Zeitschrift: Bulletin technique de la Suisse romande
Band: 48 (1922)
Heft: 23

Artikel: De la construction de galeries sous pression intérieure
Autor: Maillart, R.
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-37431

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: 12.07.2025

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

Lorsqu'on arrête la pompe, ce clapet se referme de lui-même dès que l'eau de la conduite principale tend à refouler dans la pompe.

Au printemps, lors de la fonte des neiges, on envoie un homme à la station de pompage et l'on fait fonctionner la pompe tant que l'eau dans le lac de Sorniot ne descend pas au-dessous de la cote 1989 et tant que le lac de Fully n'est pas rempli. *(A suivre.)*

De la construction de galeries sous pression intérieure

par R. MAILLART, ingénieur.

(*Suite*[1].)

Pour déterminer, en connaissant la pression x, les dimensions du revêtement, le problème se présente très simplement si le profil est circulaire (fig. 4). La pression maxima s'exercera à l'intrados et aura la valeur

$$\sigma = x \cdot \frac{2R^2}{R^2 - r^2} \qquad (5)$$

qui deviendra

$$\sigma = \frac{x \cdot R}{d} \qquad (6)$$

si l'épaisseur du revêtement $d = R - r$ est petite par rapport à R.

Par contre pour un profil quelconque, la ligne de pression déterminée par x et qui ne différera guère d'un cercle,

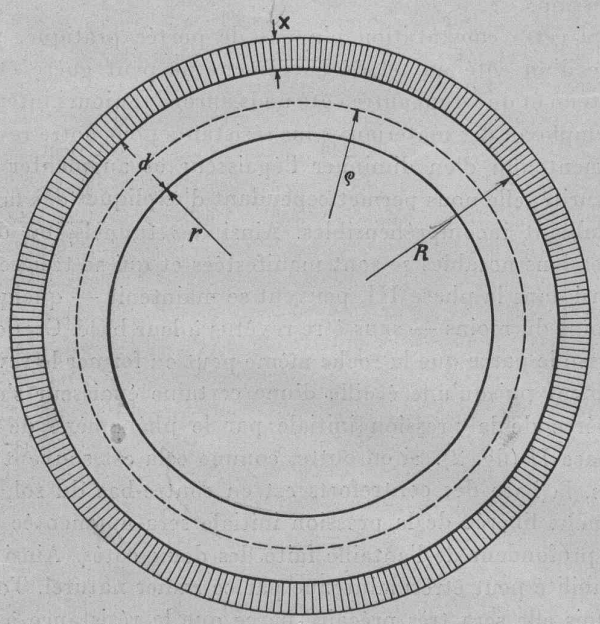

Fig. 4.

déviera du revêtement et semblera provoquer des efforts excentriques si considérables que le revêtement devrait se rompre sans autre. Mais la présence de la roche empêche ce fléchissement parce que sa résistance passive est un multiple de x dans les profondeurs ordinaires. Ainsi il se formera automatiquement une ligne de pression s'adaptant mieux au profil sans pourtant se confondre avec la ligne médiane du revêtement. Pour un profil peu

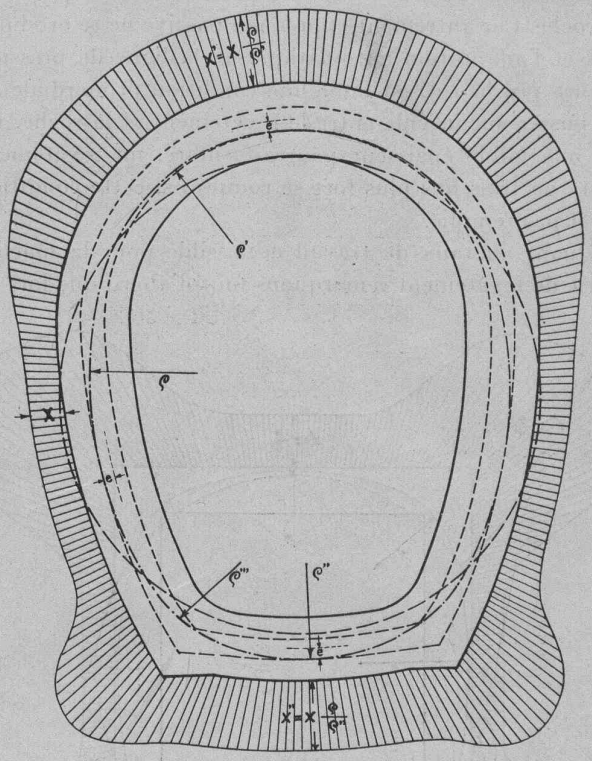

Fig. 5.

