

**Zeitschrift:** Archives des sciences [1948-1980]  
**Herausgeber:** Société de Physique et d'Histoire Naturelle de Genève  
**Band:** 9 (1956)  
**Heft:** 4

**Artikel:** Spectrographie hertzien à haute résolution et relaxation nucléaire  
**Autor:** Manus, Claude  
**Kapitel:** V: Production du champ magnétique  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-738983>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 03.05.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

## CHAPITRE V

### PRODUCTION DU CHAMP MAGNÉTIQUE

#### § 1. INTRODUCTION.

Les exigences auxquelles doit satisfaire le champ magnétique sont extrêmement sévères si le spectrographe est destiné à l'observation des raies étroites. Deux points essentiels doivent être pris en considération :

- 1) homogénéité extrême dans le volume étudié;
- 2) stabilité dans le temps du champ.

Trois solutions sont possibles :

- a) *L'aimant permanent* donne toute satisfaction en ce qui concerne le deuxième point (à noter que le coeff. de temp. est de l'ordre de  $-2 \cdot 10^{-4}/^{\circ}\text{C}$  [54]. En revanche, il est très difficile d'obtenir une très grande homogénéité, en raison du non-parallélisme des pièces polaires, des inhomogénéités internes de l'aimant, etc. Néanmoins, des résultats remarquables ont été obtenus avec des aimants permanents [55, 56];
- b) *L'électro-aimant* est soumis aux mêmes difficultés en ce qui concerne l'homogénéité, de plus la stabilité dans le temps du champ est liée directement aux fluctuations du courant d'alimentation. Cette solution semble triompher à l'heure actuelle grâce à l'emploi de générateurs de courant continu stabilisés par résonance nucléaire [57]. Des considérations financières ne nous permettant d'opter ni pour *a)* ni pour *b)*, nous avons été amenés à envisager une troisième solution : les bobines de Helmholtz;
- c) *Les bobines de Helmholtz* : Il est relativement aisé d'obtenir une bonne homogénéité. Les dérives dans le temps du champ sont liées, d'une part, à la variation de température

des bobines, d'autre part à la variation de tension des accumulateurs sous charge. Il faut donc travailler dans la mesure du possible avec des courants de faible valeur et des accumulateurs à grosse capacité.

Il est évident, pour des raisons d'échauffement, qu'il convient de se limiter à des champs de faible valeur ne dépassant pas 500 gauss. La production d'un champ magnétique plus élevé, de haute homogénéité, pose un problème d'alimentation de courant et de refroidissement d'un prix très coûteux.

## § 2. EXPRESSIONS FONDAMENTALES.

Soit :

$N$  = nombre total des spires des deux bobines  
 $R$  = rayon moyen des bobines  
 $h$  = hauteur du bobinage  
 $b$  = largeur du bobinage.

On sait, par les travaux de Ruark, Peters [58] et Béné [59] que les expressions donnant la valeur du champ magnétique au centre de symétrie sont :

$$H_x = \frac{Ni}{10 R} \left[ a \left( 1 - \frac{h^2}{60 R^2} \right) - c \frac{r^4}{R^4} (35 \cos^4 \theta - 30 \cos^2 \theta + 3) + \dots \right] \quad (V-1)$$

$$H_y = \frac{Ni \sin \theta \cos \theta}{10 R} \left[ c \frac{r^4}{R^4} (28 \cos^2 \theta - 12) + \dots \right]$$

$$a = 16 \pi 5^{-3/2} \quad \text{et} \quad c = 2^5 3^2 \pi 5^{-9/2} .$$

Expressions valables pour :

$$31 h^2 - 36 b^2 = 0 . \quad (V-2)$$

Rappelons que la distance entre les plans moyens des bobines est égale au rayon  $R$ .

Nous avons choisi les valeurs suivantes :

$$\begin{aligned} N &= 790 \text{ spires (en 22 couches par bobine)} \\ h &= 8,4 \text{ cm} \\ b &= 7,8 \text{ cm} \\ R &= 20 \text{ cm} \\ \oint \text{fil} &= 0,4 \text{ cm.} \end{aligned}$$

Ces valeurs permettent de prévoir que dans une sphère de rayon de 1 cm :

$$\frac{\Delta H}{H} \approx 10^{-5} .$$

Pour la confrontation avec l'expérience, voir chapitre VI.

