

ENREGISTREMENT, EN FONCTION DU TEMPS, DES DÉPLACEMENTS D'UNE COLONNE  
DE MERCURE PLACÉE A L'INTÉRIEUR D'UNE ENCEINTE HAUTES PRESSIONS.  
APPLICATION A LA MESURE DU COEFFICIENT DE VISCOSITÉ  
DES GAZ SOUS HAUTES PRESSIONS

Par A. DEDIT, B. GALPERIN, J. VERMESSE et B. VODAR,  
Laboratoire des Hautes Pressions, C. N. R. S., Bellevue, Seine-et-Oise.

**Résumé.** — Nous donnons, ici, la description d'un appareillage capable d'enregistrer les déplacements, en fonction du temps, d'une colonne de mercure placée à l'intérieur d'une enceinte hautes pressions. Nous indiquons, ensuite, comment à partir de ce dispositif, on peut déterminer le coefficient de viscosité des gaz denses.

**Abstract.** — A description is given of an apparatus used to record [the displacements, as a function of time, of a column of mercury in a high pressure vessel. It is shown how this can be used for the determination of the coefficient of viscosity of dense gases.

Nous nous proposons d'exposer la conception et la réalisation d'un appareil de mesure capable d'enregistrer, d'une façon continue, les déplacements, en fonction du temps, d'une colonne de mercure placée sous hautes pressions. Ce dispositif, adapté au viscosimètre hautes pressions, à tube capillaire et à débit variable, que nous utilisons au laboratoire [1], a permis de déterminer le coefficient de viscosité  $\eta$  des gaz denses, tout en contrôlant le régime laminaire de l'écoulement.

**1. Principe de fonctionnement du viscosimètre utilisé.** — Schématiquement on peut ramener le principe de fonctionnement du viscosimètre à celui d'un siphon de mercure, qui serait contenu dans une enceinte hautes pressions (*fig. 1*). Ce siphon est composé de deux vases A et B communiquant entre eux par le bas. Le vase A est obstrué par un

tube capillaire  $t_c$ , le vase B s'ouvrant dans l'enceinte hautes pressions. A l'instant initial de la mesure le niveau en A est plus élevé qu'en B. Pendant la mesure les niveaux en A et en B tendent à s'aligner suivant un niveau moyen NM, en un temps  $t$ , régi par la loi de Poiseuille, qui s'écrit dans notre cas :

$$\eta = K \cdot (\rho - \alpha) (t_2 - t_1) / (\log_{10} h_2 - \log_{10} h_1)$$

$\eta$  étant le coefficient de viscosité du gaz étudié,  $K$  un paramètre géométrique,  $\rho$  et  $\alpha$  les masses spécifiques du mercure et du gaz,  $h_i$  la distance séparant en B le niveau du mercure à l'instant  $t_i$  du niveau moyen NM.  $K$ ,  $\rho$  et  $\alpha$  étant connus,  $\eta$  sera déterminé si l'on peut mesurer  $h_i$  en fonction de  $t_i$ , c'est-à-dire chronométrer l'ascension de la colonne de mercure en B.

Toutes les mesures basées sur l'enregistrement de

temps de passage du mercure, entre des contacts fixes, ne permettent pas de situer, par lecture directe, le niveau moyen NM, variable sous pression, donc de connaître, quelle que soit la pression, les  $h_i$ . Le dispositif que nous décrivons permet de

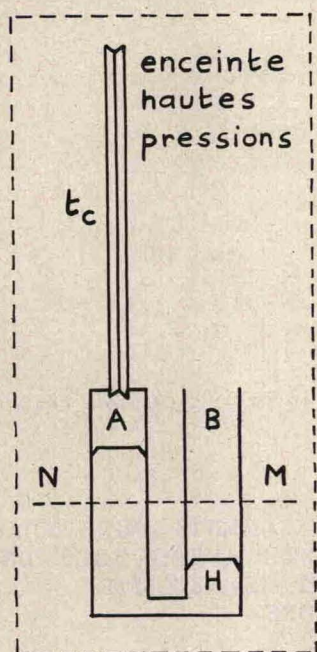


FIG. 1.

suivre les déplacements de la colonne de mercure pendant la durée de l'écoulement, et situer NM, donc lire les hauteurs  $h_i$ . Le coefficient  $\eta$  est donc déterminé sans équivoque à partir de l'enregistrement des positions du niveau du mercure en fonction du temps.

