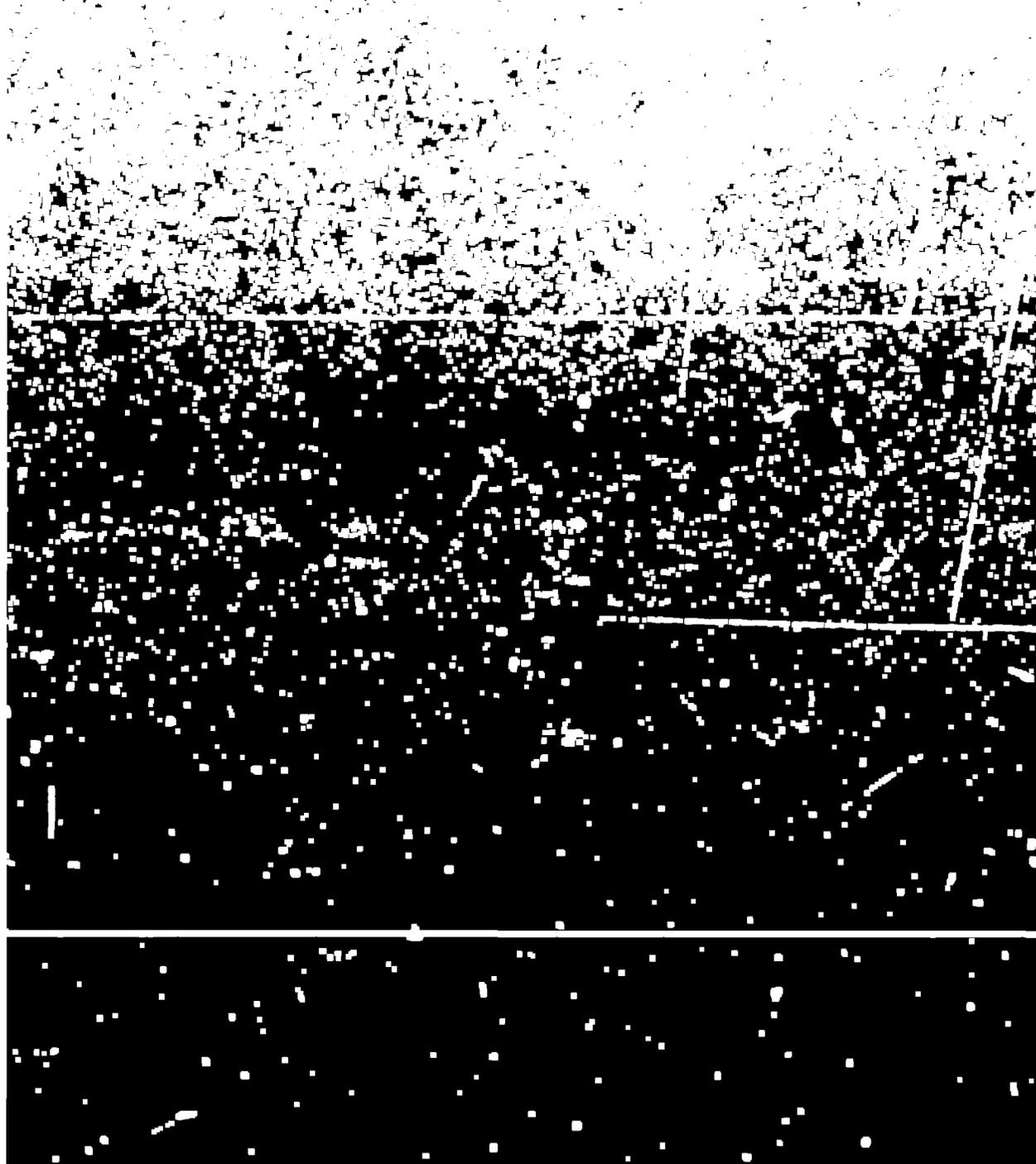


PRÉSENCE DU COMITÉ

COMMISSARIAT A L'ÉNERGIE ATOMIQUE

DEBITMETRES A INDUCTION POUR MESURE DES DEBITS D'EAU

J. AILLON et P. CHANDAMON



- Rapport C.E.A. n°255 -

Service de la Pile de Châtillon

DEBITMETRE A INDUCTION POUR MESURE DES DEBITS D'EAU

par

AILLOUD J. et CHANDANSON P.

- Novembre 1954 -

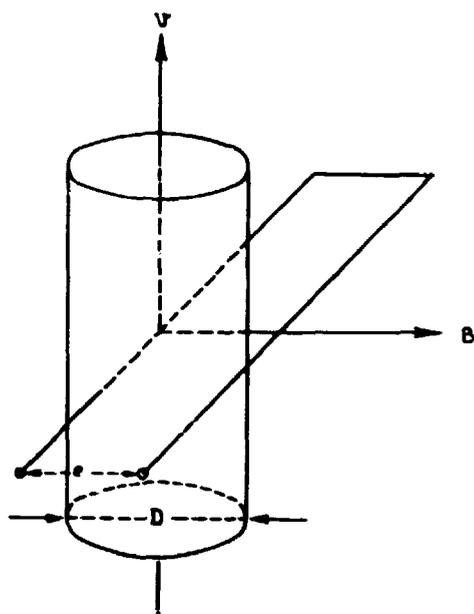
INTRODUCTION.-

Le principe du débitmètre à induction électro magnétique est bien connu : il consiste à utiliser la force électro motrice induite dans un conducteur qui se déplace par rapport à un champ magnétique.

