

MÉCANIQUE PHYSIQUE. — *Appareils étanches, à coins mobiles, pour production de très hautes pressions statiques en milieu solide.* Note (\*) de M. RAYMOND ÉPAIN, M<sup>lle</sup> CHRISTIANE SUSSE et M. BORIS VODAR, transmise par M. René Lucas.

Les auteurs décrivent des types d'appareils à enclumes multiples à éléments compresseurs (enclumes) restant constamment jointifs et dont certains divergent alors que les autres convergent. Ils distinguent deux types de dispositifs selon que les enclumes mobiles sont situées dans un seul plan ou dans deux plans différents. Ils indiquent brièvement une méthode de calcul de la pression accessible qui pourrait atteindre 200 kbars.

Il est bien connu que la limitation des performances des appareils à haute pression classiques est due à deux causes principales : l'existence de tensions tangentielles de traction pour les réservoirs et l'absence de contraintes latérales de soutien pour les pistons. Les appareils à enclumes multiples, constitués uniquement de pistons, soutenus sur leurs flancs par des joints soumis à l'extrusion, évitent partiellement ces deux défauts. Cependant, d'une part l'extrusion d'une partie du matériau comprimé limite le rendement volumétrique de l'appareil; d'autre part, la distribution des contraintes le long des flancs des enclumes s'écarte trop des conditions optimales (1) pour qu'on puisse obtenir des performances très supérieures à celles des appareils classiques.

Le but de la présente Note est de décrire les structures de quelques dispositifs ne présentant pas ces inconvénients, et de donner de brèves indications sur le mode de calcul de leurs performances.

Il est évident que si l'on maintient tout le long de leur course les éléments compresseurs (enclumes ou coins) en contact sur une portion importante de leurs faces latérales on assure l'étanchéité initiale, permettant ainsi une plus grande latitude de compression et éventuellement l'expérimentation directe avec des milieux fluides. Un autre avantage, un peu moins évident, d'un dispositif à coins jointifs est une meilleure distribution des contraintes de compression.

En revanche, dans de tels dispositifs intervient un facteur nouveau qui ne joue qu'un rôle secondaire dans les autres types d'appareils, à savoir les conditions géométriques imposées aux mouvements des éléments mobiles, par le fait qu'ils doivent assurer la compression, tout en restant constamment jointifs. Dans les dispositifs décrits ici, ces conditions sont remplies par la combinaison de mouvements convergents de certains éléments et de mouvements divergents de certains autres selon des directions bien déterminées; au cours de ces mouvements la compression de l'échantillon à étudier est quand même réalisée grâce au fait que la dimi-

nution de volume due aux éléments convergents est plus grande que l'effet indésirable de l'augmentation de volume produit par les éléments qui divergent.

Un premier type d'appareil (*fig. 1 et 2*) est constitué par quatre coins qui se déplacent entre deux plateaux parallèles, tout en gardant constamment le contact entre eux, par leurs flancs et, avec les plateaux, par leurs faces supérieures et inférieures. Tandis que deux coins opposés se rapprochent, les deux autres situés dans une direction perpendiculaire à celle des précédents s'éloignent de la même distance. En désignant par  $a$  la largeur frontale des premiers et par  $b$  ( $b < a$ ) celle des seconds, la variation relative du volume intérieur limité par les coins atteint la valeur maximale  $\Delta v/v = 1 - b/2a$  lorsque les deux coins larges se touchent.

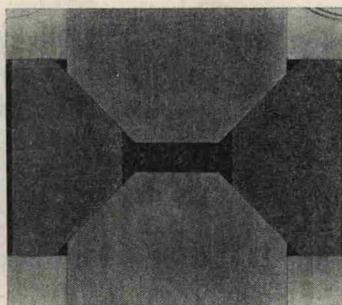


Fig. 1.

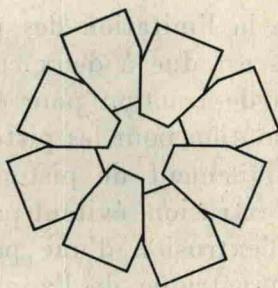


Fig. 3.

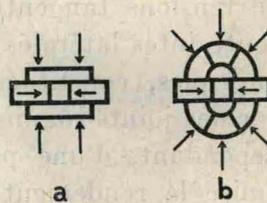


Fig. 2.

