qui varient peu sur l'ensemble des bobines étudiées.

$\frac{Q}{2a}$  et  $\frac{R_{11}}{a}$  ne sont des fonctions que  $\frac{1}{2a}$ , on peut en déduire que l'ensemble des 2 bobines en parallèle, de différents diamètres, est équivalent à une seule bobine de même diamètre et ayant un rapport d'aspect  $\frac{1}{2a}$  à définir. Notons que sur les bobines étudiées ce rapport  $\frac{1}{2a}$  varie peu.

Ceci nous permettra plus loin de définir une procédure d'extrapolation des résultats.

Evolution du rapport  $\frac{Q_1}{Q_2}$ .

Le rapport des Puissances dissipées à vide et en charge dépend de  $k^2$  et de  $Q_1/Q_2$  rapport des coefficients de surtension de la bobine et de l'enceinte.

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{a K \left(\frac{2a}{L}\right)}{A K \left(\frac{2A}{L}\right)} \sqrt{\frac{\rho_2}{\rho_1}}$$

avec :  $\sqrt{\frac{\rho_1}{\rho_2}} = 6,5$      $a = 0,183 \text{ m}$      $\frac{1}{2a} = 0,087$      $K = 0,18$   
 $A = 0,231 \text{ m}$      $\frac{Q_1}{Q_2} = 2$

On peut en déduire le  $\frac{L}{2A}$  de l'enceinte

$$K \left(\frac{L}{2A}\right) = 0,46 \quad \text{d'ou} \quad \frac{L}{2A} = 0,38 \quad L = 17 \text{ cm.}$$

Ce qui confirme sensiblement les résultats déjà obtenus sur la longueur équivalente L.

Possibilité d'amélioration des résultats.

Les différentes possibilités d'amélioration, dont certaines ont fait l'objet de remarques dans les différents chapitres précédents, sont résumées dans le tableau ci-après.

<u>AMELIORATION</u>	<u>POSSIBILITE</u>	<u>LIMITATION</u>
Augmentation du $\frac{B}{V}$	<p>diminution diamètre bobine  bobines carrées <math>\frac{2a}{e} \sim 1</math></p> <p>bobines en parallèle  bobines à 1 tour  fréquence plus basse</p>	<p>diamètre plasma + garde  Difficiles à réaliser et à introduire dans la machine  varie en <math>\frac{1}{N}</math> - self connexion / self bobine  bloc d'accord - courant bobine.</p>
Amélioration du $Q_1$	<p>spires larges  fil de litz</p>	<p>Difficiles à réaliser et à introduire  Les essais effectués n'ont pas donné de résultats intéressants pour l'instant.</p>
Diminution du couplage	<p>augmentation de diamètre de la chambre  diminution du diamètre bobine.</p>	<p>variation en <math>(\frac{a}{R})^3</math> + diamètre plasma  et emplacement disponibles.</p>
Augmentation de $Q_2$	<p>augmentation diamètre chambre  revêtement intérieur de la chambre par un matériau bon conducteur.</p>	<p>gain d'un facteur 6 à 7 sur <math>Q_2</math> (rapport des racines des résistivités du cuivre à l'acier inoxydable).  gain de 30% sur la puissance pour <math>k^2 \sim 0,3</math> vérifié expérimentalement.</p>
Champ H.F. maximum à puissance donnée	<p>Diminution de la fréquence</p>	<p>Variation <math>\omega^{1/4}</math>.</p>

POSSIBILITE D'EXTRAPOLATION

Une bobine longue apparaissant difficilement réalisable, l'utilisation de bobines en parallèle permet une amélioration du B/V.

Deux bobines en parallèle sont équivalentes (vis à vis du flux global c'est-à-dire à égalité des inductances) à une bobine de même diamètre que les deux bobines réelles et ayant un certain rapport d'aspect  $\frac{1}{2a}$ .

A partir de ce rapport d'aspect  $\frac{1}{2a}$ , le coefficient de couplage se déduit :

$$k^2 = \left(\frac{a}{A}\right)^3 \frac{1}{\frac{2a}{l} K\left(\frac{2a}{l}\right) \left(\frac{l}{2A} + \frac{2A}{l}\right) K\left(\frac{2A}{l}\right)}$$

où L est égal à 2 ou 3 fois l. L'imprécision sur L n'est pas importante car la fonction :

$$\left(\frac{l}{2A} + \frac{2A}{l}\right) K\left(\frac{2A}{l}\right)$$

est douce dans le domaine considéré.

La valeur du B en charge sur le B à vide  $\frac{B_C}{B_V}$  est déduit de  $\frac{B_C}{B_V} = 1 - \frac{\sqrt{1 + 4a^2/l^2} K\left(\frac{2a}{l}\right) k^2}{1 - k^2}$

En comparant les résultats obtenus par cette méthode ( cf tableau ci après) et les mesures notées dans le tableau 1, on peut constater un très bon accord sur le  $k^2$  ( 7 point sur 9 ) et des accords à 10% sur les valeurs de  $\frac{B_C}{B_V}$  si  $k^2 < 0,4$ .