Le sujet a déjà été traité tant du point de vue théorique que pratique et une bibliographie des principaux articles publiés sur la question est annexée à la fin de l'article.

Celui-ci concerne plus spécialement un débitmètre réalisé au Service de la Pile de Châtillon. Cet appareil fait partie de l'installation de refroidissement de l'eau lourde, son intervalle de mesure s'étend jusqu'aux $10 \text{ m}^3/\text{h}$ qui peuvent circuler dans l'échangeur, la précision des mesures effectuées est de l'ordre de 1 pour cent du maximum de l'échelle.

PRINCIPE ET CONSIDERATIONS GENERALES.-



- Fig. 1 -

Le conducteur en mouvement étant constitué par le liquide dont on veut mesurer le débit dans une canalisation de diamètre D , appelons B l'induction magnétique dans une direction perpendiculaire à l'axe du tuyau (le champ magnétique est supposé constant dans toute la région considérée). La différence de potentiel existant entre deux points diamétralement opposés sur la paroi de la canalisation et dans une direction perpendiculaire à celle de l'induction magnétique est donnée par :

$$|e| = 10^{-8} \frac{d\phi}{dt} = 10^{-8} BD v \quad (1)$$

e exprimé en V, B en gauss, D en cm, v étant la vitesse moyenne du liquide dans la canalisation à l'endroit considéré, exprimée en cm/s.

Pour une analyse plus détaillée des phénomènes, on se reportera aux travaux de B. THURLEMAN [2] et de A. KOLIN [12].

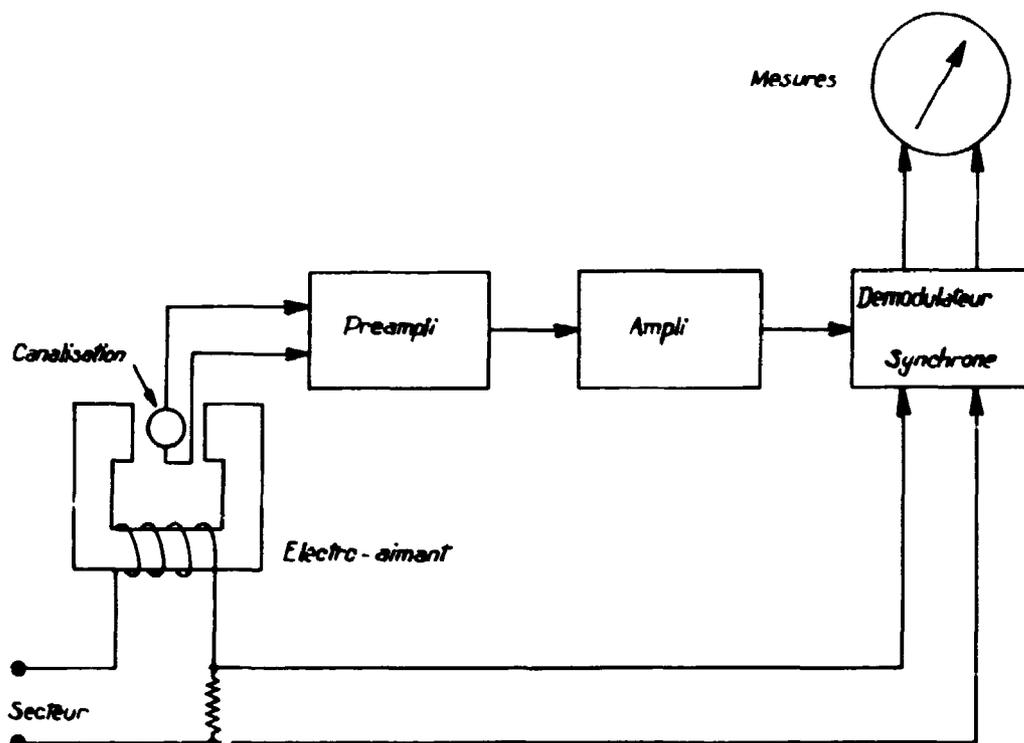
Soit F le débit à mesurer :

$$F = 2,827 \cdot 10^{-3} D^2 v \quad (2)$$

F étant exprimé en m³/h, D en cm, v en cm/s, d'où l'on tire :

$$e = 3,53 \cdot 10^{-6} \frac{B F}{D}$$

e étant exprimé en V, B en gauss, D en cm et F en m³/h. Il apparaît ainsi que le rapport $\frac{e}{F}$, caractérisant la sensibilité de la mesure, est directement proportionnel au rapport B/D caractéristique de l'électro-aimant chargé de produire l'induction B (fig.2)



- Fig. 2 -

Ceci est une circonstance favorable puisque, à force magnéto motrice donnée, toute diminution de l'entrefer D s'accom-

pagne d'un accroissement correspondant de l'induction B, ainsi qu'il ressort du calcul approché de l'électro-aimant. Celui-ci conduit facilement à la formule :

$$\frac{e}{F} = 4,44 \cdot 10^{-6} \frac{NI}{D^2}$$

dans laquelle e est la différence de potentiel exprimée en V, F le débit en m³/h, NI le nombre d'ampères-tours et D le diamètre de la canalisation en cm. La réduction du diamètre D en vue de l'accroissement de la sensibilité $\frac{e}{F}$ apparaît comme très avantageuse.

En pratique, une installation de tuyauterie est déjà très souvent effectuée avec le diamètre minimum qu'imposent les considérations de pertes de charge, mais il est possible, à l'endroit où s'effectue la mesure du débit, de donner à la canalisation un profil en "Venturi" qui permet un rétrécissement local tout en apportant une perte de charge supplémentaire minimum.