### § 3. ETUDE DU REFROIDISSEMENT DES BOBINES.

Afin de pouvoir produire un champ magnétique suffisamment élevé, un système de refroidissement efficace s'impose. De nombreuses solutions peuvent être envisagées.

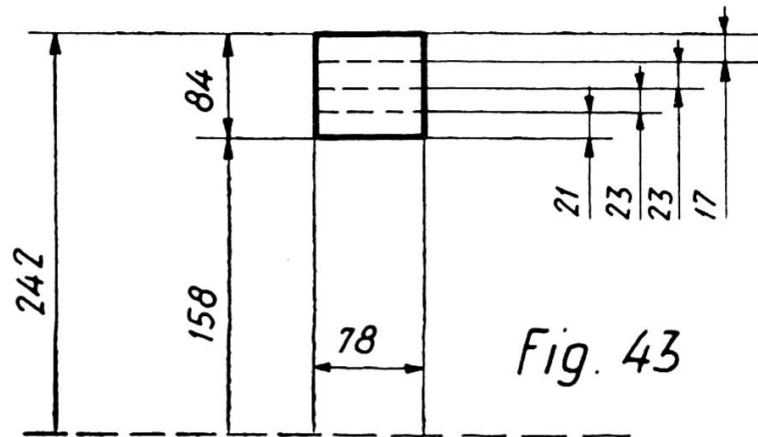
- a) refroidissement par les flasques avec circulation d'eau à l'intérieur de ces dernières;
- b) ventilation sur les bobines;
- c) refroidissement par circulation d'eau entre les spires maintenues écartées les unes des autres;
- d) refroidissement par tuyaux de cuivre parcourus eux-mêmes par le courant électrique.

Les deux premières solutions ne permettent pas des refroidissements très efficaces. Ainsi la ventilation a pour effet d'augmenter le coefficient de convection d'un facteur 5 seulement aux plus grandes vitesses de ventilation (soit 20-30 m/sec). De plus, elle présente des inconvénients en ce qui concerne les effets microphoniques. La solution c) est des plus intéressante au point de vue thermique. En revanche, la géométrie du bobinage est telle que l'homogénéité du champ magnétique est fortement compromise.

C'est la quatrième solution qui a prévalu. Elle permet d'obtenir une très haute homogénéité, en même temps qu'un refroidissement efficace. C'est ainsi que nous avons été amenés à choisir trois couches de tuyaux de refroidissement par bobine, disposées selon le schéma de la figure 43.

Il y a 22 couches de 18 spires chacune. Les couches de tuyaux se trouvent sur les 6<sup>e</sup>, 12<sup>e</sup> et 18<sup>e</sup> couches. Le diamètre extérieur du tube est 4 mm, le diamètre intérieur 2 mm. La longueur moyenne d'un tuyau est de 22 m. Les trois couches de tube

sont mises en parallèle au point de vue hydraulique pour diminuer les pertes de charge, alors que fils et tuyaux sont mis en série au point de vue électrique.



*Calcul d'orientation du refroidissement forcé des bobines.*

Nous verrons plus loin que le débit dans les tuyaux de refroidissement est tel que le gradient de température entre l'entrée et la sortie du réfrigérant est de  $17^{\circ}\text{C}$  dans le cas où le courant circulant dans les bobines est de 25 amp. Ce courant correspond à un champ de 500 gauss (puissance évacuée = 1,05 Kw).