cintré et présentant des angles vifs, cette adaptation ne se fera que difficilement tandis qu'elle se réalisera plus facilement pour des profils arrondis. Afin de fixer les idées nous avons dessiné sur les fig. 5 et 6 deux formes en y faisant figurer des lignes de pressions adaptées et les pressions extérieures qui y correspondent. Pour un profil ordinaire fig. 5 on pourra admettre que la ligne des pressions ne sortira pas du noyau central tandis que cela ne sera plus guère le cas pour la fig. 6. La pression x s'exercera sur les parties de plus grand rayon ρ de ces courbes de pression, tandis que dans les autres il règnera une pression passive

$$x' = x \cdot \frac{\rho}{\rho'}$$

La force tangentielle sera partout

$$T = x \cdot \rho$$

et la pression tangentielle maxima dans le revêtement

$$\sigma = \frac{x \cdot \rho \cdot (d + 6e)}{d^2} \qquad (7)$$

Nous voyons donc que la fatigue dans le revêtement dépend essentiellement du rayon maximum ρ et de l'excentricité e de la ligne des pressions et qu'ainsi les efforts seront d'autant plus grands que la courbure du profil sera plus irrégulière. La forme circulaire reste donc évidem-

[1] Voir *Bulletin technique* du 28 octobre 1922, page 256.

ment la meilleure, puisqu'aucune figure de même aire ne comportera un rayon maximum aussi petit et qu'il n'y aura pas à craindre trop d'excentricité.

Tout ce que nous venons de dire ne s'applique que dans le cas où le revêtement épouse parfaitement le profil de la roche. Car autrement la pression passive ne se produira pas et l'adaptation automatique de la ligne de pression n'aura pas lieu. C'est donc une condition primordiale de ne laisser aucun vide entre le revêtement et la roche. Là où une faible épaisseur pourrait suffire, un revêtement deux ou trois fois plus fort se rompra, si cette condition n'est pas remplie.

Quant au taux de travail admissible pour la maçonnerie de revêtement remarquons tout d'abord que lors de

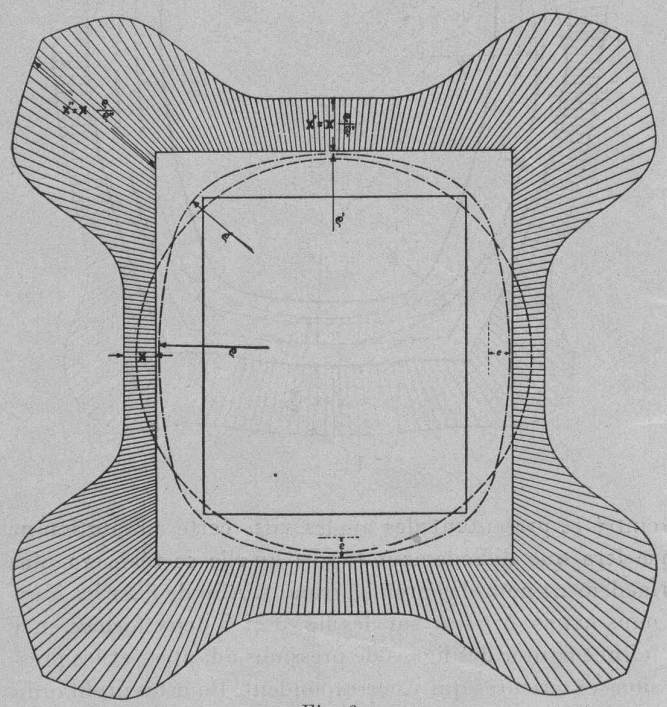

Fig. 6.

la construction de tunnels nous avons affaire à des charges dépassant tout ce qui peut se présenter dans les autres domaines de la construction. Mais d'un autre côté, pour autant que la roche présente quelque peu de cohésion, l'effondrement subit d'un revêtement n'est pas à craindre, sa destruction exigeant un certain laps de temps pendant lequel les phénomènes caractéristiques de l'écrasement progressif ne peuvent passer inaperçus. Cette sécurité vis-à-vis du danger de catastrophe permet de faire travailler les revêtements à un taux très élevé jusqu'à atteindre la résistance à la rupture. Ainsi donc souvent le coefficient de sécurité ne dépassera guère l'unité et le coefficient de travail admissible se confond avec celui de rupture. Il ne faut donc pas s'étonner si les coefficients de travail que nous admettons sont le décuple de ceux employés ordinairement.