Remarque : un bon accord peut être obtenu sur les  $\frac{B_C}{B_V}$  en prenant comme bobine équivalente, une bobine légèrement plus courte  $\frac{1}{2a} \sim 0,3$  ce qui correspond pour la fonction  $Ka \sqrt{1 + \frac{4a^2}{l^2}}$  à la valeur numérique de 1,4.

2a mm	L mes. μH.	$\frac{2a}{l} k(\frac{2a}{l})$	$\frac{1}{2a}$	l mm	$k^2$	$Ka \sqrt{1 + \frac{a^2}{l^2}}$	$\frac{Bc}{Bv}$
460	2,25	1,24	0,36	166	0,61	1,32	0,48
445	2,07	1,18	0,4	178	0,58	1,27	0,63
420	1,97	1,19	0,4	168	0,49	1,27	0,74
400	1,84	1,17	0,4	160	0,42	1,27	0,80
385	1,80	1,18	0,4	154	0,38	1,27	0,83
366	1,65	1,14	0,42	154	0,33	1,25	0,88
350	1,56	1,13	0,42	147	0,29	1,25	0,90
338	1,46	1,09	0,47	159	0,28	1,21	0,92
325	1,35	1,05	0,50	162	0,26	1,18	0,94

Nota :

Au lieu de rechercher une bobine équivalente à deux bobines en parallèle, on peut considérer que chaque bobine ignore l'autre (mutuelle entre les deux bobines en parallèle faible :  $\frac{M}{L} \ll 1$ ) et conduire le calcul sur une seule bobine. Les résultats pour 2 bobines en parallèle se déduisent par :

$$L \text{ 2 bobines} = \frac{1}{2} L \text{ 1 bobine}$$

$$k^2 \text{ 2 bobines} = k^2 \text{ 1 bobine}$$

$$R_{//} \text{ 2 bobines} = \frac{1}{2} R_{//} \text{ 1 bobine}$$

$$Q \text{ 2 bobines} = Q \text{ 1 bobine}$$

La longueur L de l'enceinte, dans laquelle circule le courant induit étant égal à deux fois la largeur des spires de la bobine primaire.

APPLICATION A PETULA.

A - Cas de 3 longueurs d'onde :

Les principaux résultats sont résumés dans le tableau ci-dessous.

$k^2$  est déduit de la formule  $L = L_1 (1 - k^2)$ .

Les valeurs de  $P_1, B/V$  et du  $R_{//}$  sont données à 200 kHz

$B/V$  varie comme  $\frac{1}{\omega}$ ,  $R_{//}$  comme  $\omega^{3/2}$  et  $P$  comme  $\omega^{1/2}$  à  $B$  constant.

Les valeurs de  $P$  et de  $V$  sont des valeurs maximales ( $f=200\text{kHz}$ ) pour des bobines nues (sans écran électrostatique).

$P$  est donnée pour 6 couples de bobines

$P = 6 \frac{V^2}{2R_{//}} \text{ où } V \text{ est la tension crête aux bornes des bobines.}$

$B$  est l'amplitude du fondamental exprimé en Gauss crête

$\frac{a}{A}$	$2a$ mm	$k^2$	$\frac{B}{V}$ G/kV	$R//$ $\Omega$	Q	VkV $\tilde{B} = 300G$	PMW	VkV $\tilde{B} = 450 G$	PMW	VkV $\tilde{B} = 750 G$	PMW
0,96	445	0,58	6,9	36	32	43,5	157,3	65,2	354	109	985
0,91	420	0,49	9,5	56	45	31,6	53,3	47,4	120	79	334
0,87	400	0,42	11,7	82	61	25,6	24	38,5	54	64	150
0,83	385	0,37	14,3	100	70	21	13,42	31,5	30,2	52,5	82,5
0,79	366	0,33	16,6	111	80	18,1	8,8	27,1	19,9	45,2	55,2
0,76	350	0,28	18,7	118	85	16	6,6	24,1	14,8	40,1	40,9
0,73	338	0,25	21,9	123	89	13,7	4,6	20,6	10,3	34,2	28,6
0,70	325	0,20	23,7	142	103	12,7	3,4	19	7,6	31,7	21,2

Diamètre de l'enceinte A = 462 mm.

L'évolution de la puissance est représentée sur la courbe 1 en fonction du diamètre  $d = 2a$  des bobines ou du couplage  $k^2$ .