*Hypothèses simplificatrices.*

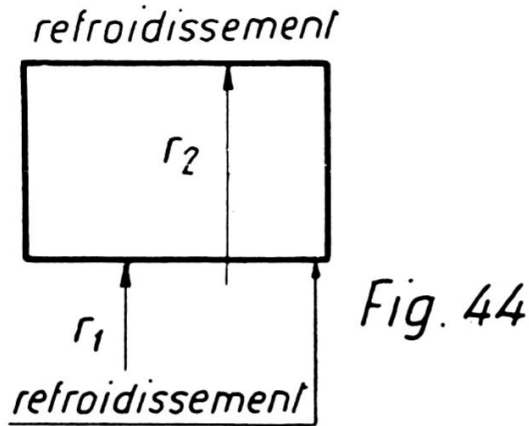
1. En raison, d'une part, du rapport  $1/4$  entre épaisseur radiale et axiale d'une couche de fils comprise entre deux couches de tuyaux et, d'autre part, de la faible quantité de chaleur évacuée par les flasques en regard de celle qui est transmise à l'eau de refroidissement, nous assimilons la bobine à un cylindre de longueur infinie (ce qui revient à négliger les pertes par les flasques). Nous supposons par ce fait que les lignes de chaleur sont radiales.

2. Nous postulons que les génératrices (fig. 44)  $r_1$  et  $r_2$  sont des isothermes dont la température  $\theta_i$  est:

$$\theta_i = \frac{1}{2} (\theta_e + \theta_s) + \Delta\theta_{cu} \quad (\text{V-3})$$

avec

- $\theta_e$  = température d'entrée du réfrigérant,
- $\theta_s$  = température de sortie du réfrigérant,
- $\Delta\theta_{cu}$  = gradient de température entre le cuivre et le réfrigérant.



L'équation de la chaleur avec dégagement de chaleur dans la masse s'écrit en coordonnées cylindriques.

$$\frac{\partial\theta}{\partial t} = \frac{K}{\gamma} \left[ \left\{ \frac{\partial^2\theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial\theta}{\partial r} \right\} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2\theta}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2\theta}{\partial z^2} \right] + \frac{Q}{\gamma} \quad (V-4)$$

En régime stationnaire,  $\frac{\partial\theta}{\partial t} = 0$ , en raison de l'hypothèse 1, (V-4) se réduit à

$$\frac{\partial^2\theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial\theta}{\partial r} = - \frac{Q}{K} \quad (V-5)$$

Q est la chaleur dégagée au sein de la masse par unité de volume et par seconde.

K est la conduction thermique (K = 0,01 pour le bobinage).

La solution de cette équation différentielle est:

$$\theta = B \text{Log} \left( \frac{r}{r_1} \right) + C - \frac{Q}{4K} r^2 \quad (V-6)$$

B et C sont des constantes d'intégration qui doivent être déterminées par les deux conditions aux limites (fig. 44).

- 1) Pour  $r = r_1$ ,  $\theta = 0$ ,
  - 2) Pour  $r = r_2$ ,  $\theta = 0$ .
- (V-7)

$\theta_i$  est pris comme origine des températures, d'où:

$$\theta = \frac{Q}{4K} \left[ (r_1^2 - r_2^2) - \frac{(r_1^2 - r_2^2)}{\text{Log } \frac{r_2}{r_1}} \text{Log } r + (\text{Log } r_1) \frac{(r_1^2 - r_2^2)}{\text{Log } \frac{r_2}{r_1}} \right] \quad (\text{V-8})$$

Cette fonction possède un maximum pour:

$$r_{\max} = \left[ \frac{r_2^2 - r_1^2}{2 \text{Log } \left( \frac{r_2}{r_1} \right)} \right]^{1/2} \quad (\text{V-9})$$

En remplaçant (V-9) dans (V-8) et en posant:

$$\alpha = \frac{r_2}{r_1} \quad \text{et} \quad \beta = \frac{1}{2} \frac{(\alpha^2 - 1)}{\text{Log } \alpha} \quad (\text{V-10})$$

Il vient:

$$\theta_{\max} = \frac{Q_0}{4K} r_1^2 [1 + \beta (2 \text{Log } \beta - 1)] \quad (\text{V-11})$$

Sur la figure 43, nous choisissons le tronçon correspondant à:

$$r_1 = 17,9 \text{ cm}$$

$$r_2 = 20,2 \text{ cm.}$$

Pour une puissance totale dissipée de 1,05 Kw, au moyen des expressions (V-9) et (V-11), on trouve:

$$r_{\max} = 19 \text{ cm}$$

$$\theta_{\max} = 30^\circ \text{ C.}$$

La température limite  $\theta_l$  est donnée par:

$$\theta_l = \theta_{\max} + \theta_i \quad (\text{V-12})$$

Soit:

$$\theta_l = \frac{1}{2} (\theta_e + \theta_s) + \Delta\theta_{\text{cu}} + \theta_{\max} \quad (\text{V-13})$$

Nous ne présenterons pas ici le calcul des autres tronçons qui donnent sensiblement la même valeur pour  $\theta_{\max}$ .

