

Zeitschrift: Bulletin technique de la Suisse romande
Band: 58 (1932)
Heft: 5

Artikel: Répartition du coup de bélier le long d'une conduite hydraulique en pression
Autor: Oguey, Pierre
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-44821>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

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. [Voir Informations légales.](#)

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. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 31.03.2025

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

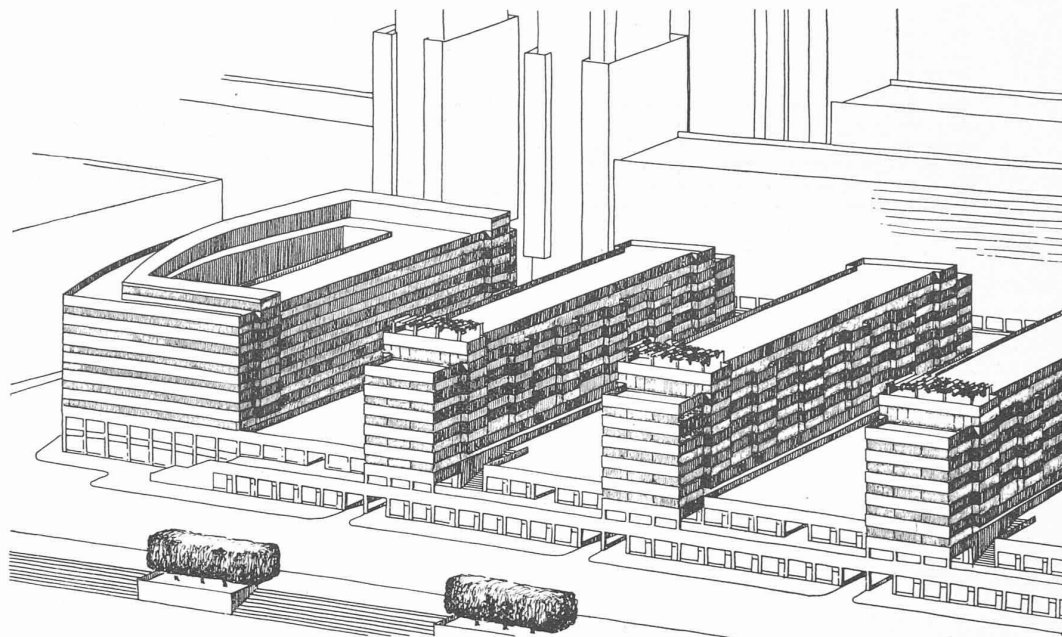


Fig. 7. — Vue à vol d'oiseau du Quai des Bergues (terrasses et trottoirs).

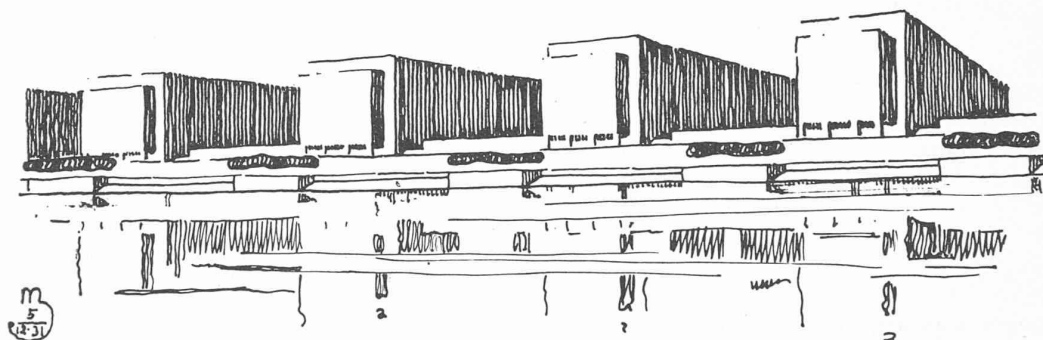


Fig. 8. — Le Quai des Bergues, avec ses escaliers pour l'accostage des embarcations.

de vue économique que de l'unité et du caractère général.

Cette opération devrait et pourrait s'exécuter sur un échelonnement de dix années.