**2. Principe de fonctionnement du nouveau dispositif (fig. 2).** — Les déplacements  $e$  de la colonne de mercure sont repérés par la mesure de la capa-

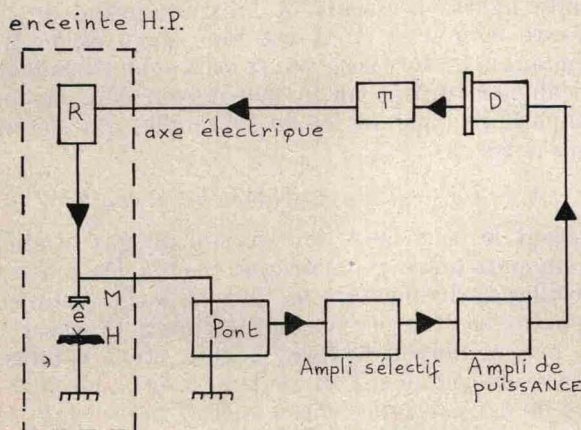


FIG. 2.

cité  $C_e$  ( $C_e = K'/e$ ) dont une des armatures est la surface plane  $H$  du ménisque du mercure, l'autre un disque métallique  $M$ . Tout mouvement du mercure produit une variation de capacité qui est mesurée par un point H. F. de 480 kHz. Ce dernier fournit une tension variable  $V$  à partir de laquelle un dispositif électronique fait tourner un moteur de commande  $D$ . L'axe de  $D$  est couplé à celui d'un synchro-transmetteur  $T$ , qui par téléaffichage retransmet le mouvement de  $D$  à un synchro-récepteur  $R$ , qui, placé à l'intérieur de l'enceinte haute pression, commande les déplacements du disque  $M$ (2). Une chaîne d'asservissement est ainsi bouclée, les mouvements de  $M$  étant asservis à ceux du mercure par la mesure de la capacité  $C_e$ . Le coefficient de viscosité sera donc déterminé si l'on compte le nombre de tours par seconde de l'axe du moteur  $T$ , lorsque le niveau du mercure se déplace.

**3. Description de l'asservissement (fig. 3).** — Nous avons choisi de faire suivre le mercure par le disque  $M$  à une distance  $e$  égale à 0,2 mm. Cette distance réalisant les meilleures conditions expérimentales : distance suffisamment grande pour ne pas souiller le mercure, mais donnant une capacité de grandeur mesurable.

Lorsque  $e = 0,2$  mm,  $V = V(E)$  (qui devient  $Y(E)$  après amplification), le moteur devra s'arrêter. Si le mercure monte de  $\varepsilon$  mm,  $Y > Y(E)$  et si le mercure descend de  $\varepsilon$  mm,  $Y < Y(E)$ . On voit ainsi qu'il est possible, en comparant les variations de  $Y$  par rapport à  $Y_E$ , de situer le disque  $M$  par rapport au mercure, de savoir s'il en est à  $0,2 \pm \varepsilon$  mm. La tension  $Y$  va donc servir à alimenter le moteur  $D$ .

$Y$  est amplifiée, détectée symétriquement, et détermine une polarisation de chaque grille de l'étage push-pull, qui alimente en opposition les deux enroulements  $b_1$  et  $b_2$  de  $D$ .  $b_1$  étant parcouru par un courant  $i_1$ ,  $b_2$  par  $i_2$ ,  $i_2$  étant de signe opposé à  $i_1$  (fig. 3). Sur la figure 4 nous donnons les variations de la différence  $Vg_2 - Vg_1$  des potentiels des grilles 1 et 2 en fonction de  $e$ .