*Etude de la transmission de chaleur au réfrigérant :  
calcul de  $\Delta\theta_{cu}$  [60].*

La différence de température  $\Delta\theta_{cu}$  entre le tuyau de cuivre et le réfrigérant, liée à l'évacuation d'une puissance déterminée, peut être calculée au moyen de la formule de Nusselt [61].

Soit :

$$\frac{\alpha Di}{\lambda_f} = 0,024 R_e^{0,8} P_r^{0,31} . \quad (V-14)$$

L'expression (V-14) permet d'évaluer  $\alpha$  et, par conséquent, de calculer  $\Delta\theta_{cu}$  par :

$$\Delta\theta_{cu} = \frac{Q}{\alpha S} . \quad (V-15)$$

Rappelons quelques définitions fondamentales :

$$N_u = \frac{\alpha Di}{\lambda_f} \text{ (nombre de Nusselt)}$$

$$R_e = \frac{U Di}{\gamma} \text{ (nombre de Reynolds)}$$

$$P_r = \frac{P_e}{R_e} = \frac{\gamma}{A_f} \text{ (nombre de Prandtl)}$$

$$P_e = \frac{U Di}{A_f} \text{ (nombre de Péclet)}$$

$$A_f = \frac{\lambda_f}{\rho C_p} \text{ (coefficient de diffusivité)}$$

$\lambda_f$  est le coefficient de conduction thermique du fluide

$\alpha$  est le coefficient de convection du fluide.

Rappelons que  $Di = 2 \cdot 10^{-1}$  cm et qu'il y a 6 tuyaux de 22 m. de longueur.

De plus,  $U = 1,6$  m/sec, soit 5 cm<sup>3</sup>/sec par tuyau.

Dressons un tableau de comparaison entre l'eau et le pétrole :

<i>Eau</i> (20° C)	<i>Pétrole</i> (20° C)
$\lambda_f = 1,4 \cdot 10^{-3}$	$\lambda_f = 4 \cdot 10^{-4}$

$$\begin{array}{ll}
 A_f = 1,4 \cdot 10^{-3} & A_f = 9,8 \cdot 10^{-4} \\
 \gamma = 10^{-2} & \gamma = 2 \cdot 10^{-2} \\
 R_e = 3,2 \cdot 10^3 & R_e = 1,6 \cdot 10^3 \\
 P_r = 7,1 & P_r = 20,4 \\
 \alpha = 0,197 & \alpha = 0,045
 \end{array}$$

D'où:

$$\Delta\theta_{\text{cu}} = 3^\circ \text{ C par (V-14) et (V-15) (eau).}$$

D'où:

$$\Delta\theta_{\text{cu}} = 13,5^\circ \text{ C par (V-14) et (V-15) (pétrole).}$$

Valeurs déterminées pour  $S = 4,15 \cdot 10^2 \text{ cm}^2$  (surface intérieure des six tuyaux) et  $Q = 250 \text{ cal/sec}$  (1,05 Kw), correspondant à un courant de 25 amp et un champ de 500 gauss.

Il apparaît nettement que le pétrole est un moins bon réfrigérant. Comme  $\Delta\theta_{\text{cu}} = 13,5^\circ \text{ C}$  n'est pas une valeur excessive, nous fixons néanmoins notre choix sur le pétrole, qui présente l'avantage de ne pas entartrer les tuyaux.

#### *Etude des corrections [60].*

1. Correction due à la courbure, elle intervient si  $\delta \neq 1$  avec:

$$\delta = 1 + 1,77 \frac{Di}{R} \quad (\text{V-16})$$

R, rayon de courbure est de 20 cm.  $\delta = 1 + 1,77 \cdot 10^{-2} \approx 1$ .