La figure 1 est une photographie d'une maquette d'un tel appareil. Chaque coin peut être couplé à un vérin hydraulique, tandis que les plateaux parallèles peuvent être maintenus en appui sur les coins par une presse (*fig. 2 a*). Ces plateaux peuvent être remplacés par deux fermetures hémisphériques constituées par des coins fixes (*fig. 2 b*); ces coins fixes peuvent être isolés entre eux, pour servir de passages de courant. Sur le même principe on peut concevoir des appareils à 6, 8, ...,  $2n$  coins (voir *fig. 3*, un appareil à 8 coins).

On peut calculer approximativement les performances des appareils à coins à appui mutuel par la méthode suivante. On traite le problème en coordonnées polaires et dans le cas de « déformation plane ». On désigne par :  $r_0$  le rayon sur lequel agit la pression  $p_0$ ,  $r_1$  le rayon où cesse le contact entre les coins,  $\alpha$  le demi-angle au sommet du coin,  $k$  le coefficient de frottement. La tension  $\sigma_r$  dans un coin soumis à une charge  $P$  concentrée en son sommet ( $r = 0$ ) a été donnée par Michell <sup>(2)</sup> et l'on peut en déduire la charge « radiale » au rayon  $r_0$  qui est égale à

$$C = 2 \int_0^\alpha (\sigma_r)_{r_0} r_0 d\theta = - \frac{2P \sin \alpha}{\alpha + \frac{1}{2} \sin 2\alpha}.$$

On considère ensuite l'état de charge provenant des tensions agissant sur les flancs du coin ( $\theta = \pm \alpha$ ) que nous supposons conformes aux expressions ci-dessous :

$$\sigma_{\theta} = A \left( \frac{1}{r_1^2} - \frac{1}{r^2} \right), \quad \tau_{r\theta} = \mp A k \left( \frac{1}{r_1^2} - \frac{1}{r^2} \right), \quad A = \text{Cte},$$

cette distribution de tensions, comme celle de  $\sigma_z$ , pouvant éventuellement être obtenue par de légères corrections du profil du coin. Ces conditions aux limites sont satisfaites par la fonction de tension suivante <sup>(3)</sup> :

$$\Phi = a_0 \text{Log} r + b_0 r^2 + d_0 r^2 \theta + a'_0 \theta + a_2 r^2 \cos 2\theta + c_2 r^2 \sin 2\theta + b'_2 \cos 2\theta + d'_2 \sin 2\theta.$$

Par raison de symétrie,  $\tau_{r\theta} = 0$  pour  $\theta = 0$ , et l'on en déduit la distribution des tensions dans le coin et la charge radiale au rayon  $r_0$ , dues

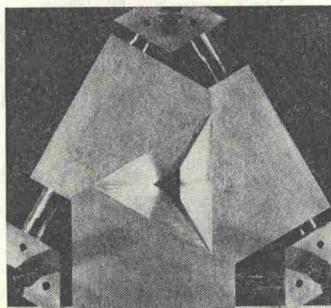


Fig. 4.

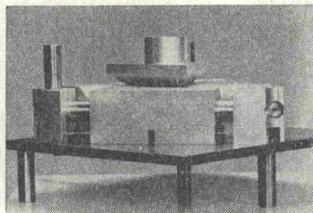


Fig. 5.

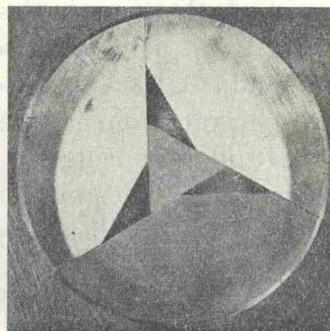


Fig. 6.