La réduction de l'entrefer D présente encore l'avantage de réduire les fuites magnétiques que nous avons négligées jusqu'ici et qui sont susceptibles, comme nous le verrons plus loin, d'entraîner des inductions nuisibles sur d'autres parties de l'appareillage.

DISPOSITIF DE MESURE.-

La tension e est recueillie entre deux électrodes diamétralement opposées et fixées dans la paroi du tuyau perpendiculairement à la direction du champ magnétique. Cette paroi doit avoir dans cette région une conductivité faible vis-à-vis de celle du liquide.

Généralement, la tension e n'est pas mesurable directement au moyen d'un appareil à cadre et il est nécessaire de l'amplifier.

(A titre d'exemple, avec l'ensemble qui a été réalisé :

(NI) = 4 000 A/tours, D = 4 cm et $e \approx 1$ mV pour un débit $F = 1\text{m}^3/\text{h}$).

Par ailleurs, toutes les fois que le phénomène de polarisation des électrodes est à craindre, il est nécessaire d'alimenter l'électro-aimant en courant alternatif, la tension e est alors alternative et de même fréquence. Ceci permet en outre de bénéficier des avantages que donne l'amplification de signaux en alternatif par rapport à l'emploi de l'amplificateur courant continu.

En contrepartie, il faut alors tenir compte de tensions parasites qui sont induites sur les électrodes de mesure et qui n'ont aucun rapport avec les débits du liquide dans la canalisation. Pour l'exposé détaillé concernant l'origine même de ces tensions parasites et des moyens de minimiser leur action, on se reportera par exemple au travail de W.G. JAMES [3].

Plus brièvement, les tensions parasites les plus gênantes, car leurs amplitudes peuvent atteindre et même dépasser celle du signal utile, ont pour origine les couplages inductifs qui existent entre les bobines de l'électro-aimant d'une part, et les électrodes de mesure avec leurs connections à l'amplificateur d'autre part.

Ainsi, alors que la tension de signal utile est en phase avec le courant qui parcourt les bobines de l'électro-aimant, ces tensions perturbatrices sont en quadrature. Ceci permet fort heureusement de les éliminer en employant à la sortie de l'amplificateur un système démodulateur synchrone actionné par le courant qui traverse les bobines de l'électro-aimant. Il faut supposer naturellement que l'amplificateur n'introduit pas de déphasage par lui-même à la fréquence de travail et que les différents signaux appliqués à l'entrée ne peuvent le saturer.

Il existe aussi des couplages capacitifs entre bobinages et

connections d'entrée, mais ils ont une importance bien moindre que ceux inductifs et peuvent être beaucoup plus réduits par un montage convenable. Ceci est d'ailleurs assez impératif, car les tensions parasites qu'ils apportent peuvent avoir une composante en phase (ou en opposition) avec le signal utile et il est essentiel que ces parasites soient très inférieurs au plus petit signal à mesurer.

Il apparaît également qu'il est avantageux d'opérer à fréquence aussi basse que possible ; celle du secteur représente souvent un bon compromis, les phénomènes de polarisation des électrodes cessant d'être gênants à cette fréquence et l'alimentation directe de l'électro-aimant à 50 périodes/s entraîne une simplification appréciable de l'appareillage, la puissance nécessaire étant parfois assez importante.

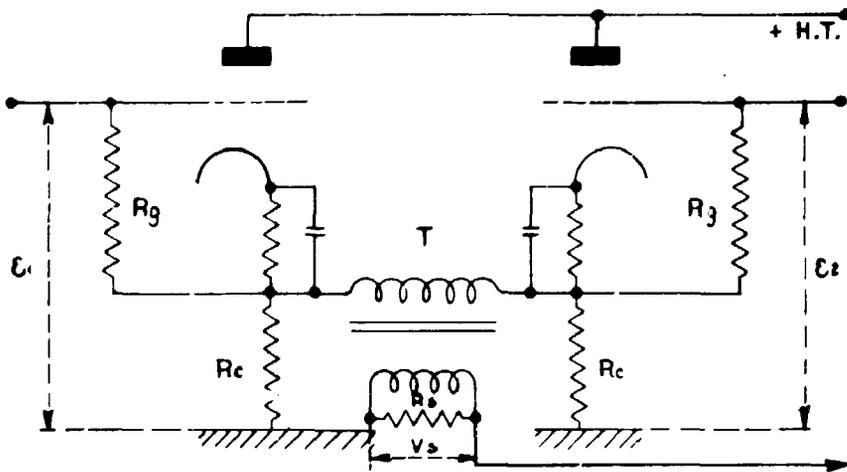
En ce qui concerne plus particulièrement l'amplificateur, il faut généralement distinguer deux parties : un préamplificateur situé à proximité du tube de mesure, les étages suivants, ainsi que l'appareil de sortie, à la disposition de l'opérateur.

PREAMPLIFICATEUR.-

Le préamplificateur a plusieurs rôles :

- 1) raccourcir au maximum la liaison entre les électrodes de mesure et l'entrée du système amplificateur ;
- 2) établir une première discrimination entre le signal utile qui se présente symétriquement entre les deux électrodes de mesure et les parasites qui, par couplage, attaquent ces deux électrodes en parallèle ;
- 3) assurer la transformation d'un signal appliqué entre deux électrodes d'entrée , généralement symétriquement par rapport à la masse et éventuellement sous forte impédance, en une tension de sortie

dissymétrique et sous faible impédance pour permettre une liaison commode avec les étages suivants.