2. Correction sur la longueur: elle intervient si  $L < L'$  avec

$$\begin{array}{l}
 L = \text{longueur d'un tuyau, et} \\
 L' = 0,015 P_e Di .
 \end{array} \quad (\text{V-17})$$

On vérifie qu'il n'y a pas non plus de correction à introduire dans ce cas.

#### *Calcul de $\theta_s$ .*

Le débit d'écoulement du pétrole est de  $5 \text{ cm}^3/\text{sec}$  par tuyau, soit au total  $30 \text{ cm}^3/\text{sec}$ .

Si:

$$\theta_e = 15^\circ \text{ C} .$$

On en déduit:

$$\theta_s = 31,5^\circ \text{ C (pour 250 cal/sec) .}$$

Il est possible maintenant de calculer  $\theta_1$  par (V-13)

$$\theta_1 = 67^\circ \text{ C .}$$

*Confrontation avec l'expérience.*

Les valeurs mesurées (au moyen de thermocouples) présentent un accord satisfaisant avec les valeurs théoriques.

On mesure entre deux couches de tuyaux une température maximum:

$$\theta_l = 75^\circ \text{ C .}$$

A la sortie des bobines, la température du pétrole est de:

$$\theta_s = 30^\circ \text{ C .}$$

Enfin, le gradient de température entre le pétrole et le tuyau est:

$$\Delta\theta_{cu} \approx 10^\circ \text{ C .}$$

Le refroidissement est suffisant pour permettre des observations en régime permanent à un champ de 500 gauss, dans des conditions exceptionnelles d'homogénéité qui seront exposées au chapitre VI.

*Calcul de la perte de charge dans les tuyaux.*

La perte de charge n'est pas modifiée par la forme géométrique (spirale) qu'affecte le tuyau. En conséquence, la perte de charge  $J_D$  est:

$$J_D = \frac{\lambda}{D} \frac{U^2}{2g} \quad (\text{V-18})$$

avec:

$$\lambda = \frac{0,618}{(Re)^{0,36}} + 0,00785 \text{ (formule de Lebeau [62]) .} \quad (\text{V-19})$$

Dans le cas du pétrole:

$$\lambda = 0,05 \text{ (pour } D = 0,2 \text{ cm, } U = 1,6 \text{ m/sec) .}$$

D'où :

$$J_D = 7 \text{ kg/cm}^2 \text{ (pour une longueur de 22 m) .}$$

Cette valeur est en parfait accord avec la valeur mesurée

#### § 4. DESCRIPTION DE LA CONSTRUCTION.

Les flasques ont été faites en anticorrosdal B de 1 cm d'épaisseur. Les entretoises qui définissent les positions des deux bobines sont en laiton. De grandes précautions ont été prises pour éviter que des copeaux de matière magnétique compromettent l'homogénéité du champ.

##### *Technique de bobinage.*

La bobine de fil et la flasque sont montées toutes deux sur cabestan. Le bobinage est effectué par deux personnes. L'une exerce un effort sur le bras solidaire de la flasque, l'autre tire en sens inverse sur le bras fixé à la bobine. La force exercée sur le fil au cours du bobinage est de l'ordre de 50 kg. Chaque passage d'une couche à la suivante est effectué selon une position angulaire différente, de sorte que les vingt-deux décrochements correspondants aux vingt-deux couches se divisent également sur les  $360^\circ$  de la circonférence. Cette méthode a permis d'obtenir une très grande constance dans l'épaisseur du bobinage. Les mesures effectuées ont révélé que la variation d'épaisseur ne dépasse pas  $8/10$  mm au maximum sur les 84 mm d'épaisseur du bobinage, soit moins de 1%. Cette extrême constance dans le rapport de  $\frac{b}{h}$  le long de la circonférence est une des conditions importantes à remplir pour assurer l'homogénéité (voir (V-2)).