Constatons une chose assez curieuse : si le rayon ρ n'est pas trop grand et l'épaisseur d pas trop petite, il se peut que la pression tangentielle dans le revêtement reste plus petite que k_1, même si la pression tangentielle dans la roche $y = p \cdot \gamma$ en est un multiple.

Exemple : profondeur $p = 2000$ m. $\gamma = 2{,}5$ t/m³.

Donc $y = p\gamma = 0{,}5$ t/cm²

admettons $k_1 = 0{,}2$ t/cm².

Notre formule (4) nous donne :

$$x = \frac{0{,}5^2 - 0{,}2^2}{3(0{,}2 + 1)^2} = 0{,}049 \text{ t/cm}^2.$$

Admettant un rayon de plus grande courbure de la ligne de pression

$$\rho = 2{,}0 \text{ m.}$$

et une épaisseur du revêtement $d = 1{,}0$ m. avec $e = \frac{d}{12}$

nous trouvons selon (7)

$$\sigma = \frac{0{,}049 \,.\, 2{,}0(1{,}0 + 0{,}5)}{1{,}0^2} = 0{,}147 \text{ t/cm}^2 < k_1.$$

Ainsi donc pour arrêter le processus de destruction dans une certaine roche, un revêtement ne dépassant pas en résistance cette même roche pourrait souvent suffire. Cette constatation, qui semble des plus paradoxales à première vue, s'explique pourtant parfaitement par le fait que le revêtement n'est pas comprimé d'ores et déjà comme cela a lieu pour la roche même. Si nous pouvions, lors du percement de la galerie, libérer une zone de roche d'une certaine épaisseur sur tout le pourtour de sa pression tangentielle initiale, cette zone pourrait agir tout comme un revêtement artificiel, c'est-à-dire empêcher dans certains cas l'écrasement de la roche restée sous pression.

Si cette constatation n'a pas de portée pratique, vu que d'un côté un tel déchargement ne peut guère être obtenu et que d'un autre côté nous aurons toujours intérêt à employer des matériaux plus résistants pour notre revêtement afin d'en diminuer l'épaisseur et augmenter la sécurité, elle nous permet cependant d'expliquer des faits semblant incompréhensibles. Ainsi des tunnels, où des pressions notables se sont manifestées et qui se trouvent ainsi dans la phase III, peuvent se maintenir — quelque temps du moins — sans être revêtus à leur base. Ceci est possible parce que la roche même peut en former le revêtement puisqu'une écaille d'une certaine épaisseur s'est libérée de la pression initiale par le phénomène de la phase II (fig. 2). Si en outre, comme cela est souvent le cas, la base des contreforts est en contre-bas du sol, la couche libérée de la pression initiale sera augmentée de la profondeur de l'entaille faite des deux côtés. Ainsi la stabilité peut être maintenue par ce radier naturel. Toutefois elle sera très précaire parce que la résistance à la compression de cette écaille de roche est aléatoire, surtout si l'entaille des fondations des pieds-droits est faible. Ainsi il semble risqué de laisser un tunnel sans radier, si l'on doit s'attendre à une pression x notable. Autrement on aura à constater trop souvent un rapprochement continu des pieds-droits avec relèvement du sol. On a émis l'opinion que de ces deux phénomènes le second est la

conséquence du premier. En vérité les deux sont les effets de la même cause.

Nos considérations, qui diffèrent essentiellement de la manière de voir des auteurs ayant traité le sujet, nous permettent d'arriver encore à d'autres conclusions intéressantes. En traversant une mauvaise roche nous devrons toujours laisser une large part à l'appréciation pour fixer l'épaisseur et la qualité du revêtement. Car il est impossible de déterminer expérimentalement les pressions réelles et la résistance effective de la roche. Vu aussi la variabilité d'un point à l'autre des bases d'un calcul éventuel, nous en serons toujours réduits à des évaluations plus ou moins arbitraires. Ainsi nous pourrons, le cas échéant, hésiter à choisir entre un ou deux mètres d'épaisseur en maçonnerie ordinaire ou en pierre de taille ou en béton armé. Bien que par exemple nous pussions estimer un mètre de maçonnerie ordinaire comme suffisant, nous serions portés à adopter le double en pierre de taille, parce que si ce revêtement se montrait insuffisant, la démolition et la réfection seraient extrêmement difficiles et coûteuses. En nous basant sur les principes qui ont été émis, nous allons décrire à l'aide d'un exemple un procédé permettant de mieux s'adapter à priori aux circonstances inconnues.