Le gain de l'ensemble devant être stable, tout le système est donc fortement contre-réactionné.

Le schéma utilisé est classique (fig.3).

- Fig. 3 -

\mathcal{E}_1 et \mathcal{E}_2 sont les tensions d'entrée en provenance des électrodes de la canalisation, V_s la sortie en direction de l'amplificateur.

Dans le cas du signal utile $\mathcal{E}_1 = -\mathcal{E}_2$; dans le cas des parasites $\mathcal{E}_1 = \mathcal{E}_2 + \Delta \mathcal{E}$, $\Delta \mathcal{E}$ traduit les dissymétries possibles dans les couplages perturbateurs, et généralement par un réglage effectué sur place, on s'attache à rendre $\Delta \mathcal{E}$ aussi faible que possible. Ceci est effectué en agissant par exemple sur les connections entre électrodes de mesure et bornes d'entrée du préamplificateur. On trouve facilement que :

$$V_s \neq n (\mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_2)$$

où n est le rapport du transformateur T supposé sans fuites.

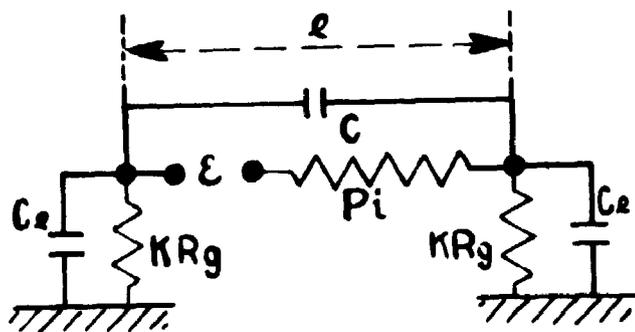
Du fait de la symétrie du montage, le signal utile est nettement avantagé par rapport aux parasites ; cependant, on ne peut compter uniquement sur le réglage mentionné plus haut pour une élimination complète et durable des tensions perturbatrices, de petits déplacements de bobines de l'électro-aimant sous l'influence des vibrations des tôles ou encore de la canalisation elle-même sous des actions difficilement contrôlables (dilatations dues aux variations

de température , actions mécaniques des pompes, etc...) rendent illusoire une annulation totale de ces tensions de bruit d'origine inductive. En fait, l'expérience montre que, sur l'appareillage réalisé, il faut compter avec une tension perturbatrice du même ordre que le plus petit signal à mesurer, soit environ 100 μV .

L'élimination totale des parasites est assurée par le détecteur synchrone examiné plus loin.

Il reste un point important qui est l'impédance d'entrée présentée par le préamplificateur au système de mesure. Ceci, en particulier, lorsqu'il s'agit de liquides ayant une résistivité assez élevée.

La figure 4 représente le schéma équivalent du montage où $\mathcal{E} = |\mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_2|$ est la force électro-motrice d'induction, ρ_i la résistance présentée par le liquide entre les deux électrodes de mesure,



- Fig. 4 -

C , une capacité entre électrodes due surtout aux connections avec les deux bornes d'entrée du préamplificateur, C_e la capacité d'entrée des électrodes et des connections, par rapport à la masse dans le cas qui nous occupe, plus la capacité grille-plaque de chaque tube du préamplificateur, KR_g la résistance

d'entrée de chacun d'eux où, suivant un résultat bien connu, $K > 1$ est le facteur introduit par le montage cathode follower.

En réalisant la condition $\rho_i \ll 2 KR_g$ (4)
on trouve que :

$$\left| \frac{e}{\mathcal{E}} \right|_{\max} \approx \frac{1}{\sqrt{1 + \left[\frac{\rho_i}{2} \left(C_e + \frac{C}{2} \right) \omega \right]^2}}$$

$$\operatorname{tg} \varphi_{\min} \neq - \frac{\rho_i}{2} \left(C_e + \frac{C}{2} \right) \omega$$

En pratique, à moins d'avoir affaire à des liquides considérés spécialement du point de vue de leur qualité isolante, la résistance ρ_i ne dépasse pas 1 M Ω dans la généralité des cas, et il est aisé de satisfaire la condition (4). On peut obtenir sans précautions spéciales par ailleurs

$$C_e + \frac{C}{2} \approx 10 \text{ pF}$$

et, en opérant à la fréquence du secteur

$$\frac{e}{\xi} \max \neq 1 \quad \operatorname{tg} \varphi_{\min} \neq - 1,5 \cdot 10^{-3} \quad \varphi_{\min} < \frac{1^\circ}{10}$$

Dans ces conditions, on peut dire que la f.e.m. d'induction se trouve appliquée entre les bornes d'entrée du préamplificateur et d'éventuelles variations de la résistance ρ_i dans de larges limites sont pratiquement sans effet sur les mesures, du moins tant que le domaine de celles-ci est nettement au-dessus des fluctuations thermiques dans la résistance d'entrée. A ce propos, on pourra consulter l'article de W.G. JAMES.

