

COUPLAGES ENTRE DIPOLES DE CORRECTION DU BOOSTER

M. Chanel, M. Perrin et J.P. Royer

1. INTRODUCTION

Dans le cadre des projets de remplissage multiple^{1,2)} et de production d'anti-protons³⁾ certains aimants de correction du PSB, habituellement alimentés en courant continu ou en courant légèrement variable, ont dû être alimentés par un courant pulsé, pour avoir un temps de montée en courant plus rapide⁴⁾.

Ce courant est généré par une alimentation à décharge de capacité⁵⁾. Cette alimentation fournit une impulsion de courant avec un plateau régulé en courant (stabilité et précision 2×10^{-3} pendant 250 μ s).

Lors des tests de mise en opération, des problèmes de couplage entre aimants proches sont apparus.

Cette note explique le problème, les solutions possibles, celle qui a été retenue.

2. LES OBSERVATIONS

2.1 Dipôles de correction d'orbite à l'éjection - type 1)
(Ei.DHZ11L1, Ei.DVT11L1, Ei.DHZ4L1, Ei.DVT4L1)

Ces aimants sont assemblés en un "stack" de quatre aimants (1 aimant par anneau).

Si un dipôle est alimenté par un courant pulsé, ce courant varie si les dipôles voisins du "stack" sont alimentés. Les figures 1a et 1b montrent le courant normal dans le dipôle du niveau horizontal 2 et le même courant perturbé si le dipôle du niveau horizontal 3 est alimenté.

L'impulsion de courant dans le dipôle considéré varie en valeur crête et en période, rendant impossible la régulation en courant sur le plateau.

Le couplage étant différent selon l'éloignement et la position (horizontale ou verticale), les perturbations seront plus importantes si les dipôles sont proches. Les plans horizontaux s'influencent mutuellement plus que les plans verticaux. Il n'y a pas d'influence des plans horizontaux sur les plans verticaux et réciproquement.

2.2 Dipôles de recombinaison - type 4af (BTi-DHZ10)

Le même phénomène se produit pour ces aimants, lorsqu'ils sont assemblés en "stack", avec un couplage plus important.

Les figures 2a et 2b montrent le courant normal dans le dipôle du niveau horizontal 4 et le même courant perturbé si le dipôle du niveau horizontal 3 est alimenté.

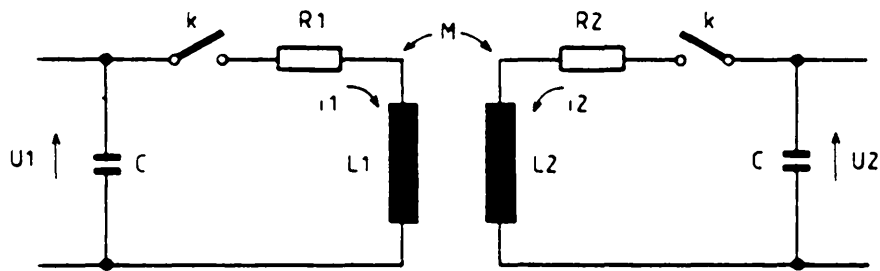
3. EXPLICATIONS

Les aimants qui étaient destinés à être alimentés en courant continu ou en courant légèrement variable (di/dt faible) ont été fabriqués avec la bobine entourant la culasse (fig. 3). Il y a donc un champ de fuite assez important en dehors de l'aimant. Le flux total dans l'aimant est trois fois le flux utile de l'entrefer ($\phi_T = 3\phi_u$). Lorsque deux aimants sont proches, une partie du flux de fuite de l'un est captée par l'autre. Cet effet a peu d'importance dans le cas d'un di/dt faible ou nul. Par contre, avec un di/dt élevé la tension induite par l'aimant voisin produit deux perturbations importantes :

- 1) le niveau de courant varie,
- 2) la période de l'impulsion de courant varie.

Ceci est dû à la variation d'inductance équivalente d'un aimant en fonction du courant de l'aimant voisin (voir paragraphe suivant).