Lorsque le mercure se rapproche de  $M$  en  $M_1$  ( $e = 0,2 - \varepsilon$  mm),  $Vg_2 - Vg_1 < 0$ , aussi l'enroulement 2 est parcouru par un courant plus grand que celui de 1,  $|i_2| > |i_1|$ . Le moteur  $B$  tourne alors dans un sens tel que  $M$  s'éloigne du mercure. Lorsque le mercure s'éloigne de  $M$  en  $M_2$  ( $e = 0,2 + \varepsilon$  mm),  $Vg_2 - Vg_1 > 0$ , aussi l'enroulement 1 est parcouru par un courant plus grand que celui de 2,  $|i_1| > |i_2|$ . Le moteur  $B$  tourne alors dans le sens contraire au précédent, et  $M$  se rapproche du mercure. Lorsque le mercure est en  $E$  ( $e = 0,2$  mm),  $Vg_2 - Vg_1 = 0$ , aussi  $b_1$  et  $b_2$  sont parcourus par des courants égaux, mais de sens contraire ( $i_1 = -i_2$ ). Le moteur  $D$  s'immobilise et le disque  $M$  demeure à 0,2 mm du mer-

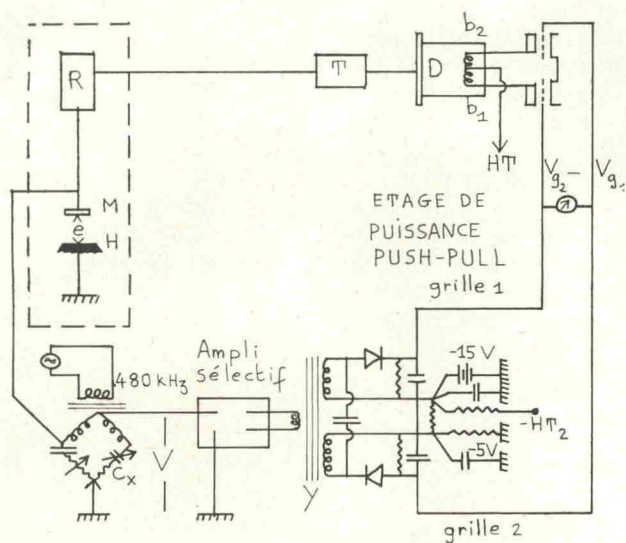


FIG. 3.

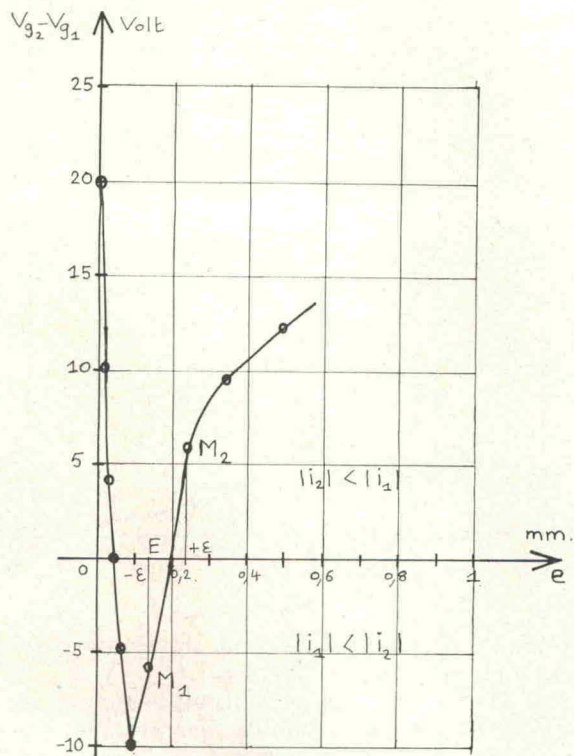


FIG. 4.

Enfin, si le mercure se déplace d'un mouvement continu le disque M suit le ménisque H à une distance de 0,2 mm.

En fait le moteur D démarre dans un sens à -1 volt et dans l'autre sens à +1 volt. Soit à  $\pm 0,01$  mm de sa position de repos. Aussi nous pouvons affirmer que le disque M suivra le mercure à 0,02 mm près. Si l'on veut pousser la sensi-

bilité de l'ensemble, l'armature M entre en oscillations. C'est l'inertie totale de la chaîne d'asservissement qui limite la précision de la lecture, et surtout celle du moteur de commande D. Si nous voulions que l'armature M suive à mieux de 0,01 mm, il nous faudrait, par l'introduction d'une chaîne de contre réaction, vaincre cette inertie. Nous nous contentons quant à nous de cette précision. Dès à présent nous soulignons l'avantage d'un tel dispositif : l'axe électrique, qui se substitue à l'axe mécanique, nous permet d'introduire dans une enceinte sous pression, un mouvement ayant lieu à l'extérieur, puisque l'on sait rendre étanche, et parfaitement isolé électriquement, des passages de courant au travers d'une enceinte hautes pressions.