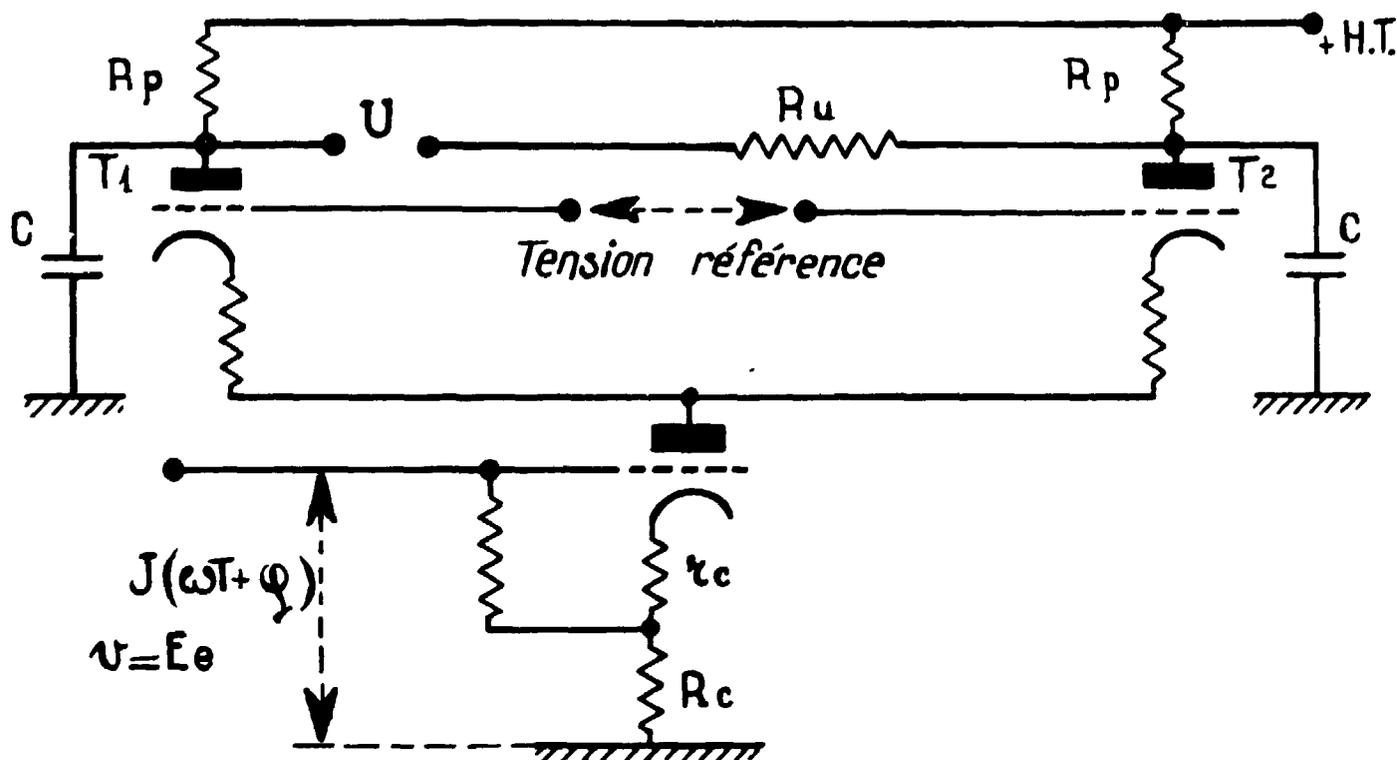
AMPLIFICATEUR.-

Le gain de l'ensemble doit être suffisant pour que le démodulateur synchrone fonctionne linéairement (signaux supérieurs au 1/10 V environ). La stabilité du gain dont dépend directement la précision des mesures de débit est assurée par le moyen habituel de la contre-réaction. La largeur de bande est de peu d'importance, puisque le démodulateur synchrone joue le rôle d'organe sélectif, la seule précaution étant que l'amplificateur travaille toujours

loin de la saturation pour tous les signaux, utiles ou parasites.

DEMULATEUR SYNCHRONE.-

Le schéma est représenté figure 5.



- Fig. 5 -

Pour l'analyse du fonctionnement d'un montage similaire, qui, entre autres qualités, présente une faible dérive du zéro de la tension continue de sortie U, se reporter à l'article de N.A. SCHUSTER [19].

Dans le cas présent, où la stabilité du gain est très importante, le tube d'entrée du démodulateur est une triode à coefficient d'amplification μ élevé et fortement contre-réactionnée dans sa cathode. On assure ainsi l'indépendance du courant plaque i_p vis-à-vis des caractéristiques du tube :

$$i_p \neq \frac{v}{r_c + R_c}$$

et la constance du gain $g = \frac{U}{E} f(\varphi)$ lorsque, par ailleurs, la tension de référence est suffisamment forte (5 à 6 V au minimum) pour que les tubes T_1 et T_2 fonctionnent par tout ou rien à chaque demi-période de celle-ci.

On trouve facilement que :