4. CALCUL DU COURANT DANS LES AIMANTS



Fermons les interrupteurs K au même instant; en notation symbolique nous avons les équations suivantes :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{U_1}{p} - \frac{I_1}{cp} = (R_1 + L_1 p)I_1 + MpI_2 \\ \frac{U_2}{p} - \frac{I_2}{cp} = (R_2 + L_2 p)I_2 + MpI_1 \end{array} \right. \quad (1)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{U_1}{p} - \frac{I_1}{cp} = (R_1 + L_1 p)I_1 + MpI_2 \\ \frac{U_2}{p} - \frac{I_2}{cp} = (R_2 + L_2 p)I_2 + MpI_1 \end{array} \right. \quad (2)$$

Après calcul nous obtenons

$$I_1 = \frac{1}{L} \cdot \frac{U_1 \left(p^2 + \frac{R_2}{L_2} p + \frac{1}{L_2 C_2} \right) - M U_2}{\left(p^2 + \frac{R_1}{L_1} p + \frac{1}{L_1 C_1} \right) \left(p^2 + \frac{R_2}{L_2} p + \frac{1}{L_2 C_2} \right) - \frac{M^2 p^2}{L_1 L_2}}$$

avec

$$\left\{ \begin{array}{l} R_1 = R_2 = 0 \\ L_1 = L_2 = L \\ C_1 = C_2 = C \\ \omega^2 = 1/LC \\ M = K \cdot \sqrt{L_1 L_2} = K \cdot L \end{array} \right.$$

le courant devient

$$I_1 = \frac{1}{L(1 - K^2)} \cdot \frac{U_1(p^2 + \omega^2) - K p^2 U_2}{\left(p^2 + \frac{\omega^2}{1 - K} \right) \left(p^2 + \frac{\omega^2}{1 + K} \right)}$$

En revenant dans le domaine temporel nous obtenons

$$I_1 = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{C}{L}} \left[\frac{U_1 - U_2}{\sqrt{1 - K}} \sin \left(\frac{\omega}{\sqrt{1 - K}} t \right) + \frac{U_1 + U_2}{\sqrt{1 + K}} \sin \left(\frac{\omega}{\sqrt{1 + K}} t \right) \right].$$

Une formule identique est obtenue pour I_2 .

Cette formule explique bien les variations de période et de courant de l'impulsion fournie par l'alimentation. La figure 4 montre le tracé des variations de courant I_1 en fonction du temps pour des valeurs de tension de charge U_2 différentes. Les figures 1c et 2c montrent la tension induite recueillie aux bornes de l'aimant voisin et permettent de calculer le coefficient de couplage.

Dipôle de correction d'orbite à l'éjection

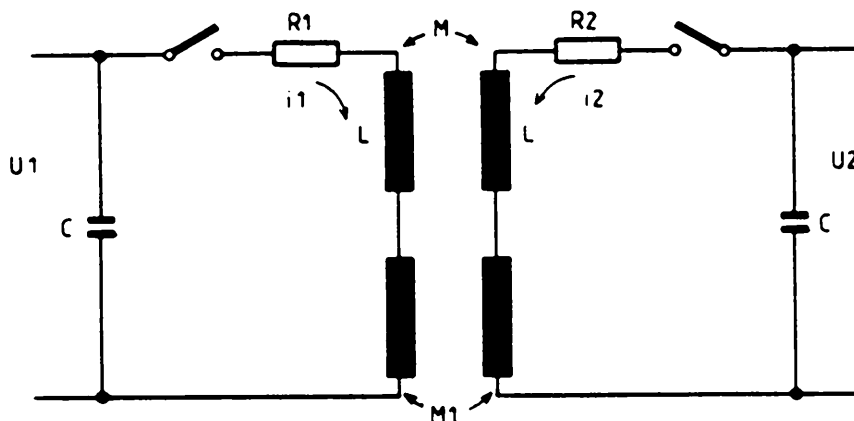
$$M \approx 6,4 \text{ mH} \quad L \approx 74 \text{ mH} \quad K \approx 8,6\%.$$

Dipôle de correction de recombinaison

$$M \approx 22 \text{ mH} \quad L \approx 80 \text{ mH} \quad K \approx 27\%.$$

5. COMMENT REDUIRE LES TENSIONS INDUITES?

5.1 Compensation du couplage par un couplage opposé



Des tests furent réalisés avec un bobinage sur un circuit magnétique à entrefer pour permettre l'ajustement de la self de couplage. Ce système permet d'annuler les perturbations pour des écarts de courant $|I_1 - I_2|$ voisins de 10 A sur les BT-DHZ10. Pour une différence de courant plus grande il y a saturation du circuit magnétique utilisé.