Conclusions.

L'examen que nous venons de faire nous prouve que la reconstruction de la Rive droite n'est pas une utopie, comme certains esprits timorés ou retardés veulent bien l'affirmer.

Elle est réalisable, parfaitement réalisable, techniquement et financièrement.

Que l'on ne me reproche pas de m'illusionner. Je reconnais toute l'importance de l'œuvre ; je juge le problème dans son véritable ordre de grandeur. C'est donc d'un œil parfaitement lucide que j'entrevois les avantages de tous ordres qui résulteraient pour notre ville, si l'on reconstruisait la Rive droite suivant les principes nouveaux de l'urbanisme.

Dans toute œuvre il faut la foi. Ayons donc une foi sans réserve en une plus grande Genève.

Cette conviction peut, seule, donner l'énergie susceptible de mener à bien, avec une vision claire et précise des choses d'aujourd'hui et de demain, l'entreprise la plus considérable qu'aura enregistrée l'histoire du développement de notre Cité.

Genève, le 17 janvier 1932.

MAURICE BRAILLARD,
architecte.

Répartition du coup de béliet le long d'une conduite hydraulique en pression,

par M. PIERRE OGUEY,

professeur à l'Ecole d'ingénieurs de l'Université de Lausanne.

M. L. Du Bois, ingénieur, vient de publier sous ce titre (*Bulletin technique*, Nos 23 à 26, 1931) un intéressant article où, à l'aide de la théorie de Michaud ingénieusement modifiée par lui, il aborde le problème difficile de la répartition du coup de béliet maximum le long d'une conduite forcée.

Cet article contient malheureusement, à côté de choses excellentes, des appréciations tout à fait injustifiées à l'égard d'une théorie généralement admise (Allievi) qu'il tend à discréditer au profit d'une théorie antérieure (Michaud) qui en fait s'éloigne davantage de la réalité.

M. Du Bois fait une comparaison involontairement fort tendancieuse puisqu'il modifie la théorie de Michaud pour l'adapter au cas étudié, tandis qu'il utilise bruts les

résultats de celle d'Allievi sans se préoccuper de voir si les hypothèses qui sont à sa base sont réalisées.

L'ouvrage de M. D. Eydoux (« Hydraulique générale et appliquée ») auquel il se réfère dit cependant à la page 68 :

« En ce qui concerne les conduites, les unes ont la même épaisseur, le même diamètre et la même nature sur toute leur longueur. Ce sont les conduites à *caractéristique unique*. Le plus souvent, au contraire, l'épaisseur et parfois le diamètre varient d'une extrémité à l'autre ; on a alors des conduites à *caractéristique variable*.

» Etant données les formes différentes des phénomènes, il est commode de les étudier comme s'ils étaient d'origine différente. Nous étudierons donc successivement les coups de bélier d'onde et les oscillations en masse en commençant par les conduites à caractéristique unique. »

Il est donc clair que tous les calculs et conclusions qui suivent, y compris le § 69 donnant la répartition du coup de bélier, d'après Allievi, en cas de fermeture brusque ou lente, se rapportent à des conduites à caractéristique unique, jusqu'à la page 85 où débute le paragraphe traitant des conduites à caractéristique variable. Il ne faut par conséquent, pas s'étonner que leur application à une conduite comme celle de Fully, dont le diamètre passe de 500 à 600 mm et l'épaisseur de 41 à 6 mm conduise à des résultats complètement faux.

Examinons rapidement le seul cas où un calcul *simple* soit possible, celui de la *fermeture complète instantanée*.

La formule d'Allievi

$$\Delta y = \frac{av_o}{g}$$

peut être établie directement, pour une section quelconque d'un tuyau cylindrique quelconque, par simple application du théorème des forces vives. Il suffit d'exprimer que l'énergie cinétique de la masse d'eau contenue dans l'unité de longueur de tuyau et annulée lorsque la vitesse passe de v_o à zéro est absorbée par une déformation élastique du liquide et des parois. Le facteur a intervient ici, M. Du Bois l'a très justement remarqué, comme caractéristique de l'élasticité des éléments considérés et non comme vitesse de propagation.