La courbe de la figure 2 tient compte de la variation en fonction de la fréquence du taux de modulation  $b$  et de la tension aux bornes des bobines à puissance dissipée constante : ( $\tilde{B} \sim f^{-0,25}$  et  $V \sim f^{-0,75}$ ).

Les puissances indiquées tiennent compte des pertes dans l'écran électrostatique. Les pertes supplémentaires sont évaluées à 25% des pertes des bobines sans écran, (ceci correspond aux meilleurs résultats obtenus jusqu'à présent sur les maquettes).

Remarque :

Le rapport de l'amplitude du fondamental par rapport au champ magnétique au droit des bobines n'est voisin de 1 que pour les bobines  $\phi = 366$  dans l'enceinte de  $\phi = 462$ . La mesure de la distribution du champ magnétique dans un sixième n'a pas été faite dans les autres cas.



Nota 1 :

Si les caractéristiques du chauffage par T.T.M.P. le permettent, on a intérêt à travailler à fréquence basse (la tension aux bornes des bobines diminue et le taux de modulation augmente).

La fréquence maximum de travail est un paramètre important à préciser, elle détermine la tension, la puissance et donc le budget du projet.

Nota 2 :

La puissance évolue très vite en fonction du rapport  $\frac{a}{A}$ .

Et à puissance constante ~ 20 MW une bobine de 325 mm donne un champ H.F. de 750 G, alors qu'une bobine de 366 mm n'en donne que 450 G.

Cas d'une longueur d'onde :

L'intérêt de cette solution est de diviser par trois la fréquence de travail donc de diminuer la tension aux bornes des bobines tout en conservant un taux de modulation sensiblement constant (augmentation du champ magnétique mais diminution du taux du fondamental).

Dans le cas de 6 couples de bobines (3 par 3 en opposition) le taux du fondamental tombe à 0,82. La fréquence est divisée par trois. A puissance constante l'augmentation du taux de modulation est de 8% ( $0.82 B \cdot \sqrt{P} \omega^{-0.25}$  d'où  $B = 1.08 \sqrt{P}$ ) par rapport à la distribution à 3 longueurs d'onde. La tension aux bornes des bobines est divisée par  $3^{0,75} = 2,3$ .

L'inconvénient de cette solution, dans les dimensions de Pétula, est de multiplier par 9 la capacité des blocs d'accord, (encombrement des blocs d'accord, câbles de liaison, etc...).

TABLEAU RECAPITULATIF DES SOLUTIONS A 1 ET 3 LONGUEURS D'ONDE.

(A puissance constante 20 MW, pour 6 couples de bobines de 366 mm de diamètre, sans écran électrostatique.)

	3 $\lambda$	1 $\lambda$
fréquence minimale kHz	140	47
caractéristiques des blocs d'accord	7,45 $\mu$ F - (28 kV) 2,92 kJ	67 $\mu$ F (12,3 kV) 5 kJ
taux de modulation $B_{\phi} = 15$ kG	3,3 %	3,56 %
Tension bobine (kV)	27 à 21	11,8 à 9,2
fréquence minimale kHz	100	33
Condensateurs supplémentaires	6,6 $\mu$ F , 28 kV	59,4 $\mu$ F 12 kV
taux de modulation $B_{\phi} = 15$ kG	3,56 %	3,84 %
tension bobine kV	27 à 16	11,8 à 7

APPLICATION AU TORE H.F..

En prenant comme caractéristiques de ce projet :

$$\begin{aligned} B_{\phi} &= 20 \text{ kG} & R &= 150 \text{ cm} \\ r_{\text{coque}} &= 66 \text{ cm} \end{aligned}$$

et comme loi d'échelle, les lois établies aux chapitres précédents :

$$\begin{aligned} \frac{B}{V} &\sim \frac{1}{N\omega a^2} \\ P &\sim B^2 a^2 \omega^{1/2} \end{aligned}$$

à coefficient de couplage donné et rapport d'aspect des bobines données ( $\frac{2a}{l} = \text{constante}$ ).

Les puissances et les tensions aux bornes d'une bobine 1 tour, pour différents diamètres de bobines et pour différentes valeurs du champ magnétique H.F. sont exprimées dans les tableaux suivants :  
f = 200 kHz - 3 longueurs d'onde - bobine 1 tour.

diamètre bobine cm	k <sup>2</sup>	B̃ = 100 G		B̃ = 200 G		B̃ = 400 G	
		V kV	P MW	V kV	P MW	V kV	P MW
104,5	0,33	24,5	8	49,1	32	98,2	128
100	0,28	21,8	6	43,6	23,9	87,3	95,5
93	0,2	17,3	3,1	34,55	12,3	69,1	49,2

f = 67 kHz - 1 longueur d'onde - bobine 1 tour -

Diamètre bobine cm	100 G		200 G		400 G	
	V kV	P MW	V kV	P MW	V kV	P MW
104,5	8,2	4,6	16,4	18,5	32,7	74
100	7,3	3,5	14,5	13,8	29,1	55
93	5,8	1,8	11,5	7,1	23	28,4

Les courbes de puissance sont représentées sur la figure 3.