aux sollicitations s'exerçant sur les flancs des coins. La superposition des deux états de charges ci-dessus conduit à des expressions de  $p_0$  et des tensions résultantes  $\sigma_{\theta}$ ,  $\sigma_r$  et  $\tau_{r\theta}$ . A partir de ces expressions, on obtient en fonction de  $r$  et  $\theta$  et en posant  $\rho = P/A$  les rayons  $R$  des différents cercles de Mohr ainsi que la distance  $d$  de leur centre à l'origine :

$$R = \frac{A}{r_1^2} \left\{ \frac{k^2 \sin^2 2\theta}{\sin^2 2\alpha} \left( \frac{r_1^2}{r^2} - 1 \right)^2 + \left[ \frac{k \cos 2\theta}{\sin 2\alpha} + \frac{r_1^2}{r^2} \left( 1 + \frac{k \cos 2\theta}{\sin 2\alpha} \right) - \frac{\rho r_1^2 \cos \theta}{2r \left( \alpha + \frac{1}{2} \sin 2\alpha \right)} \right]^2 \right\}^{\frac{1}{2}},$$

$$d = \frac{A}{r_1^2} \left[ 1 + \frac{k}{\text{tg} 2\alpha} + \frac{r_1^2}{r^2} \frac{k \cos 2\theta}{\sin 2\alpha} - \frac{\rho r_1^2 \cos \theta}{2r \left( \alpha + \frac{1}{2} \sin 2\alpha \right)} \right].$$

Les valeurs de  $k$  utilisées sont celles du rapport tension de cisaillement sur pression normale données par Bridgman <sup>(4)</sup>; les résultats qui suivent correspondent à  $k = 0,014$  (plomb) mais ne seraient pas beaucoup modifiés avec  $k = 0,1$ .

A partir des relations ci-dessus et des courbes intrinsèques des carbures de tungstène on obtient la pression  $p_0$  maximale permise.

Les résultats suivants sont donnés à titre d'exemple : de 94 à 137 kbars selon le taux d'écroutissage, pour un appareil à quatre coins avec un carbure à 3 % de cobalt ayant une résistance à la compression égale à 430 kg/mm<sup>2</sup>; 220 kbars pour un appareil à huit coins avec un carbure à 5 % de cobalt ayant une résistance à la compression égale à 600 kg/mm<sup>2</sup>.

Dans un deuxième type d'appareil trois coins se rapprochent simultanément d'un axe vertical perpendiculaire au plan formé par les directions de leur translation, en gardant constamment le contact entre eux par leurs flancs, tandis que deux autres coins, de forme pyramidale, s'écartent du centre de l'appareil selon une direction parallèle à l'axe vertical, en conservant le contact avec les faces obliques supérieures et inférieures des coins du premier groupe (voir fig. 4 et 5 représentant une maquette). Ainsi la réduction de la section triangulaire de la cavité intérieure de l'appareil n'est pas limitée. Pour remédier à l'asymétrie des charges, on peut tronquer la région interne des coins selon une direction perpendiculaire à la bissectrice de l'angle de leurs flancs; on obtient ainsi une variante dont la maquette est représentée par la figure 6. Initialement la section de la cellule a la forme d'une étoile, qui se transforme progressivement pour devenir triangulaire en fin de compression. On peut d'ailleurs obtenir des familles d'appareils dérivés des deux derniers dispositifs, les pièces pyramidales ayant alors 4, 5, 6, ...,  $n$  faces.

Les dispositifs qui viennent d'être décrits, conçus pour être étanches, pourraient être transformés en appareils avec joints soumis à l'extrusion. Dans ce cas, la variation de volume serait peut-être moins dépendante de l'épaisseur du joint que dans les appareils classiques [voir, par exemple, la référence (5)]. Par ailleurs, un des problèmes essentiels est évidemment la réduction des efforts dus aux frottements; la recherche des meilleures conditions de fonctionnement nécessite donc des essais systématiques.

(\*) Séance du 16 août 1967.

(1) F. P. BUNDY, *Modern Very High Pressure Techniques*, edited by R. H. Wentorf, London, Butterworths, 1962, p. 23.

(2) J. H. MICHELL, *Proc. London, Math. Soc.*, 34, 1902, p. 134.

(3) S. TIMOSHENKO et J. N. GOODIER, *Theory of Elasticity*, New York, 1951, p. 124.

(4) P. W. BRIDGMAN, *Proc. Amer. Acad.*, 72, 1938, p. 207.

(5) H. T. HALL, *Rev. Sc. Instr.*, 29, 1958, p. 267.

(Laboratoire des Hautes Pressions, C. N. R. S.,  
1, place Aristide-Briand, Bellevue, Hauts-de-Seine.)