Nous pouvons ainsi déterminer, dans une conduite comme Fully, des valeurs de Δy variables d'un tronçon à l'autre, mais constantes d'un bout à l'autre de chaque tronçon à caractéristique constante, soit, en commençant à l'extrémité aval

$$\left. \begin{aligned} \Delta y_1 &= \frac{a_1 v_{o1}}{g} \\ \Delta y_2 &= \frac{a_2 v_{o2}}{g} \\ \Delta y_i &= \frac{a_i v_{oi}}{g} \\ \Delta y_n &= \frac{a_n v_{on}}{g} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

A Fully, il y a un seul changement de diamètre, mais l'épaisseur varie beaucoup. La caractéristique a diminue,

de l'aval vers l'amont, jusqu'à 1320 environ dans le dernier tuyau étiré, de 31 mm. d'épaisseur, s'élève à 1330 m/sec dans le premier tuyau soudé de 34 mm, pour redescendre ensuite, à mesure que l'on se rapproche de la chambre de mise en charge.

On trouverait ainsi :

A l'usine hydro-électrique (point de mesure A)

$$D = 500 \text{ mm} \quad e = 41 \text{ mm} \quad a = 1342 \text{ m/sec}$$

$$v_o = 0,60 \text{ m/sec} \quad \Delta y = 82 \text{ m}$$

$$\text{ou} \quad v_o = 0,80 \text{ m/sec} \quad \Delta y = 109,5 \text{ m}$$

A la station de Sorniot (point de mesure B)

$$D = 600 \text{ mm} \quad e = 8 \text{ mm} \quad a = 1070 \text{ m/sec}$$

$$v_o = 0,41 \text{ m/sec} \quad \Delta y = 44,7 \text{ m}$$

$$\text{ou} \quad v_o = 0,55 \text{ m/sec} \quad \Delta y = 60 \text{ m}$$

A la chambre des vannes (point de mesure C) et jusqu'à la section d'entrée de la conduite

$$D = 600 \text{ mm} \quad e = 6 \text{ mm} \quad a = 1000 \text{ m/sec}$$

$$v_o = 0,41 \text{ m/sec} \quad \Delta y = 41,8 \text{ m}$$

$$\text{ou} \quad v_o = 0,55 \text{ m/sec} \quad \Delta y = 56 \text{ m}$$

Mais les formules (2) donnent la surpression qui se produirait si chaque tronçon se comportait comme une conduite isolée pourvue à son extrémité aval d'un obturateur instantanément fermé. Or, les différents tronçons réagissent en fait les uns sur les autres et la répartition des pressions en est sensiblement modifiée.

En effet, dans la section o_1 de réunion des tronçons 1 et 2 ne peut régner qu'une seule pression, alors que les formules (9) donnent

$$\frac{a_1 v_{o1}}{g} > \frac{a_2 v_{o2}}{g}$$

Au moment où l'onde de surpression $\Delta y_1 = a_1 v_{o1}/g$ arrive en o_1 , un équilibre va instantanément se produire. Le tronçon 2 sera parcouru par une surpression $\Delta y_2 > a_2 v_{o2}/g$ cependant qu'une dépression partielle $\Delta y'_1$ parcourra en sens inverse le tronçon 1.

On exprime ce fait en disant que l'onde Δy_1 est partiellement transmise et partiellement réfléchi par la section o_1 . Désignons par $\phi_{1,2}$ le facteur de transmission et $\alpha_{1,2}$ le facteur de réflexion. Nous aurons

$$\Delta y_2 = \frac{2a_2 s_1}{a_1 s_2 + a_2 s_1} \Delta y_1 = \phi_{1,2} \Delta y_1$$

$$\Delta y'_1 = \frac{a_2 s_1 - a_1 s_2}{a_1 s_2 + a_2 s_1} \Delta y_1 = \alpha_{1,2} \Delta y_1$$

formules équivalentes à celles citées par M. D. Eydoux, page 85.