##### *Tuyaux de refroidissement.*

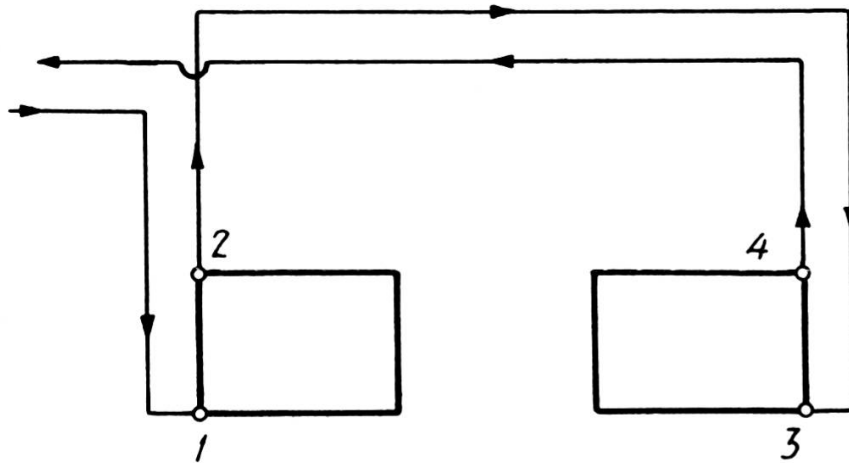
L'utilisation de tuyaux de refroidissement a été une des principales causes de difficultés. Les tuyaux en longueur de 5 m sont brasés bout à bout. Différents types de brasures ont été essayés. Une seule méthode s'est révélée efficace: un dégagement en biseau brasé au n° 1802 (Castolin) non magnétique.

Les tuyaux une fois brasés sont essayés à une traction supérieure à la tension de bobinage. Ils sont ensuite sollicités à une pression d'eau de l'ordre de 12 atmosphères. Le débit à la sortie est contrôlé. Il s'est révélé souvent insuffisant en raison de la coulée d'une brasure à l'intérieur du tuyau. Ces opérations effectuées, il reste à les vernir. Il est déconseillé d'employer des vernis séchant à l'air, leur résistance mécanique est insuffisante. C'est ainsi que nous avons été amenés à suspendre par leurs extrémités les six tuyaux de 22 m. Ils ont été enduits ensuite d'une laque 198 V, puis portés à 140° C pendant 2 h au moyen d'un courant de 150 amp, de façon à assurer la polymérisation. La température était contrôlée au moyen d'un archet pyrométrique. Ces opérations très longues ont été répétées trois fois. Chaque couche a une épaisseur radiale de l'ordre de 1,5/100 mm. L'épaisseur des trois couches étant insuffisante, nous avons appliqué une dernière couche de protection au moyen du vernis 325 N séchant à l'air. Le passage, assez délicat, d'une couche de fil à une couche de tuyau, a été également réalisé au moyen de brasures au 1802. Sitôt la couche de tuyau bobinée, elle est essayée une nouvelle fois à la pression, le débit est contrôlé. Les opérations de débobinage et de rebobinage du tuyau sont répétées jusqu'à ce que les performances exigées soient remplies.

Les bobines terminées ont été soumises à un traitement d'imprégnation, suivi d'une cuisson, de façon à les rendre plus résistantes aux chocs. Elles forment un bloc à tel point aggloméré par la laque qu'il est possible de les utiliser sans leurs flasques de fixation.

#### *Alimentation par potence.*

Le bobinage de chaque bobine est attaqué par l'extérieur (avec le même sens de rotation) en 1 et 3 (fig. 45), de façon à diminuer considérablement la composante du champ magnétique perpendiculaire à l'axe des bobines qui provient du pas du bobinage. Le nombre de couches est paire, de façon à ce que l'entrée et la sortie du bobinage se trouvent du même côté d'une bobine, afin de rendre plus efficaces les compensations de courant réalisées par la potence (fig. 45).