4. Alimentation sous pression de la capacité. —

Nous avons vu qu'une des armatures de la capacité d'asservissement  $C_e$  était la surface plane du ménisque du mercure, l'autre le disque métallique M (fig. 5). Le potentiel du mercure est à la masse de

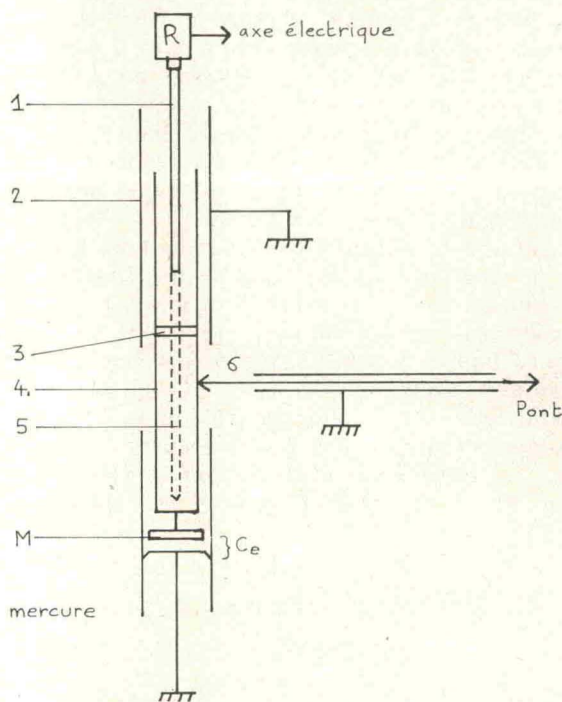


FIG. 5.

l'ensemble viscosimètre-enceinte hautes pressions le disque M à celui du pont par l'intermédiaire du tube 4, d'un collecteur à balais 6 et d'un câble coaxial dont la gaine est à la masse. Le tube 4 est soudé à l'écrou 3 qui se monte sur la vis 5. Celle-ci est accouplée à l'axe du moteur R par un isolant 1. Lorsque le moteur R tourne dans un sens ou en sens contraire, le tube 4 monte ou descend à l'intérieur du vase viscosimétrique con-

tenant le mercure, et d'un autre tube 2 de même diamètre, mis à la masse. La capacité totale de l'ensemble est la somme de  $C_e$  plus celle que compose le tube 4 et la paroi du viscosimètre, et celle avec le tube 4 et le tube 2. Lors d'une montée du mercure, donc de M, la deuxième capacité diminue, alors que la troisième augmente d'une valeur égale, aussi la variation de la capacité totale est uniquement due à la variation d'épaisseur du diélectrique  $e$ . Il était très important de conserver un caractère purement capacitif à l'asservissement. En effet, nous nous sommes aperçus qu'un rayonnement entre surfaces maintenues à des potentiels différents pouvait occasionner un glissement reproductible dans la conservation de la distance entre les armatures de  $C_e$ . Le signal par rayonnement étant même parfois plus important que l'effet purement capacitif. Nous nous sommes efforcés d'éliminer tout rayonnement dans le dispositif décrit ci-dessus en conservant toujours, en regard, les surfaces pouvant rayonner entre elles.

**5. Mesure du coefficient de viscosité.** — Le moteur D tournant en étant asservi aux déplacements  $h_i$  de la colonne de mercure,  $\eta$  sera déterminé si nous introduisons entre le moteur D et le synchro transmetteur T, un dispositif comptant le nombre de tours D par seconde. Dans ce but, nous avons réalisé à l'extérieur de l'enceinte hautes pressions le couplage mécanique que nous allons décrire (fig. 6).