Admettons que nous nous trouvions à 1800 m. de profondeur, ce qui nous fait présumer une pression tangentielle de $y = p \cdot \gamma = 1800 \cdot 2{,}6 = 4700$ t/m² $= 0{,}47$ t/cm². Soit $r = 3{,}0$ m. le rayon imposé du profil de l'espace libre. Nous avons à notre disposition de la maçonnerie pouvant travailler à $\sigma = 0{,}25$ t/cm² et de la pierre de taille avec $\sigma = 0{,}40$ t/cm². La résistance de la roche ne peut guère être appréciée, toutefois nous constatons l'écrasement de la roche en l'absence de boisages. Donc nous nous trouvons dans la phase III, où $y > k_1$. En cas d'hésitation entre les valeurs de $k_1 \begin{matrix} > 0{,}06 \\ < 0{,}30 \end{matrix}$ il semble qu'il faudrait se baser d'emblée sur le chiffre le plus faible. La pression radiale nécessaire afin d'empêcher l'écrasement de la roche sera alors selon (4)

$$x = \frac{0{,}47^2 - 0{,}06^2}{3 \cdot 1{,}06^2} = 0{,}065 \text{ t/cm}^2.$$

Afin de déterminer le rayon extérieur du revêtement, rappelons-nous la relation (5) tout en tenant compte d'une excentricité pouvant doubler le taux du travail, c'est-à-dire en posant

$$\sigma = x \cdot \frac{4\,R^2}{R^2 - r^2} \qquad (7\,a)$$

d'où nous tirons

$$R = r \sqrt{\frac{\sigma}{\sigma - 4x}} \qquad (8)$$

$$= 3{,}0 \sqrt{\frac{0{,}40}{0{,}40 - 4 \times 0{,}065}} = 5{,}07 \text{ m.}$$

L'épaisseur nécessaire de ce revêtement en pierre de taille sera donc

$$d = R - r = 5{,}07 - 3{,}00 = 2{,}07 \text{ m.}$$

Mais au lieu de procéder de cette manière fort coûteuse, nous ferons exactement le contraire c'est-à-dire nous nous baserons sur la valeur maxima $k_1 = 0{,}30$ nous donnant

$$x = \frac{0{,}47^2 - 0{,}30^2}{3 \cdot 1{,}30^2} = 0{,}026 \text{ t/cm}^2$$

ce qui nous permettra de nous contenter d'un revêtement bien plus mince tout en employant de la maçonnerie ordinaire. Toutefois nous adopterons un profil d'espace libre plus grand que celui imposé, c'est-à-dire que nous prati-

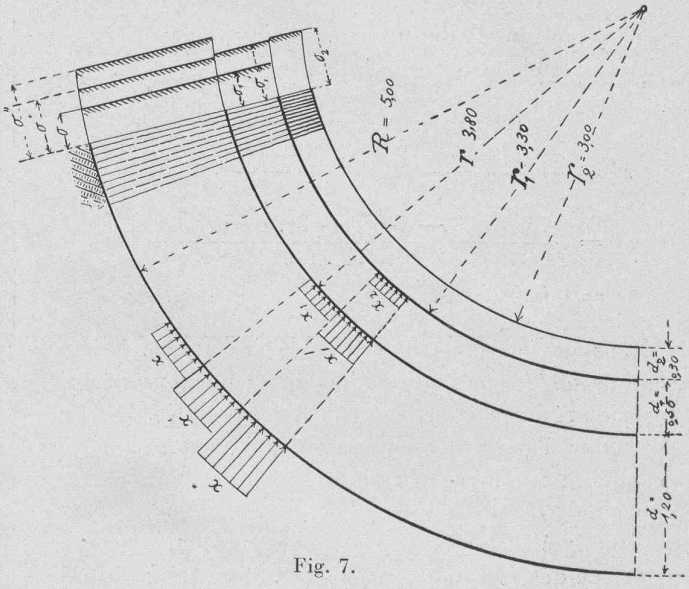

Fig. 7.