La caractéristique de la conduite définie par Allievi

$$\rho = \frac{av_o}{2gy_o}$$

varie évidemment ici d'une section à l'autre. En désignant par $\rho_1 = a_1 v_{o1}/2gy_{o1}$ et $\rho_2 = a_2 v_{o2}/2gy_{o2}$ les caractéristiques des deux tronçons, en tenant compte de

l'équation de continuité $Q_o = s_1 v_{o1} = s_2 v_{o2}$ et du fait qu'au point de réunion $y_{o1} = y_{o2}$ on constate que ces facteurs sont aussi donnés par les expressions :

$$\varphi_{1,2} = \frac{2\rho_2}{\rho_1 + \rho_2} \quad \text{et} \quad \alpha_{1,2} = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_1 + \rho_2}.$$

Nous trouvons un facteur φ à chaque passage d'un tronçon à l'autre. Si nous désignons par Φ_{i-1} le produit des $(i-1)$ premiers facteurs, nous obtenons comme valeur de la première surpression dans les divers tronçons

$$\left. \begin{aligned} \Delta y_1 &= \frac{a_1 v_{o1}}{g} \\ \Delta y_2 &= \varphi_{1,2} \Delta y_1 = \Phi_1 \Delta y_1 \\ \Delta y_3 &= \varphi_{2,3} \Delta y_2 = \varphi_{1,2} \varphi_{2,3} \Delta y_1 = \Phi_2 \Delta y_1 \\ &\dots \dots \dots \\ \Delta y_i &= \varphi_{1,2} \varphi_{2,3} \dots \varphi_{i-1,i} \Delta y_1 = \Phi_{i-1} \Delta y_1. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

La fonction $\Delta y = f(x)$ donnant le *coup de béliet primaire de fermeture complète instantanée*, qui n'est pas nécessairement le coup de béliet maximum, est représentée par une ligne, brisée à chaque changement de diamètre ou d'épaisseur, mais parallèle à l'axe de la conduite développée d'un bout à l'autre de chaque tronçon à caractéristique constante. Cette ligne est constamment supérieure à celle obtenue à l'aide des formules (2) sauf pour le tronçon voisin de l'obturateur.

L'étude des variations de pressions résultant des réflexions successives devrait faire intervenir non plus seulement la caractéristique des divers tronçons, mais leur longueur. Or les premiers tronçons ont déjà subi plusieurs variations de pression avant même que l'onde primaire ait atteint la section d'entrée et le problème, dans une conduite comme celle de Fully composée de plus de 40 tronçons, devient très complexe.

Il se complique encore si la *fermeture est progressive*. Sans entrer dans des détails inutiles, notons par exemple que si le temps de manœuvre τ est plus grand que $2l_1/a_1$ l'onde secondaire issue de l'extrémité o_1 du premier tronçon atteint l'obturateur avant la fermeture complète et produit une diminution de la surpression finale Δy_1 ; à l'obturateur, la surpression de fermeture brusque au sens habituel du mot (c'est-à-dire s'effectuant en un temps plus petit que $\frac{2L_{total}}{a_{moyen}}$) peut donc être inférieure à $\frac{a_1 v_{o1}}{g}$ et le maximum de surpression également abaissé dans les tronçons suivants. On peut donc constater une *atténuation* du coup de béliet, alors même que l'on reste dans la limite des fermetures brusques, dès que la fermeture n'est plus instantanée.

D'autre part, le coup de béliet ainsi modifié, tant par les réflexions des premiers tronçons que par les facteurs φ précédemment définis, ne se transmettra que jusqu'à la distance $a_n \tau / 2$ de la section d'entrée, a_n étant la vitesse de propagation relative au dernier tronçon et

τ le temps de fermeture. A Fully, $a_n = 1000$ m/sec; τ n'a pas été exactement mesuré, mais M. Du Bois l'admet (p. 291) égal à une seconde.

$$\frac{a_n \tau}{2} = \frac{1000 \times 1}{2} = 500 \text{ m.}$$

A partir de la section correspondante, où la variation de la fonction $\Delta y_{max} = f(x)$ subit une discontinuité (on pourrait démontrer en effet qu'en général, notamment si la fermeture est effectuée à vitesse constante, cette fonction possède en ce point deux tangentes distinctes) le coup de béliet diminuera progressivement suivant une courbe fonction de la loi de fermeture, *ici inconnue*, jusqu'à l'origine de la conduite où il reste constamment nul.