Pour obtenir un fonctionnement correct pour $|I_1 - I_2| = 40$ A il faudrait un circuit magnétique trop grand pour être raisonnablement construit. D'autre part pour annuler totalement les effets de couplage il faudrait créer un autre couplage pour compenser les effets des dipôles plus éloignés (exemple : effet du niveau 2 sur le niveau 4). Cette solution devient vite encombrante et onéreuse.

5.2 Diminution du couplage par courant de Foucault avec des plaques de cuivre

Le couplage des aimants étant lâche (couplage à air) et l'alimentation étant pulsée (demi période ≈ 10 ms) des plaques en matériau conducteur pour séparer les aimants peuvent être utilisées⁶⁾.

Les tests réalisés indiquent que des plaques de cuivre abaissent le coefficient de couplage. Des plaques de cuivre de 15 mm d'épaisseur furent donc installées entre les aimants (fig. 5). De même l'adjonction d'une tôle d'acier au silicium (M6X) de 0,35 mm d'épaisseur est favorable.

Les photos (fig. 1d et 2d) montrent que le coefficient de couplage est réduit d'un facteur $\approx 4,3$ pour les dipôles de correction d'orbite et d'un facteur ≈ 7 pour les dipôles de correction de recombinaison avec l'installation des plaques de cuivre et de la tôle d'acier.

Les tests ont montré que les dipôles de correction d'orbite à l'éjection peuvent travailler dans ces conditions avec $|I_1 - I_2| = \pm 12$ A et les dipôles de recombinaison avec $|I_1 - I_2| = 14$ A.

Ces plaques furent installées et remplacèrent les anciens supports en anti-corrodal.

6. SOLUTION A LONG TERME

La solution de diminution de couplage par courant de Foucault en mettant des plaques de cuivre et des tôles d'acier fut retenue⁷⁾. Elle donne entière satisfaction pour les dipôles de correction d'orbite à l'éjection, même à long terme⁷⁾.

D'autre part, pour permettre d'augmenter le courant dans les dipôles de recombinaison, ceux-ci seront remplacés par des dipôles de type 8af qui n'ont pas de champ de fuite car la bobine est placée à l'intérieur du circuit magnétique. Ceci est possible car ces dipôles ne sont utilisés que pour le plan horizontal et la chambre à vide permet une telle installation.

7. CONCLUSION

Les solutions décrites ci-dessus ont permis de s'adapter rapidement au matériel existant afin que le Booster continue à fonctionner dans de bonnes conditions.

En général, il serait souhaitable de pouvoir travailler avec des flux de fuite négligeables ou, si cela n'est pas possible, d'utiliser des alimentations permettant d'absorber les tensions induites⁸⁾.

Remerciements

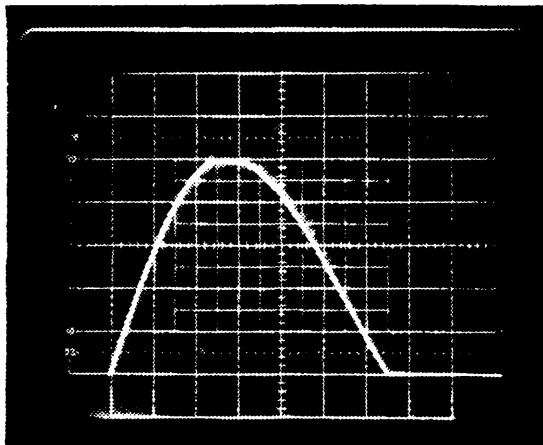
Nous tenons à remercier toutes les personnes qui nous ont aidés à la compréhension de ces phénomènes et à la réalisation pratique de l'installation.