Le moteur D, muni de son réducteur 1, est relié à l'aide de la liaison souple 2 au dispositif mécanique suivant : un arbre 5, qui est solidaire de l'arbre du synchro T, sur lequel sont fixées deux roues dentées 3 et 4. La roue 4 entraîne le pignon 9 fixé sur l'arbre du compteur 10 à quatre chiffres. Celui-ci, compte tenu du pas de la vis dans la bombe, et du rapport des engrenages, permet de lire en déplacements du disque M placé dans la bombe, en cm, mm,  $1/10$  mm, et  $11/100$  mm. Le

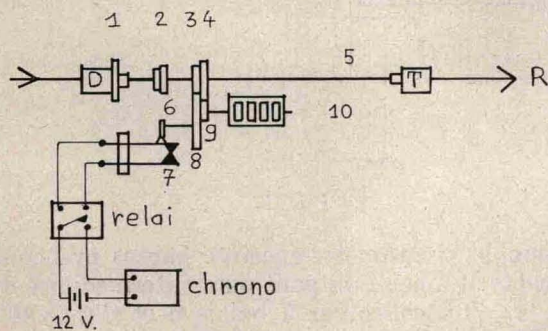


FIG. 6.

pignon 3 engréné avec la roue 8 fait tourner la came 6 qui lui est solidaire. Celle-ci, chaque fois que le compteur indique qu'un mm a été parcouru,

ouvre le rupteur 7 qui, par l'intermédiaire d'un relai négatif à temps de réponse très court, ferme le circuit de frappe d'un chronographe enregistrant au 0,01 seconde près.

Ainsi le disque M, asservi à la remontée du mercure, suit sous pression celui-ci à une distance de 0,2 mm. Son ascension est lue grâce au compteur et enregistrée tous les millimètres par le chronographe. Nous mentionnons que nous pouvons à loisir modifier le rapport d'engrenage si nous voulons enregistrer avec une autre périodicité en distance. La courbe de la figure 7 montre que nous

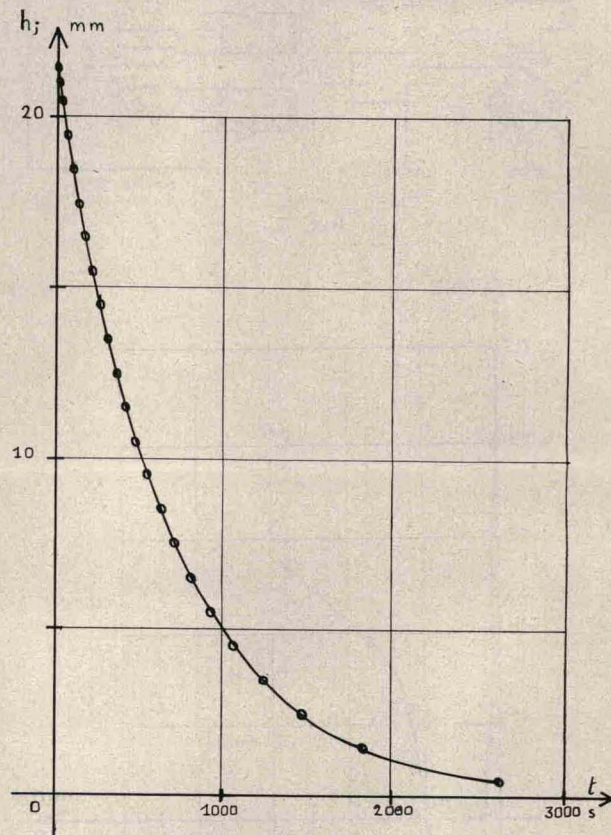


FIG. 7.

possédons assez de points pour tracer avec précision l'intégralité de l'écoulement.

A 5 000 bars le moteur tournait régulièrement, et donnait encore le niveau du mercure à 0,02 mm près. Nous avons constaté que nous devions modifier l'équilibre du point au fur et à mesure que la pression croissait, en particulier nous avons dû corriger les pertes par capacité.

D'autre part, l'ensemble devenait plus nerveux, et nous serions entrés dans la zone d'instabilité si nous n'avions pas diminué le gain d'amplification. Nous concluons donc que quelle que soit la pression, nous conservons la même précision sur la mesure.

Auparavant, nous avions, sur table, remplacé la

colonne de mercure par une vis micrométrique. Nous avons pu ainsi contrôler la fidélité de notre appareil de mesure. En effet, en déplaçant la vis micrométrique de 30 mm, nous avons affiché au compteur  $30 \pm 0,002$  mm en revenant à chaque fois à l'équilibre du pont. C'est l'inertie du moteur D qui est responsable de la précision de 0,02 mm sur les distances  $h_i$ , alors que la mesure par capacité donne une lecture à deux microns près.