Remarque :

Les valeurs indiquées sur les tableaux sont des extrapolations directes des 6 couples de bobines espacés de  $15^\circ$  sans écran électrostatiques, définis pour Pétula.

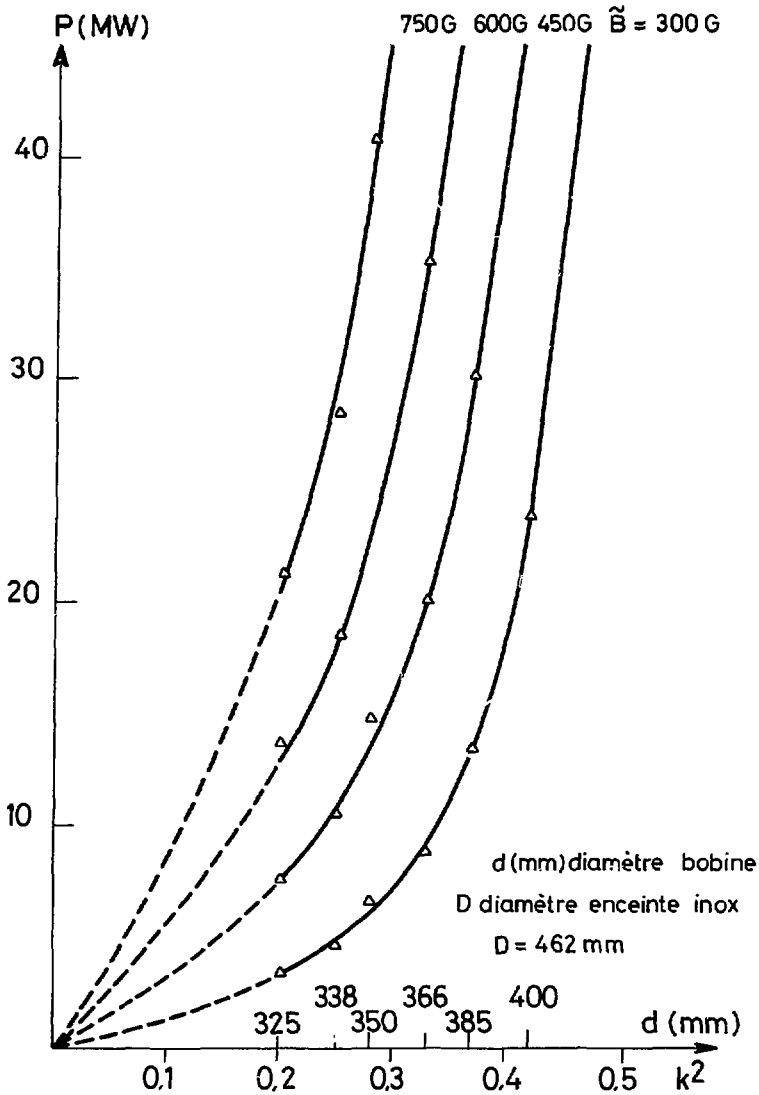
Dans le cas d'une longueur d'onde, le gain de 8% sur le champ magnétique a été négligé.

LEGENDE DES GRAPHIQUES.

Fig. 1 - Evolution de la puissance en fonction du diamètre ( $d = 2a$ )  
des bobines ou du coefficient de couplage  $k^2$ .

Fig. 2 - Evolution en fonction de la fréquence du taux de modulation  
et de la tension aux bornes des bobines.

Fig. 6 - Application au tore H.F.  
Taux de modulation en fonction de la puissance pour 1 et 3  
longueurs d'onde et pour différents coefficients de couplage.