rons d'un rayon extérieur à peu près égal à celui trouvé plus haut, en prenant $R = 5{,}0$ m. (fig. 7) et nous trouverons selon (8)

$$r = R \sqrt{\frac{\sigma - 4x}{\sigma}} \qquad (9)$$

$$= 5{,}0 \sqrt{\frac{0{,}25 - 4 \cdot 0{,}026}{0{,}25}} = 3{,}80 \text{ m.}$$

c'est-à-dire une épaisseur

$$d = R - r = 1{,}20 \text{ m.}$$

Si ce revêtement résiste, nous aurons réalisé une grande économie tant au point de vue de la qualité que de la quantité du revêtement. Si au contraire nous remarquons des phénomènes de fatigue excessive prouvant que k_1 est inférieur à 0,30 t/cm², c'est-à-dire que nous avons surestimé la résistance de la roche, nous pourrons y remédier en construisant un second anneau de revêtement à l'intérieur en utilisant une partie de l'espace que nous nous sommes réservé à cet effet. Choisissons 0,50 m. comme épaisseur de ce deuxième anneau et contentons-nous encore de maçonnerie ordinaire, c'est-à-dire $\sigma_1 = 0{,}25$.

Cet anneau pourra selon (7 *a*) supporter une pression de

$$x_1 = \sigma_1 \cdot \frac{r^2 - r_1^2}{4r^2}$$

$$= 0{,}25\,\frac{3{,}8^2 - 3{,}3^2}{4 \cdot 3{,}8^2} = 0{,}015 \text{ t/cm}^2.$$

Cette pression aura d'abord pour effet de soulager le premier anneau, mais en outre elle *augmente sa résistance à la rupture de* $\sigma = 0{,}25$ à $\sigma' = 0{,}364$ t/cm², car selon (3)

$$\sigma' = \sqrt{3 \,.\, 0{,}015 \,.\, 1{,}25^2 + 0{,}25^2} = 0{,}364 \text{ t/cm}^2.$$

L'effort maximum dans le premier anneau sollicité maintenant par des pressions extérieures x' et intérieures x_1 est donné par la formule connue

$$\sigma' = \frac{2x'R^2 - x_1(R^2 + r^2)}{R^2 - r^2}$$

Nous prendrons le double pour tenir compte de l'excentricité possible et obtenons alors, comme pression radiale que les deux anneaux ensemble peuvent supporter :

$$x' = \frac{\sigma'(R^2 - r^2) + 2x_1(R^2 + r^2)}{4R^2} \qquad (10)$$

$$= \frac{0{,}364(5{,}0^2 - 3{,}8^2) + 2 \,.\, 0{,}015(5{,}0^2 + 3{,}8^2)}{4 \,.\, 5{,}0^2}$$

$$= 0{,}050 \text{ t/cm}^2.$$

Nous voyons donc que pour avoir augmenté l'épaisseur de 40 % par l'adjonction du deuxième anneau, la force de résistance du revêtement est doublée. Il est évident que l'augmentation aurait été encore bien plus grande en employant la pierre de taille pour le second anneau.

Si malgré ce renforcement l'on remarquait encore des signes de détérioration, on pourra utiliser les 0,30 m. restants. En admettant la même qualité de maçonnerie on pourra déjà s'attendre à un bon résultat, mais vu que nous utilisons notre drenière ressource et qu'il s'agit d'un cube relativement faible, nous aurons recours à la pierre de taille avec $\sigma_2 = 0{,}40$ t/cm². Nous obtiendrons pour la pression exercée par ce troisième anneau

$$x_2 = 0{,}40 \; \frac{3{,}3^2 - 3{,}0^2}{4 \,.\, 3{,}3^2} = 0{,}017 \text{ t/cm}^2.$$

Grâce à cette pression radiale la résistance tangentielle du second anneau sera portée de 0,250 à 0,377 t/cm², car

$$\sigma'_1 = \sqrt{3 \,.\, 0{,}017 \,.\, 1{,}25^2 + 0{,}25^2} = 0{,}377 \text{ t/cm}^2$$

et nous obtiendrons pour la pression maxima possible entre le premier et le second anneau selon (10)

$$x'_1 = \frac{0{,}377(3{,}80^2 - 3{,}30^2) + 2 \,.\, 0{,}017\,(3{,}80^2 + 3{,}30^2)}{4 \,.\, 3{,}80^2}$$

$$= 0{,}038 \text{ t/cm}^2.$$

Nous avons donc, en ajoutant l'anneau de 0,30 m. à celui de 0,50 m. augmenté deux fois et demie sa surcharge de rupture et quant au premier anneau nous pourrons y compter avec une résistance à la rupture de 0,490 t/cm², car

$$\sigma'' = \sqrt{3 \,.\, 0{,}038 \,.\, 1{,}25^2 + 0{,}25^2} = 0{,}490 \text{ t/cm}^2.$$