Pour se faire une idée de la répartition du coup de béliet à l'aide des mesures effectuées par M. Du Bois, on peut sur la figure 1 de son article (p. 291)¹ tracer une droite passant par A_1 et B_1 jusqu'à son point de rencontre, appelons-le E_1 , avec une droite $D C_1$ passant par l'origine de la conduite.

La ligne $A_1 B_1 E_1 C_1 D$ donne une image *grossière* de la réalité, à cause des multiples simplifications qu'elle suppose, mais, si arbitraire qu'elle puisse être, elle me paraît plus légitime que la courbe parabolique $A_1 B_1 C_1 D_1$. Une ligne analogue pourrait d'ailleurs être tracée, pour les surpressions correspondant au débit de 156 l/sec, sur la figure 7 (page 321)².

Quoi qu'il en soit, les chiffres donnés par M. Du Bois fournissent déjà de précieuses indications et l'on ne peut que l'engager à poursuivre ses expériences. Des renseignements complémentaires sur le temps et la loi de fermeture et la mesure de la pression en d'autres points de la conduite seraient fort utiles, car la détermination expérimentale du coup de béliet maximum de fermeture brusque dans une conduite à caractéristique aussi variable que celle de Fully présente un très grand intérêt.

CONCLUSION. — Un mot en terminant sur la *remarque de M. Gariel* que M. Du Bois voudrait généraliser pour justifier un retour à la méthode de Michaud.

Si l'on admet une *fermeture linéaire* de l'obturateur, le temps de fermeture total étant de τ sec, il est facile de voir que la surpression maximum est obtenue par une manœuvre partielle, celle qui, s'effectuant en un temps $2L/a$ aboutirait à la fermeture complète. On retombe alors sur la formule de Michaud.

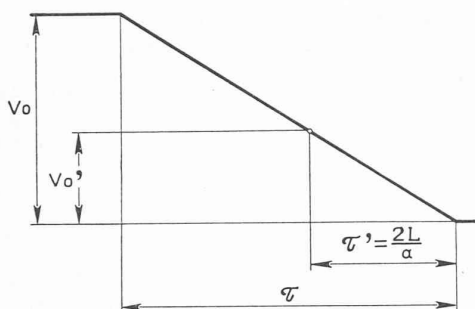
En effet, d'après la figure ci-contre

$$\frac{v'_o}{v_o} = \frac{\tau'}{\tau} = \frac{2L}{a\tau} \quad v'_o = \frac{2Lv_o}{a\tau}.$$

Introduisons cette valeur dans la formule $\Delta y'_1 = a v'_o / g$

$$\Delta y'_1 = \frac{a}{g} \frac{2Lv_o}{a\tau} = \frac{2Lv_o}{g\tau}.$$

¹ Bulletin technique du 14 novembre 1931. — ² Id. 12 décembre.



Dans ce cas très particulier d'une fermeture partielle linéaire, la vitesse de propagation a s'élimine en cours de calcul et, parce que l'influence de l'élasticité répartie le long de la conduite a disparu, la formule de Michaud est applicable.

La théorie de Michaud n'est d'ailleurs pas infirmée par celle d'Allievi, qui la contient et la dépasse, et il est naturel que dans certains cas particuliers, les résultats obtenus par ces deux méthodes soient voisins ou même coïncident. Mais si Michaud a donné, grâce à l'artifice de la chambre élastique concentrée en un point, une solution juste à certaines questions, on ne peut pas dire, comme M. DuBois qu'il ait d'emblée posé et résolu le problème correctement.

Personne ne verra dans cette affirmation une intention désobligeante à l'égard de Michaud. Dans la brillante série de chercheurs qui ont abordé l'étude du coup de bélier, la figure de Michaud est particulièrement attachante et le fait qu'il est né sur les bords du Léman n'est pas un motif suffisant pour lui refuser tout droit à la science. Mais respecter, admirer un homme et un savant est une chose ; adopter ses idées, théories ou calculs en est une autre qui n'est nullement une conséquence obligatoire de la première.