*Fig.45* Potence

L'opposition des courants en chaque point de la potence est telle que les fils d'alimentation n'apportent pas de contribution appréciable au champ produit par les bobines et surtout n'introduisent pas d'inhomogénéité de champ magnétique. Pour

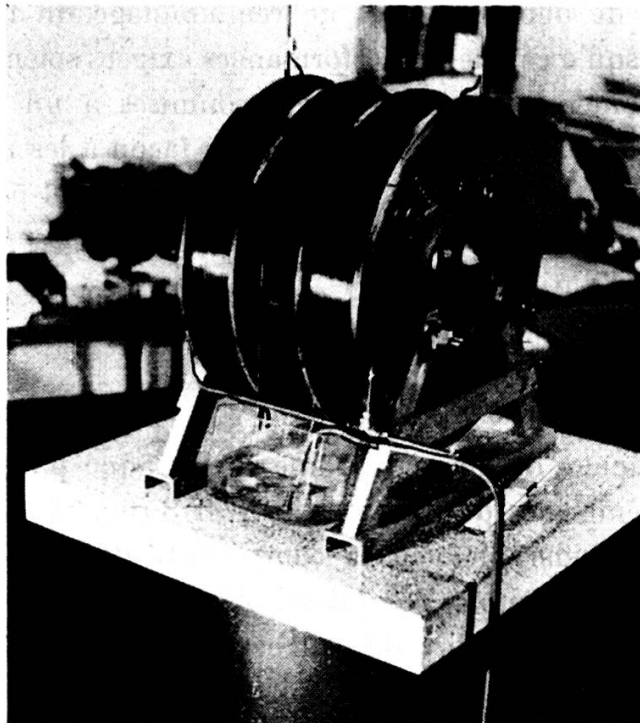


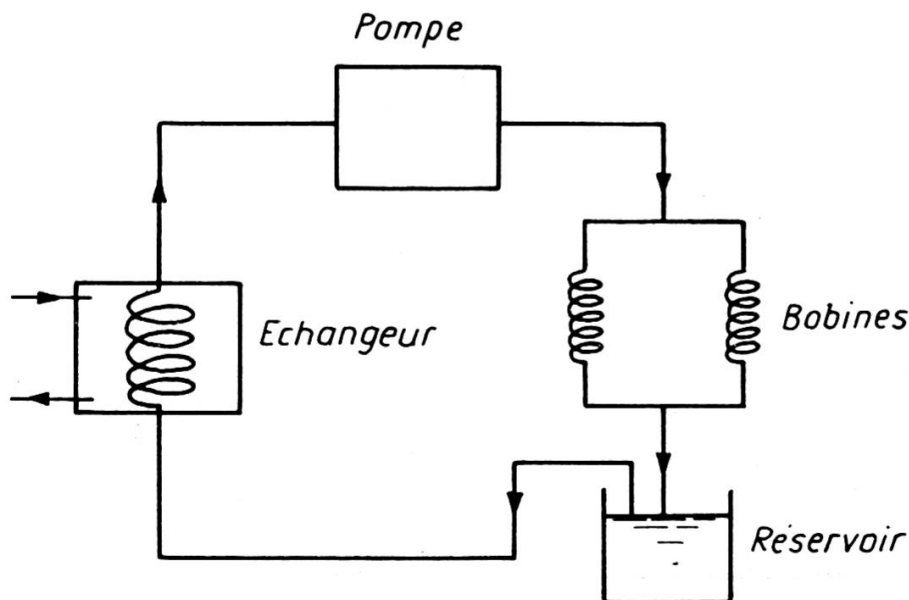
Fig. 46

que la compensation soit plus complète, les deux fils d'amenée sont coaxiaux. L'efficacité a été vérifiée en déplaçant la potence lors d'une observation sur une raie très étroite. Aucun effet ne s'est fait sentir.

Pour faciliter le transport, la potence peut être démontée très simplement. Il suffit de dévisser les manchons de serrage aux points 1-2-3-4 (fig. 45).

#### *Circuit de refroidissement.*

La photo 46 montre la distribution du pétrole sous pression. Elle s'effectue au moyen de deux tubes alimentant respectivement chacune des bobines par les flasques extérieures. Chacun de ces tubes se divise en trois conduites isolées électriquement de la masse par des raccords en plastique. Le pétrole est évacué par un même système de tubulures monté à l'intérieur des flasques. La pompe indiquée sur la figure 47 peut donner une pression maximum de 10 kg/cm<sup>2</sup>. Le réglage de la pression s'effectue au moyen d'une vanne montée en court-circuit entre l'entrée et la sortie.