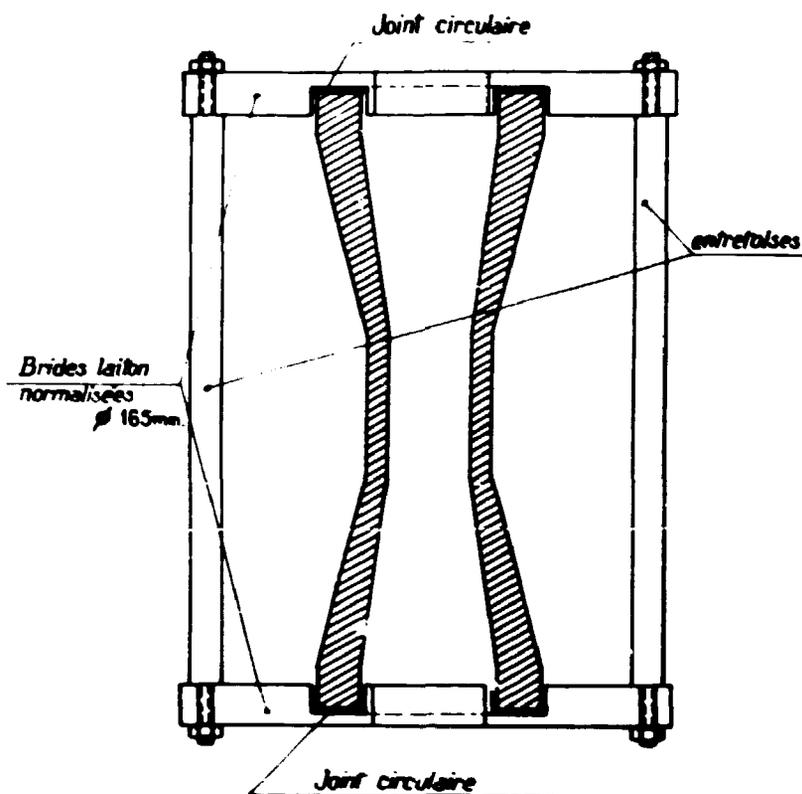
$$g = \frac{U}{E} f(\varphi) = \frac{2}{\pi} \frac{R_p}{r_c + R_c} \cdot \frac{R_u}{R_u + 2R_p} \cos \varphi$$

(en supposant $\frac{1}{c\omega} \ll R_p$).

Ceci fait apparaître immédiatement l'élimination radicale effectuée ici, des parasites d'origine inductive apparus au niveau du préamplificateur et pour lesquels $\varphi = \frac{\pi}{2}$.

La protection qu'offre également un tel système vis-à-vis des perturbations sans relation de phase et de fréquence avec la tension de référence est également bien connue et découle immédiatement du fait que la valeur moyenne de $\cos \varphi$ est nulle dans ces conditions.

DESCRIPTION DE L'APPAREILLAGE.-



- Fig. 6 -

a) Tube de mesure: l'ensemble est représenté figure 6.

La partie isolante est en plexiglass qui a été choisi tant pour ses qualités mécaniques que pour la facilité avec laquelle on peut l'usiner.

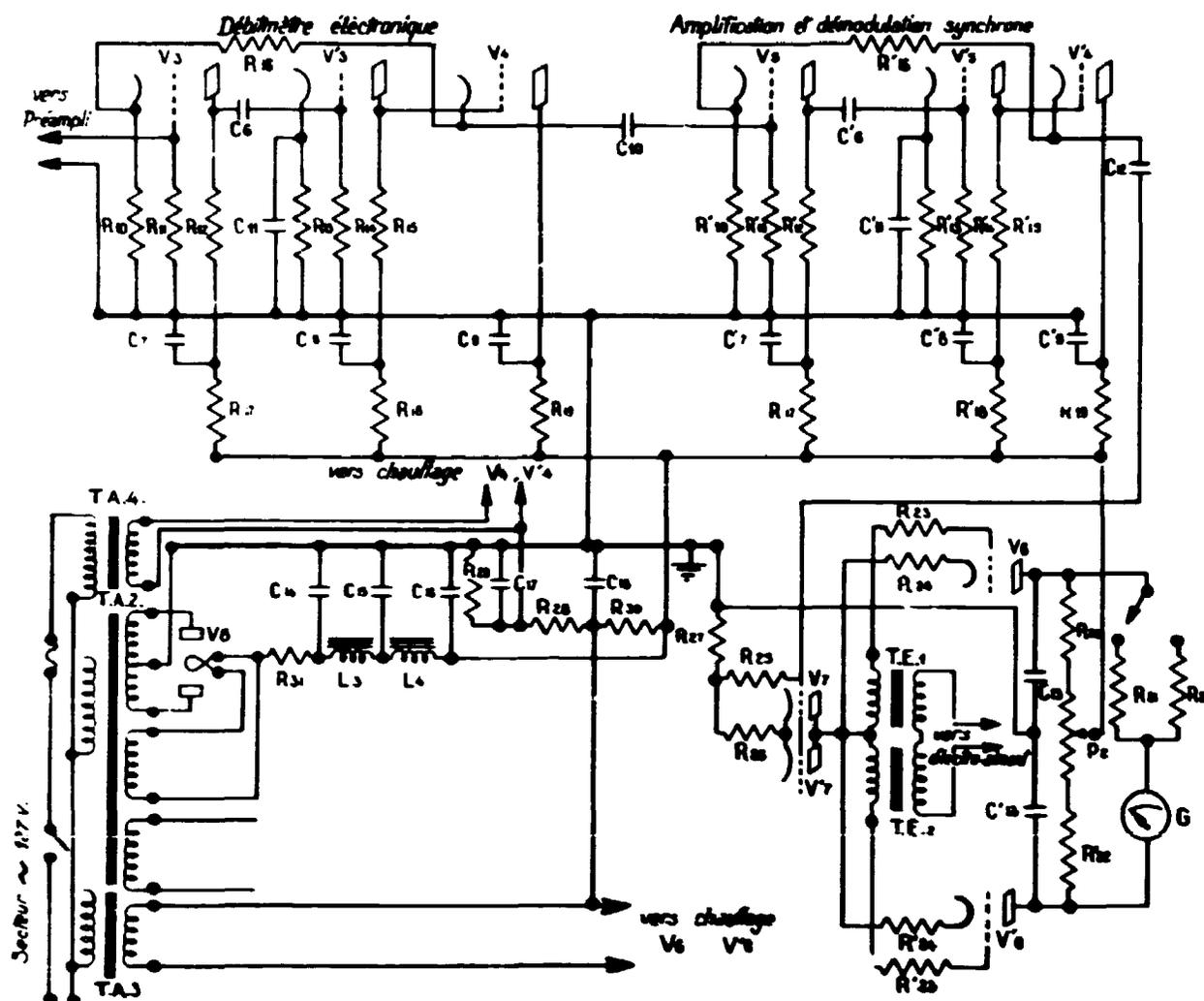
Les deux électrodes de mesure sont en acier inoxydable sensiblement non magnétiques et vissées dans la paroi en plexiglass ; l'étanchéité a été assurée

Cet étage comporte son alimentation séparée et stabilisée par le même appareil à fer saturé que pour l'électro-aimant.