Puissance dissipée dans 6 couples de bobines

Fig. 1

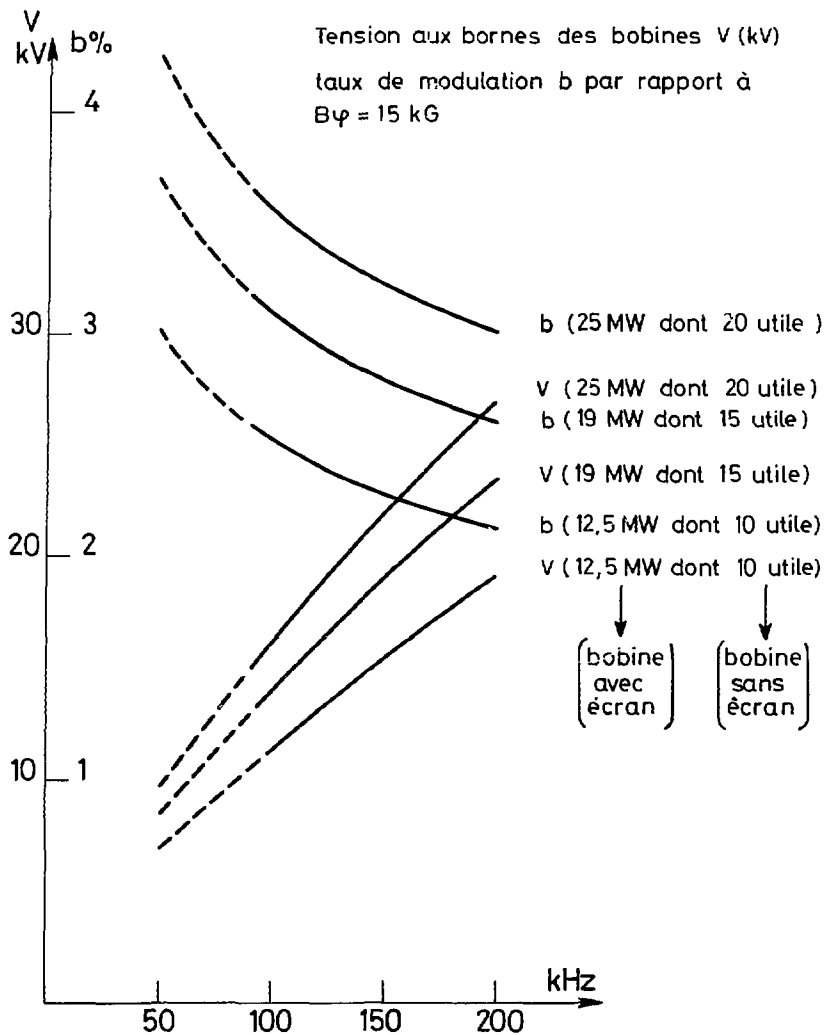


Fig. 2

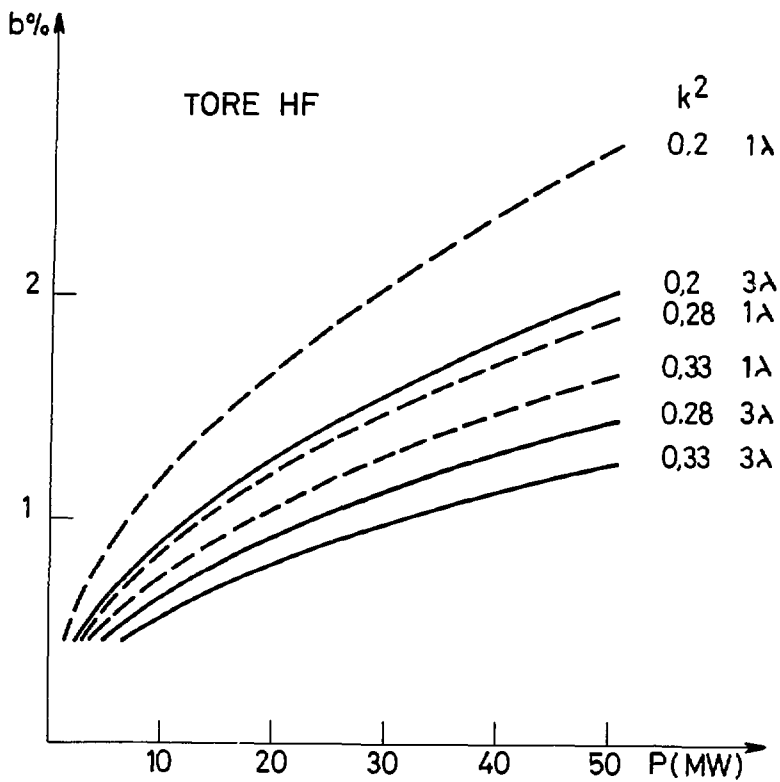


Fig. 3



CONCLUSION ET EXTRAPOLATION A DE PLUS GRANDES MACHINES.

Rappelons que cette étude a été effectuée sur PETULA avec ses paramètres et ses conditions spécifiques (enceinte de 462 mm de diamètre - largeur hors tout de la bobine 85 mm - démontabilité des bobines - utilisation principale pour trois longueurs d'onde).

Ceci a conduit à choisir 6 couples de bobines à deux tours (inductance trop faible pour des bobines 1 tour), dans une configuration particulière.

Néanmoins l'étude montre l'intérêt de travailler à fréquence basse (une longueur d'onde) avec des bobines à un tour (diminution de la tension de travail) et donne la dépendance de la puissance et de la tension en fonction du couplage.

Les lois d'échelles que l'on peut établir sont résumées dans le tableau suivant - le coefficient numérique n'est valable que si la disposition et le rapport d'aspect  $\frac{1}{2a}$  sont les mêmes que ceux de l'étude.