En traçant la courbe des  $\log_{10} h_i$  en fonction des temps d'écoulement (fig. 8), on obtient une

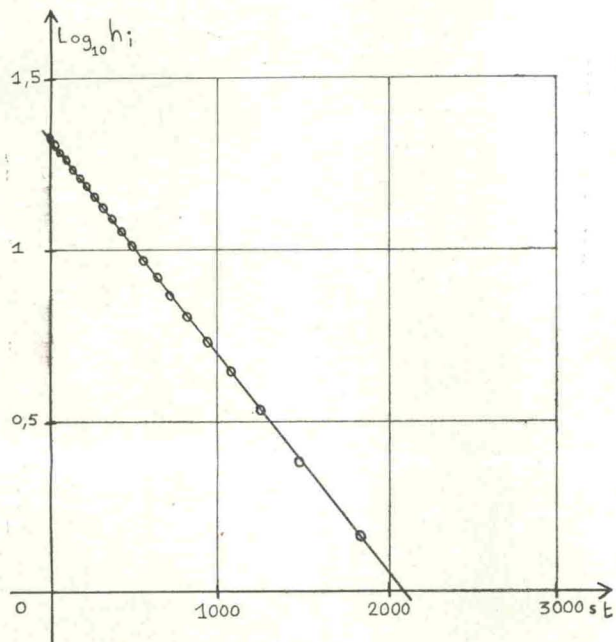


FIG. 8.

droite dont la loi de Poiseuille affirme que la pente est le coefficient de viscosité  $\eta$ . Nous voyons sur cette figure que nous déterminons  $\eta$  avec un grand nombre de points expérimentaux, lors d'un seul écoulement. La précision sur  $\eta$  est de 1/4 000.

**Conclusion.** — Nous avons ainsi réalisé un viscosimètre pouvant donner le coefficient de viscosité  $\eta$  des gaz sous pressions en contrôlant d'une façon continue l'écoulement du gaz. Par rapport aux viscosimètres déjà utilisés, à contacts fixes (3), à contact unique relevé tous les 4 mm, sur une distance finie (1), au laboratoire et dans d'autres laboratoires, deux contacts fixes (4), ce dispositif a les avantages suivants :

Quelle que soit la pression :

— de situer le niveau de départ et le niveau moyen NM ;

— de lire directement pour la première fois des distances  $h_i$  vraies. Autrefois le niveau moyen et les  $h_i$  n'étaient connus que par étalonnage à la pression atmosphérique et calculés sous pression en tenant compte des coefficients de compressibilité des matériaux employés, ou de trois temps de passage successifs.

— de lire de façon continue l'écoulement du mercure en sa totalité. D'où la possibilité d'étudier la reproductibilité de l'appareil, de connaître parfaitement la loi de l'écoulement, la condition essentielle pour mesurer sans équivoque le coefficient  $\eta$  (5) ;

— de suivre à distance le niveau du mercure, donc de le laisser libre dans sa course ;

— de ne pas introduire d'échauffement décelable qui serait préjudiciable à l'obtention de mesures fines.

Nous retenons aussi que ce dispositif permet de s'adapter à bien des problèmes qui se posent sous pression. Puisqu'à 5 000 bars nous avons pu, avec une bonne précision, reproduire un mouvement ayant lieu simultanément à la pression atmosphérique. Il est désormais possible de recréer dans une enceinte sous pression bien des conditions expérimentales que l'on pouvait se permettre sur table, et qu'il était impossible de penser pouvoir réaliser sous pression.

Manuscrit reçu le 26 mai 1965.

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] VERMESSE (J.), JOHANNIN (P.) et VODAR (B.), *C. R. Acad. Sc.*, 1963, 256, 3016-3019.  
 [2] ROCARD (Y.), *Électricité*, Masson, 1961, p. 282.  
 [3] LAZARRE (F.) et VODAR (B.), *C. R. Acad. Sc.*, 1956, 243, 487.

- [4] MICHELS (A.) et GIBSON (R. O.), *Proc. Roy. Soc.*, 1931, A 134, 188-307.  
 [5] KESTIN (J.), *Transfer properties in gases*, Evanston, 1958, p. 30.