Distribution

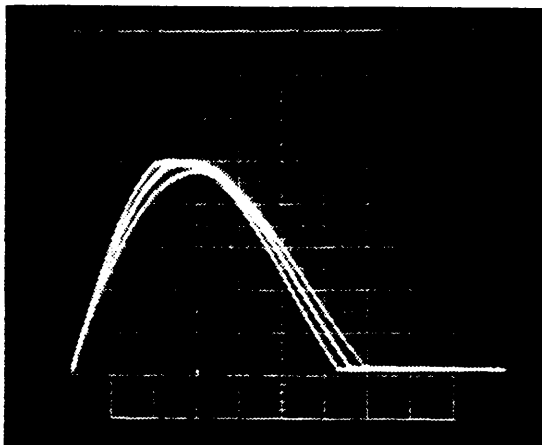
Booster Committee	J.P. Royer
P. Bossard	M. Métais
M. Chanel	R. Gailloud
G. Suberlucq	H. Fibieger
M. Perrin	S. Laudet
R. Valbuena	F. Gendre
F. Völker	J.P. Delahaye

REFERENCES

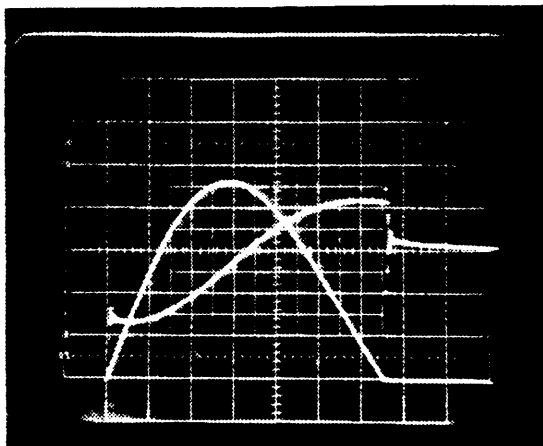
- 1) K.H. Reich, Les modifications du PSB pour le remplissage multiple du SPS, CERN/PS/BR 77-34 (1977).
- 2) J.P. Delahaye et K. Schindl, Performance specifications for power supplies with a PSB cycle of 0.6 sec length (Multipulsing), PS/BR Note 76-33 (1976).
- 3) J.P. Delahaye, Les modifications du Booster pour l'anneau AA, CERN/PS/BR 78-12 (1978).
- 4) J.P. Delahaye, Ajustement individuel par anneau sur l'orbite fermée à l'éjection, PS/BR Note 77-19 (1977).
- 5) J.P. Royer et F. Völker, Modular pulsed power supplies for the PS Booster, CERN/PS/BR 80-2 (1980).
- 6) P. Bossard, communication privée.
- 7) J.P. Delahaye, Communication interne PS/BR du 31.10.1981.
- 8) F. Völker, communication privée.



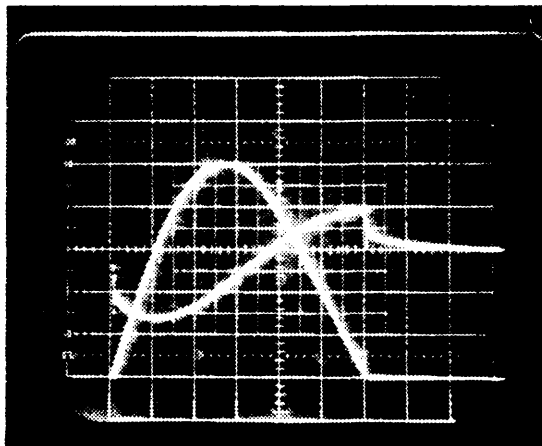
a) Courant normal dans le dipôle $BE_2.DHZ11L1$, avec courant nul dans les autres dipôles.
(4 A/div., 2 ms/div.)



b) Courant dans le dipôle $BE_2.DHZ11L1$ perturbé par $BE_3.DHZ11L1$; avec +20 A : période plus grande, avec -20 A : période plus petite.
(4 A/div., 2 ms/div.)