$\frac{a}{\bar{A}}$	$k^2$	P H F (M W)	$V_{kv}$ (1 tour)
0,7	0,2	$320 \times \tilde{B}_a^2 \tilde{f}^{1/2}$	$40 \cdot 10^3 \tilde{B}_a^2 \tilde{f}$
0,73	0,25	$401 \times \tilde{B}_a^2 \tilde{f}^{1/2}$	$41 \cdot 10^3 \tilde{B}_a^2 \tilde{f}$
0,76	0,28	$536 \times \tilde{B}_a^2 \tilde{f}^{1/2}$	$43 \cdot 10^3 \tilde{B}_a^2 \tilde{f}$
0,79	0,33	$652 \times \tilde{B}_a^2 \tilde{f}^{1/2}$	$45 \cdot 10^3 \tilde{B}_a^2 \tilde{f}$
0,83	0,37	$900 \times \tilde{B}_a^2 \tilde{f}^{1/2}$	$47 \cdot 10^3 \tilde{B}_a^2 \tilde{f}$

où :

- a : rayon en mètre ;
- A : " enceinte (acier inoxydable) en mètre ;
- B : Tesla crête
- f : en Hertz.

L'application directe de ces formules est illustré dans le paragraphe " Application au Tore H. F. ".

Il faut souligner que cette extrapolation n'est qu'un exemple d'application des formules établies dans la géométrie de Pétula.

En effet :

- a : L'optimisation de la distribution du champ dans une configuration à une longueur d'onde doit être faite.

- b : La minimisation de la puissance pour un champ magnétique H.F. est donné, pousse vers la réalisation de bobines H.F. large.

La dépendance fonctionnelle de la puissance s'écrit :

$$P = f \left( k^2, \frac{Q_1}{Q_2} \right) \sqrt{\rho \omega} \left( \frac{1}{2a} + \frac{2a}{l} \right) \tilde{B}^2 a^2$$

Le terme  $\left( \frac{1}{2a} + \frac{2a}{l} \right)$  est minimum pour des bobines carrées  $\left( \frac{l}{2a} = 1 \right)$ . Rappelons que le  $\frac{1}{2a}$  des bobines de Pétula est de l'ordre de 0,1.

L'élargissement des bobines sera limité, indépendamment des problèmes de réalisation par deux termes :

- a - la fonction  $f(k^2)$  est relativement rapide et  $k^2$  dépend de  $\frac{l}{2a}$  ;
- b - l'inductance de bobines larges est faible à titre d'exemple une bobine carrée de 1 m de diamètre présente une inductance de 0,7  $\mu$ H..

Des études et des essais sur maquette sont nécessaires pour définir un projet.

A N N E X E

RESULTATS SUR L'ECRAN ELECTROSTATIQUE.

La réalisation d'un écran électrostatique sur les bobines T.T.M.P. a un double rôle :

- blinder le champ électrostatique, afin d'éviter un déconfinement du plasma ;
- définir à la surface du diélectrique de la bobine une équipotentielle nulle, ce qui permet d'effectuer les essais en tension de la bobine dans de bonnes conditions, (fixation du potentiel de l'environnement de la bobine).

Trois solutions ont été étudiées :

- . écran continu
- . écran ouvert
- . écran en forme de solénoïde.

- 1 - Dans le cas d'un écran continu même de faible épaisseur, il apparaît une très forte dissipation d'énergie dans l'écran et un blindage du champ magnétique.

Essais réalisés avec un écran constitué d'un dépôt d'or de quelques microns.

B/V varie de 23 G/kV à 4,5 G/kV

R// varie de 160  $\Omega$  à 16,5  $\Omega$ .

- 2 - Si l'écran est ouvert les pertes diminuent, il ne reste que les pertes par courant de Foucault dans l'épaisseur du blindage, mais au niveau de l'ouverture la tension à tenir est très importante (15 kV/tour).

De plus dans l'enceinte à vide, les bobines baignent dans de l'hydrogène à une pression de  $10^{-4}$  Torr, domaine de pression où il est facile de tirer des décharges.

Ce problème de tenue en tension pourrait être atténué, en augmentant le nombre de coupures de l'écran (écran en forme de peigne).

Essais réalisés avec 11 bandes de cuivre de 70 mm de long et de 1/10 de mm d'épaisseur :

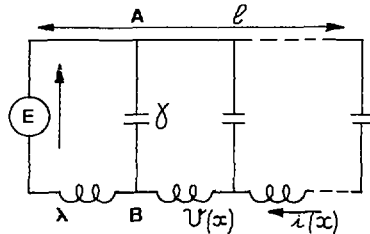
B/V varie de 18,6 G/kV à 13,7 G/kV

$R_{//}$  varie de 233  $\Omega$  à 166  $\Omega$ .