L'ensemble des trois anneaux pourra donc porter

$$x'' = \frac{0{,}490(5{,}00^2 - 3{,}80^2) + 2 \,.\, 0{,}038(5{,}00^2 + 3{,}80^2)}{4 \,.\, 5{,}00^2}$$

$$= 0{,}082 \text{ t/cm}^2.$$

Ainsi les trois anneaux de 2,0 m. d'épaisseur totale pourront porter plus du triple de l'arc de 1,20 m. c'est-à-dire qu'en procédant de cette façon, nous posséderons une très grande marge pour les renforcements sans nécessité de démolition.

Nous trouvons donc que l'ensemble de nos trois anneaux, ne contenant que 10 % de pierre de taille, fournirait 30 % plus de résistance qu'un seul anneau en pierre de taille puisque ce dernier ne supporterait que $x = 0{,}065$ t/cm². (*A suivre.*)

UN NOUVEAU TYPE DE TURBINE HYDRAULIQUE

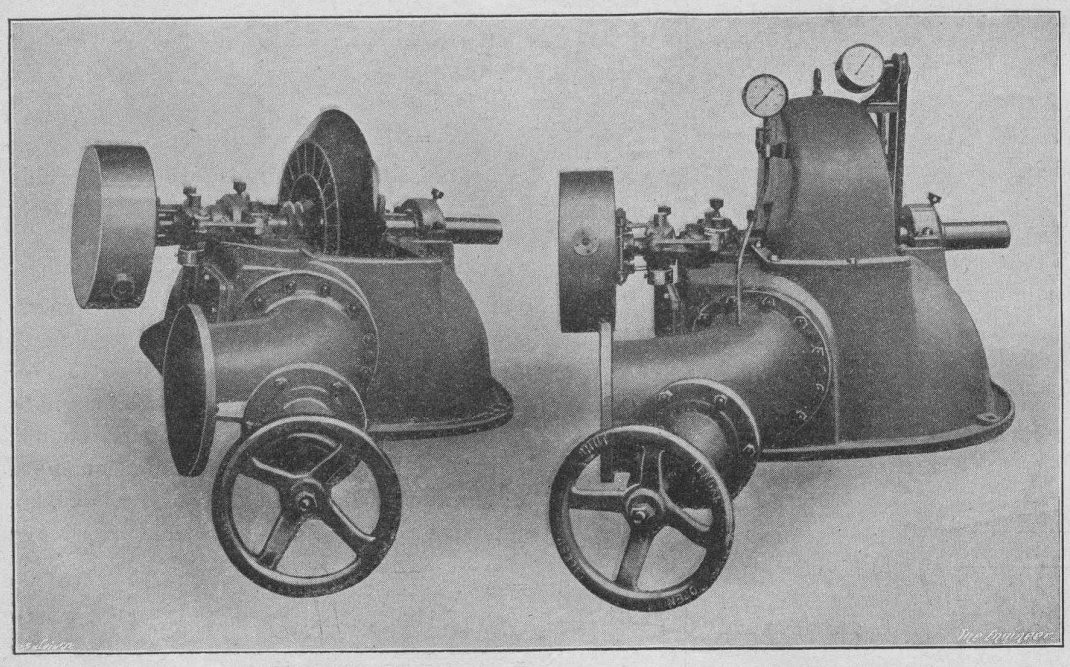

Fig. 1 — Vues d'une turbine « Turgo » construite par *Gilbert Gilkes & C°*, à Kendal.

Un nouveau type de turbine hydraulique.

L'emploi de la turbine Pelton est limité par la capacité de puissance relativement faible de cette machine qui, on le sait, ne travaille avec un bon rendement que si le diamètre du jet n'est pas supérieur à un douzième environ du diamètre de la roue. Des tentatives de porter ce rapport à $^1/_{10}$ ou même au delà n'ont pas eu en général des résultats satisfaisants.