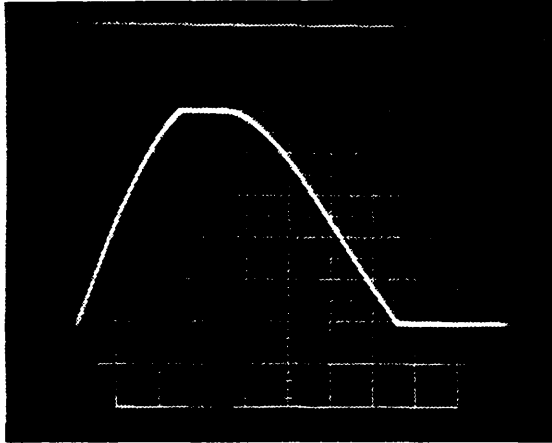


c) Tension induite recueillie sur $BE_3.DHZ11L1$ ouvert (20 V/div.) avec un courant dans $BE_2.DHZ11L1$ (4 A/div., 2ms/div.).
Sans plaques: $M \approx 6,4$ mH, $K \approx 8,6\%$.

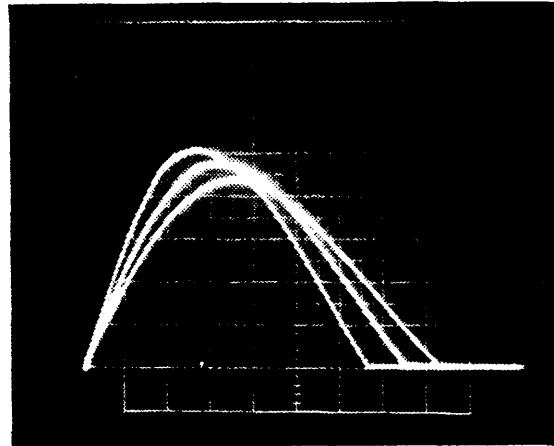


d) Tension induite recueillie sur $BE_3.DHZ11L1$ ouvert (5 V/div.) avec un courant dans $BE_2.DHZ11L1$ (4 A/div., 2 ms/div.).
Avec plaques: $M \approx 1,6$ mH, $K \approx 2\%$.

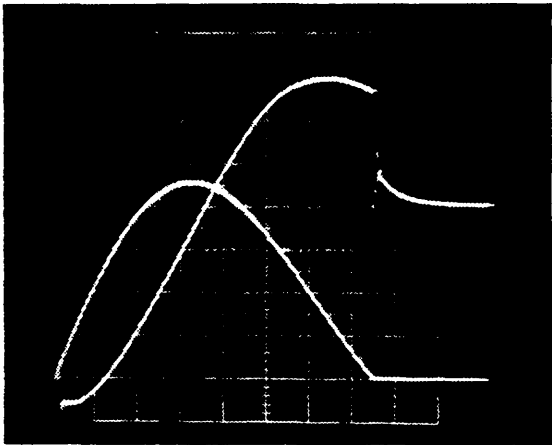
Fig. 1 Dipôles de correction d'orbite à l'éjection



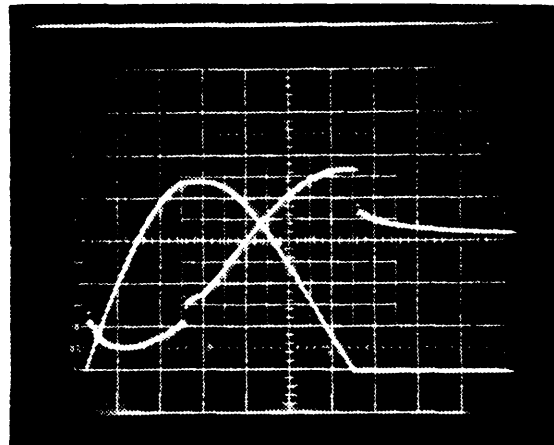
a) Courant normal dans le dipôle BT₄.DHZ10, avec courant nul dans les autres dipôles. (4 A/div., 2 ms/div.).



b) Courant dans le dipôle BT₄.DHZ10 perturbé par BT₃.DHZ10; avec +20 A : période plus grande, avec -20 A : période plus petite. (4 A/div., 2 ms/div.).



c) Tension induite recueillie sur BT₄.DHZ10 ouvert (20 V/div.) avec un courant dans BT₃.DHZ10 (4 A/div., 2 ms/div.).
Sans plaques: $M \approx 22$ mH, $K \approx 27\%$.



d) Tension induite recueillie sur BT₄.DHZ10 ouvert (5 V/div.) avec un courant dans BT₃.DHZ10 (4 A/div., 2 ms/div.).
Avec plaques: $M \approx 3$ mH, $K \approx 3,7\%$.