Le gain à la fréquence de travail est de 1,5 environ. Une variation de tension de 10 pour cent imposée au primaire du transformateur d'alimentation entraînerait une variation de 2,5 pour cent du gain.

d) Amplificateur (fig.8).

Du fait du fort taux de contre-réaction, il n'a pas été nécessaire de stabiliser l'alimentation de l'amplificateur. Une variation de 10 pour cent imposée au secteur entraîne une variation de gain de 0,7 pour cent à la fréquence de travail. La valeur du gain en tension est 1500. La tension de sortie correspondant au début de la saturation est de 50 V.



- Fig. 8 -

e) Démodulateur synchrone (fig.8)

Le gain défini par le rapport $g = \frac{V}{E}$ est de 2 environ, une variation de 10 pour cent du secteur d'alimentation donne une variation de gain inférieure à 0,2 pour cent et une variation de zéro sur l'appareil de sortie inférieure à 0,5 pour cent du maximum de l'échelle.

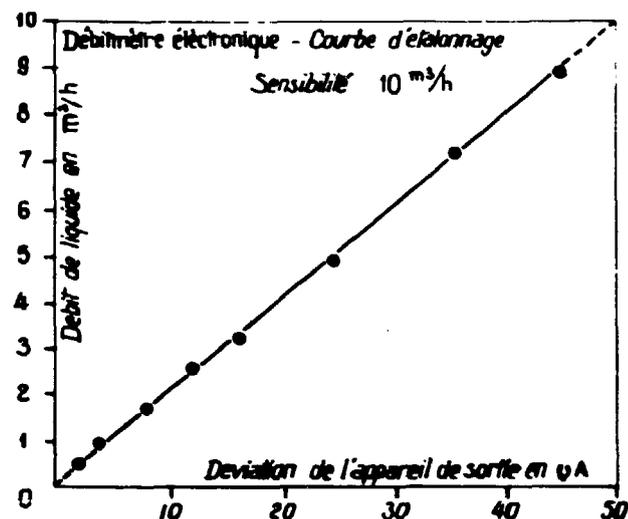
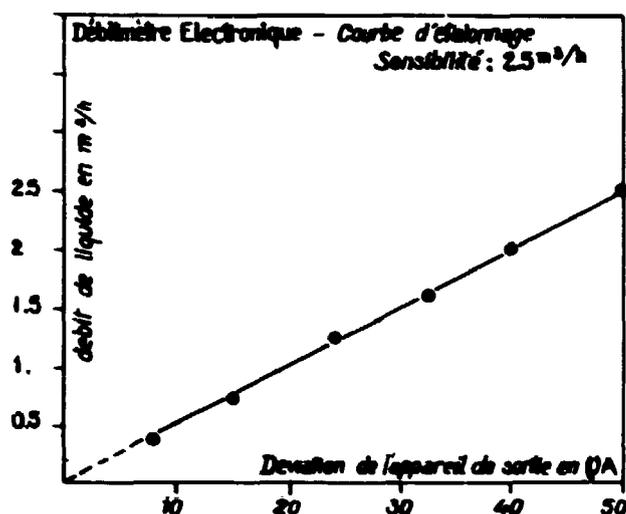
f) Dispositifs annexes.

Il a été prévu une commande par bouton poussoir permettant à tout moment de vérifier le zéro de l'appareil de mesure en court-circuitant l'entrée de l'amplificateur.

Un commutateur de sensibilités permet d'obtenir le maximum de déviation de l'indicateur de sortie soit pour $2,5 \text{ m}^3/\text{h}$, soit pour $10 \text{ m}^3/\text{h}$.

g) Performances.

Les figures 9 et 10 mettent en évidence l'excellente linéarité de la courbe de réponse, les débits en m^3/h sont portés en fonction des divisions de l'appareil de mesure (maximum 50 divisions). Suivant les sensibilités, une division correspond donc à des débits de 50 ou de 200 l/h.



- Fig. 9 et 10 -

L'étalonnage a été fait par comparaison avec les indications d'un compteur volumétrique pour les débits supérieurs à $1,5 \text{ m}^3/\text{h}$ en-