- 3 - En bobinant tout autour de la bobine un conducteur, l'écran se présente sous la forme d'un solénoïde torique court-circuité à ses extrémités.  
La fermeture de l'écran résout le problème de la tenue en tension mais peut amener des pertes supplémentaires et un blindage du champ magnétique.

Schéma équivalent :

L'ensemble bobine, écran, peut être assimilé à une succession de cellules  $\lambda$ ,  $\gamma$ .



Quand la fréquence croît, le potentiel du point B croît et tend vers le potentiel du point A. La fréquence limite d'utilisation de cet écran sera la fréquence à partir de laquelle le potentiel du point B n'est plus celui de la masse.

Calcul du potentiel aux bornes de l'écran :

$$(I) \quad \frac{\partial v(x)}{\partial x} = j \lambda \omega i(x) \quad d'où \quad \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} = \lambda \gamma \omega^2 (E-v)$$

$$(II) \quad \frac{\partial i(x)}{\partial x} = j \gamma \omega (E - v(x))$$

$$(III) \quad v(x) = A \cos kx + B \sin kx + E \text{ avec } k^2 = \omega^2 \gamma \lambda$$

pour  $x = 0$   $v(0) = 0$  d'où  $A = -E$  d'après l'équation (I).

$$(IV) i(x) = \frac{1}{j} \sqrt{\frac{\gamma}{\lambda}} (B \cos kx + E \sin kx)$$

$$i(0) = i_0 \text{ d'où } B = i_0 j \sqrt{\frac{\lambda}{\gamma}}$$

posons  $Z_0 = \sqrt{\frac{\lambda}{\gamma}}$  ; soit  $Z_r$  la charge de la ligne.

$$E - v(l) = Z_r i(l)$$

avec les équations (III) et (IV) nous avons :

$$E (\cos k l + j \frac{Z_r}{Z_0} \sin k l) = i_0 (Z_r \cos k l + j Z_0 \sin k l)$$

Si  $Z_i$  est l'impédance vue de la source.

$$Z_i = Z_0 \frac{Z_r + j Z_0 \operatorname{tg} k l}{Z_0 + j Z_r \operatorname{tg} k l}$$

Si l'écran est ouvert  $Z_r$  infini d'où  $Z_i = Z_0 \operatorname{tg} k l$

$$v(x) = E (1 - \cos kx - \operatorname{tg} k l \sin kx)$$

$$\frac{\partial v(x)}{\partial x} = 0 \text{ pour } x = l$$

$$v(l) = E \left(1 - \frac{1}{\cos k l}\right)$$

$$\text{posons } fr = \frac{1}{2 \pi l \sqrt{\gamma \lambda}} \quad \text{où } \lambda, \gamma \text{ sont}$$

les valeurs par unité de longueur.

Notons : que  $v(l)$  devient infini pour  $\cos k l = 0$  soit  $k l = n \frac{\pi}{2}$

$$\text{c'est à dire pour } f = n \frac{\pi}{2} fr$$

$$v(l) = E \left( 1 - \frac{1}{\cos \frac{f}{fr}} \right) \quad v(l) \text{ est } < 0$$

$$f = fr \arccos \frac{1}{1 + \left| \frac{v(l)}{E} \right|}$$

Cette formule définit ainsi la fréquence limite d'utilisation de l'écran.

Dans le cas où l'écran sera fermé sur lui même le schéma de celui-ci peut être assimilé à celui de 2 séries de cellules  $\lambda, \gamma$  mises en parallèle et de longueur  $\frac{1}{2}$ .

Les calculs dans ce cas sont identiques et conduisent à la conclusion que le potentiel est maximum à  $l/2$  et à une fréquence double.

#### RECHERCHE EXPERIMENTALE DE LA FREQUENCE DE COUPURE.

La méthode utilisée consiste à mesurer au Q mètre, l'impédance entre l'enroulement et l'écran, en fonction de la fréquence  $f$ .

A  $f = 0$  l'impédance est purement capacitive.

La fréquence de coupure  $f_c$  est définie comme étant la fréquence à partir de laquelle on note une variation de l'impédance entre l'enroulement de la bobine et l'écran.

Différents types d'écrans ont été étudiés, les principaux résultats sont rassemblés dans le tableau ci-après.

RESULTATS EXPERIMENTAUX :

Ø bobines = 368 mm- longueur = 16 mm 2 tours.