Fig. 2 Dipôles de correction de recombinaison

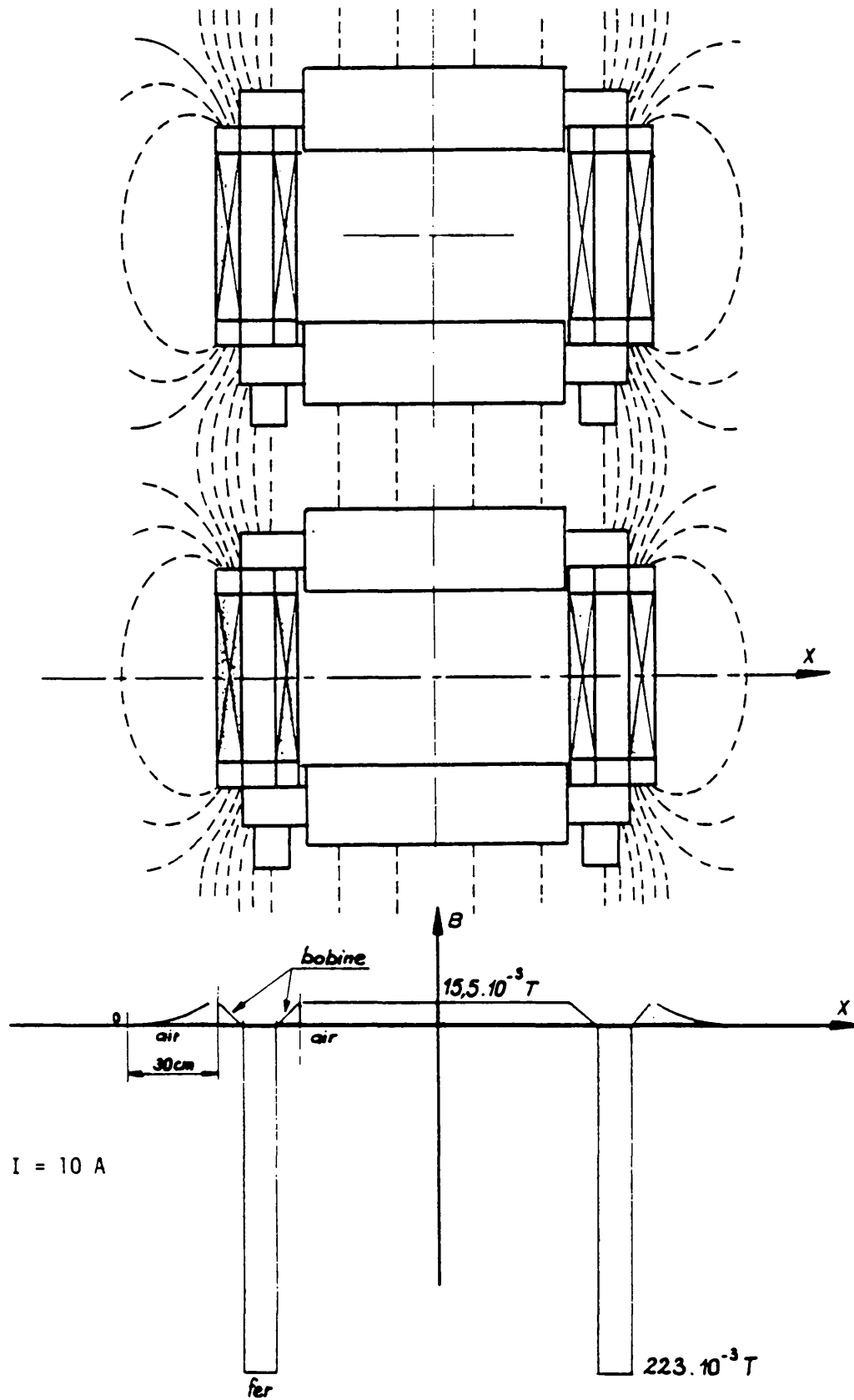


Fig. 3 Schéma de principe de la culasse et du bobinage des dipôles, et répartition du champ.