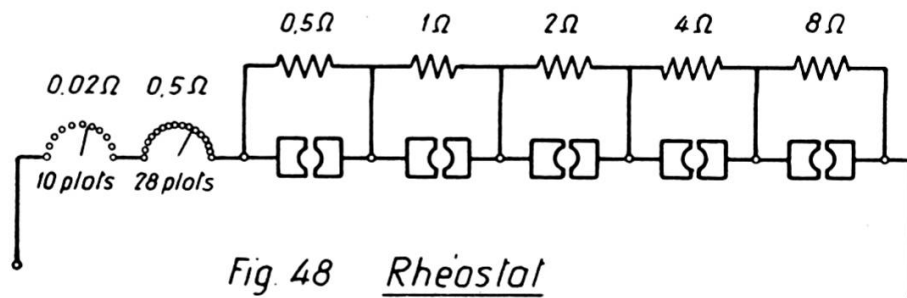


*Fig. 47* Circuit de refroidissement

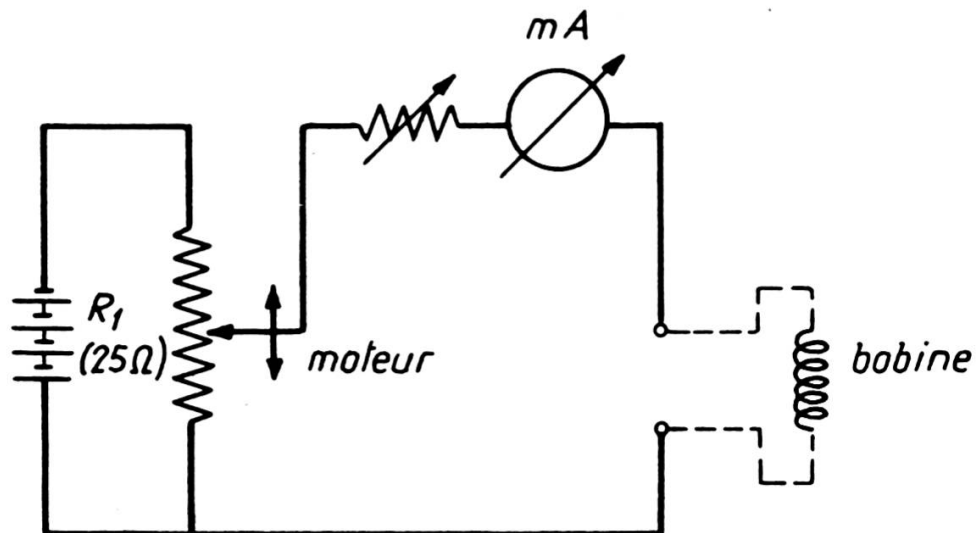
*Réglage du courant dans les bobines de Helmholtz.*

Le réglage du courant s'effectue au moyen d'un jeu de résistances représenté sur la figure 48.

Nous avons pu contrôler (voir p. 374) que la stabilité de ce groupe de résistances variables est supérieure à  $2 \cdot 10^{-6}$  pour un courant de 6 amp.

*Balayeur linéaire de champ (fig. 49).*

Le balayeur permet de décrire une raie à vitesse constante de variation du champ magnétique. Dans ce but, une batterie de 10 v alimente un potentiomètre Hélipot de  $25 \Omega$  (commandé



par un moteur synchrone à double sens de marche). Le moteur monté avec son réducteur tourne à 5 t/min. La course totale (10 tours de potentiomètre) s'effectue en deux minutes. Le potentiomètre est monté en diviseur de tension; il alimente la bobine de balayage au travers d'une résistance réglable. La plus faible des résistances en série permet d'obtenir une variation de courant dans le temps, dont la linéarité est supérieure à 1%. En dehors de cette extrême linéarité de la variation de champ, ce montage présente l'avantage de ne pas introduire de « crachements » dans la tête de mesure. La vitesse de balayage est réglée en fonction des temps de relaxation étudiés. Vitesse maximum de balayage 7 mgauss/sec.