Nature du métal de l'écran	Nb de tour de l'écran	Seff de l'écran L $\mu$ H	capacité bobine écran C pf	f kHz	$\frac{\pi}{2}$ fr kHz	fc kHz	R// écran ouvert	R// écran fermé	Remarques
Cu $\phi$ 0,5	1900	5700	160	172	270	140	185	185	K// d'une bobine nue 228 $\Omega$
Cu $\phi$ 0,7	1600	2360	147	270	424	200	155	155	
Cu $\phi$ 1	1000	1240	150	369	580	300	150	150	
0,8 x 4	243	111	140	1276	2000	500	149	135	
0,8 x 8	120	32	152	2300	3600	1900	130	115	
Al. 20 x .08	48	4.2	150	6400	8000	4000	140	112	
INox 1 x 0.6	152	51	195	1500	2500	1300	180	150	

Pour un écran fermé un compromis devra être fait sur le nombre de spires de l'écran.

$$N_m < \text{nombre de spires} < N_M$$

$N_m$  nombre de tours minimum en dessous duquel les pertes provoquées par la fermeture de l'écran sont décelables.

$N_M$  nombre de tours maximum déterminé par le choix de la fréquence de coupure de l'écran.

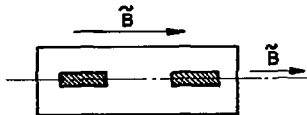
COUPLAGE PLASMA - ECRAN DE BOBINES T.T.M.P. :

Un tel écran fermé constitue un transformateur d'intensité avec le courant plasma, il faudra donc une forte épaisseur pour limiter son échauffement. Or pour diminuer les pertes par courant de Foucault, il faut un écran le plus fin possible.

Dans les calculs qui vont suivre, l'épaisseur de l'écran sera choisie de 0,1mm épaisseur qui entraîne une élévation de température inférieure à 1°C durant un choc.

EVALUATION DES PERTES PAR COURANT DE FOUCAULT :

Les lignes de champ seront supposées  $\perp$  et  $\parallel$  à l'écran.



calcul fait pour une bobine en Alumine  $\varnothing = 348$ .

$$\frac{P}{S} = \frac{H_0^2}{\gamma \delta} \frac{\operatorname{sh} \frac{2b}{\delta} - \sin \frac{2b}{\delta}}{\operatorname{ch} \frac{2b}{\delta} + \cos \frac{2b}{\delta}} = \frac{H_0^2}{\gamma \delta} A.$$

$$f = 200 \text{ kHz}$$

$$\delta = 0.15 \text{ mm pour le cuivre et } 1 \text{ mm pour l'acier inoxydable}$$

$$2b = 0.1 \text{ mm épaisseur de l'écran}$$

$$\text{Cu} \quad \frac{P}{H_0^2 S} = 6.53 \cdot 10^{-6} = F$$

$$\text{Inox} \quad \frac{P}{H_0^2 S} = 1.67 \cdot 10^{-7} = F$$

$$\int \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 NI \quad \frac{NI}{l} = H_0$$



$$P \text{ écran} = F \times 2\pi \times .174 \times .23 \times \frac{N^2 V^2}{(.23)^2 L^2 \omega^2}$$

$$P \text{ bobine} = \frac{V^2}{QL\omega}$$

$$\frac{P \text{ écran}}{P \text{ bobine}} = F \times 2\pi \times .174 \times .23^{-1} \times \frac{N^2 Q}{L\omega}$$

$$Q = 200$$

$$\text{pour Cu} \quad 6.6 \cdot 10^{-3}$$

$$L = 3 \mu\text{H}$$

$$\text{pour l'inox} \quad 1.67 \cdot 10^{-4}$$

$$N = 2 \text{ tours}$$

Sur les cotés le champ  $\vec{B}$  sera supposé au conducteur :

$$p = \frac{H_0^2 \rho S}{\delta} \quad (\text{hauteur considéré 3 cm}).$$

$$\frac{P \text{ écran}}{P \text{ bobine}} = \frac{2\rho}{\delta} \frac{2\pi \times .174 \times 3 \cdot 10^{-2} \times N^2 Q}{(.23)^2 L \omega}$$

$$\text{pour le Cu} \quad : \quad 3,3 \cdot 10^{-2}$$

$$\text{pour l'inox} \quad : \quad 26 \cdot 10^{-2}$$

Ces calculs numériques montrent que l'évolution des pertes dans l'écran électrostatique dépend de sa position par rapport lignes au champ et de la conductibilité du matériau employé.

En effet si l'écran suit une ligne de champ, un minimum de pertes sera obtenu avec un matériau résistif au contraire s'il ne suit pas une ligne de champ, il faut employer un matériau conducteur.

Le cas réalisé expérimentalement se place entre ces deux cas limites.

Les résultats expérimentaux conduisent aux conclusions suivantes :

- l'écran devra être réalisé avec un minimum de 250 tours.
- Les pertes augmentent avec l'épaisseur et la conductibilité du matériau, il faut donc s'orienter vers des écrans fins et résistifs.
- Pour évaluer la puissance T.T.M.P. nécessaire, il faudra prendre une évaluation des pertes dans l'écran électrostatique de l'ordre de 20 %.