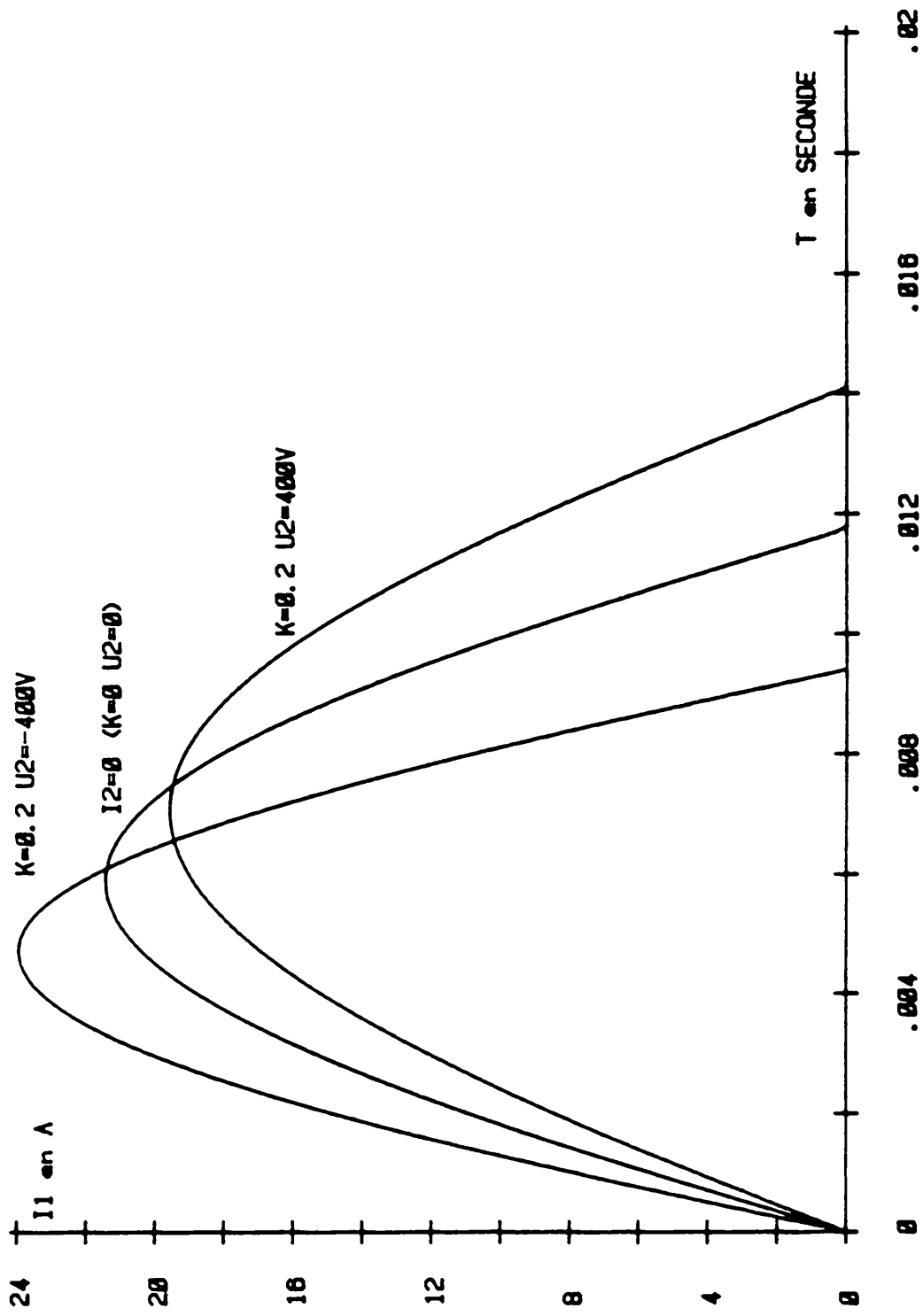


Fig. 4 Variations du courant I_1 en fonction du temps pour des valeurs de tension de charge U_2 différentes avec un coefficient de couplage $K = 0,2$