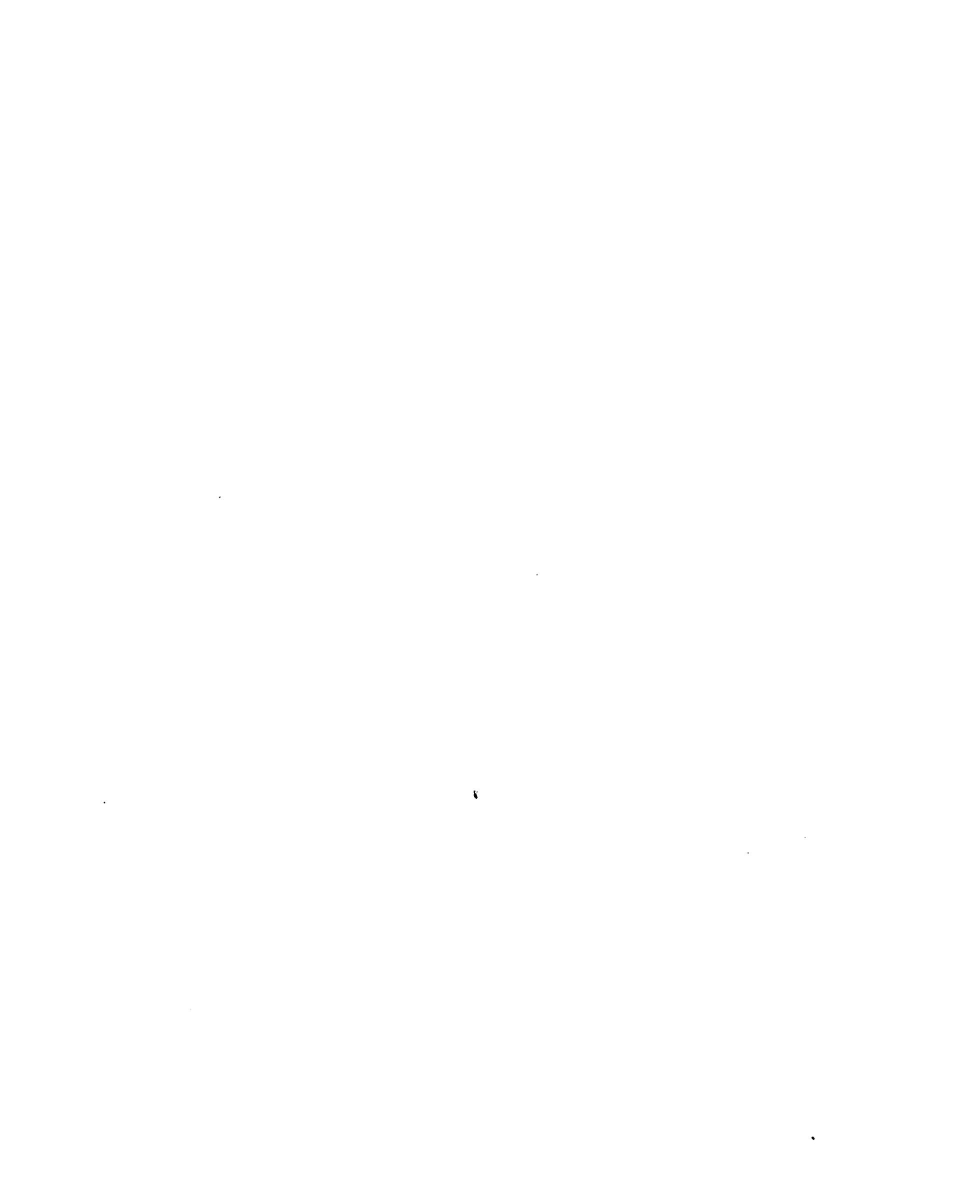
viron, par la méthode de la cuve pour des débits compris entre 0,2 et 2,5 m³/h. Le recouvrement des mesures ainsi effectuées a permis de vérifier, par la même occasion, l'étalonnage du compteur dans cette zone d'utilisation.

REMERCIEMENTS.-

Nous tenons à exprimer toute notre reconnaissance à M. ERTAUD, Chef du Service de la Pile de Châtillon, pour les encouragements et les conseils qu'il nous a donnés au cours de ce travail. Nous remercions le personnel du Groupe électronique qui a apporté ses soins à la réalisation et aux mesures.

- BIBLIOGRAPHIE -

- [1] - A. KOLIN Rev. Sci. Instr. 1945, 16, 5, 109-116
 - [2] - B. THURLMANN, Helv. Phys. Acta 1941, 14, 383-419
 - [3] - W.G. JAMES Rev. Sci.Instr. 1951, 22, 12, 989-1002
 - [4] - M.P. FABRE Compt. Rend. 1932, 194, 1097
 - [5] - A. KOLIN Proc. Soc. Exp. Biol. Med. 1941, 46, 233
 - [6] - A. KOLIN U.S. Patent 1939, 2149, 847
 - [7] - A. KOLIN Proc. Soc. Exp. Biol. Med. 1941, 46, 235-39
 - [8] - A. KOLIN, D.N. KATZ Ann. Physiol. Physioch. Biol.
1937, 13, 1022
 - [9] - A. KOLIN, D.N. KATZ Amer. J. Physiol. 1938, 122, 788
 - [10] - A. KOLIN et al. Proc.Soc.Exp.Biol.Med. 1941, 47, 324
 - [11] - A. KOLIN J. appl. Phys. 1944, 15, 150-164
 - [12] - A. KOLIN Rev. Sci. Instr. 1945, 16, 107-117
 - [13] - WETTERER E. Z. Biol. 1937, 98, 26
 - [14] - E.D. EINHORN Trans. r. Soc. Afr. 1940, 28, 143-160
 - [15] - J. CLARK, J.E. RANDALL Rev.Sci.Instr. 1949, 20, 951-954
 - [16] - C.K. RAYNSFORD Report On Induction Flowmeter
(1949, N.-Y.)
 - [17] - J.S. ARNOLD Rev. Sci. Instr. 1951, 22, 43-47
 - [18] - A.J. MORRIS, J.H. CHADWICK Am. Inst. Elec. Engre
T-1-58, 1951
 - [19] - SCHUSTER N.A. Rev. Sci. Instr. 1951, 22, 4, 254-255
-



FIN