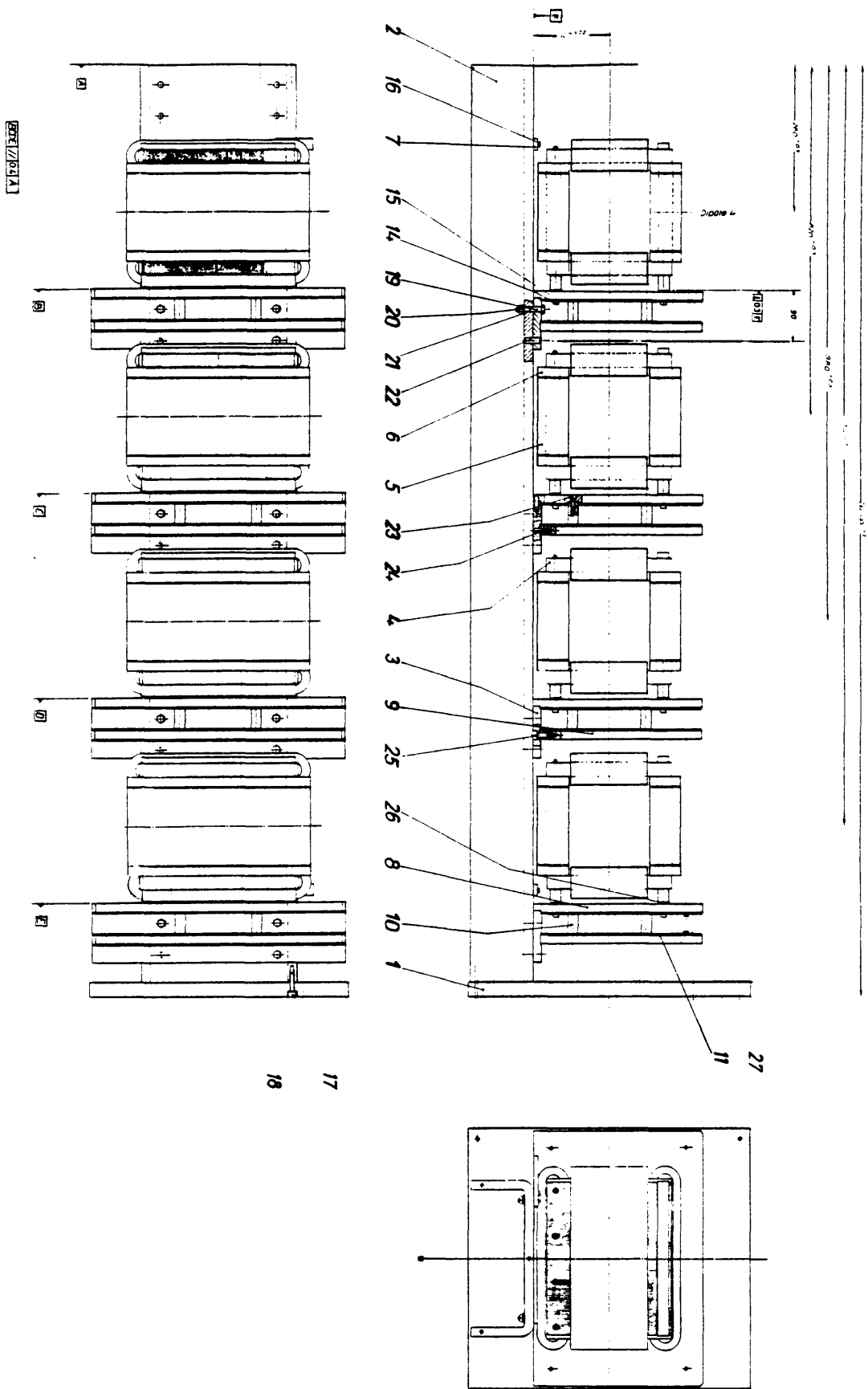


Fig. 5 Disposition des plaques de cuivre et d'acier au silicium sur le stack des dipôles de correction d'orbite à l'éjection