On pourrait évidemment perfectionner sa méthode en multipliant le nombre des tronçons jusqu'à la limite où chaque élément infiniment petit de conduite deviendrait sa propre chambre élastique, mais on retomberait alors sur celle d'Allievi.

En effet, Allievi a franchi le pas décisif en partant de l'hypothèse, confirmée par les faits, que l'élasticité du liquide et des parois était répartie tout le long de la conduite. Sur cette base, il a donné, en 1904, une théorie du mouvement varié de l'eau dans les conduites et en 1910 son admirable *Théorie du coup de bélier* où les lois générales du phénomène sont magistralement exposées et démontrées.

Comme toute théorie, cette dernière peut être perfectionnée pour serrer de plus près encore la réalité, mais je crois que dans toute étude sur le coup de bélier, il est plus indiqué de partir d'Allievi que de s'en passer.

Lausanne, janvier 1932.

Réponse de M. L. Du Bois.

J'ai pris connaissance avec intérêt de la note de M. le professeur P. Oguey, qui lui a été suggérée par mon étude sur la répartition du coup de bélier le long d'une conduite hydraulique.

M. Oguey m'accuse d'avoir voulu discréditer la théorie d'Allievi sur les coups de bélier : ce serait quelque peu ridicule de ma part. Je tiens en haute estime la magistrale étude de M. Allievi, comme aussi les nombreux travaux qu'elle a suscités depuis son apparition.

M. Oguey constate, comme moi, que le problème de la répartition du coup de bélier le long d'une conduite, est dans bien des cas, des plus complexes.

J'ai cherché à en donner une solution aussi simple que possible en prenant comme base des calculs, la théorie du regretté J. Michaud. Dans les comparaisons que j'ai établies, je me suis servi des conclusions du paragraphe 69 de l'ouvrage de M. D. Eydoux, or ces conclusions ne s'appliquent en effet qu'à une conduite à caractéristique unique (diamètre et épaisseur constants), cas qui se présente rarement dans la pratique. Je l'ai fait bien involontairement et sans aucune intention tendancieuse.

Le problème des conduites à caractéristiques multiples a été étudié par M. le Comte de Sparre pour le cas d'une conduite divisée en deux et en trois tronçons : les résultats auxquels il arrive sont loin d'être simples. Par exemple pour le cas d'une conduite divisée en trois tronçons ayant chacun la même durée de propagation et pour le cas $3\theta < t$, la formule à appliquer remplit, à elle seule, trois lignes dans l'ouvrage de M. Eydoux. Ce n'est pas précisément une formule simple. M. de Sparre est arrivé à des simplifications en supposant

$$\frac{l_1}{a_1} \neq \frac{l_2}{a_2} \neq \frac{l_3}{a_3}$$

Il y a donc à la base de ces calculs plusieurs hypothèses qui ne sont pas nécessairement réalisées dans les cas qui se présentent à l'ingénieur hydraulicien. Tout comme l'hypothèse d'Allievi de l'égale répartition de l'élasticité sur toute la longueur de la conduite, ne se présente que dans le cas d'une conduite à caractéristique unique.

Tout ceci montre que la solution générale du problème est loin d'être simple.

J'ai cherché à résoudre le problème aussi simplement que possible, en utilisant la théorie Michaud ; ce n'est pas une modification de cette théorie, mais une extension, un développement. Y suis-je parvenu ?

Pour l'exemple de Fully, les résultats des calculs ne concordent pas mal avec les observations. Mais, je serais enchanté de pouvoir faire d'autres vérifications.

Le problème du coup de bélier a été résolu par J. Michaud dans le cas des hypothèses simplificatrices qu'il avait admises. Depuis lors, d'autres chercheurs ont poussé le problème plus avant. Mais il est remarquable de constater que les résultats fondamentaux établis par Michaud, c'est-à-dire la valeur du coup de bélier en cas de fermeture lente, celle du coup de bélier en cas de fermeture brusque, comme aussi la valeur de la période, concordent avec les résultats obtenus par des théories beaucoup plus complètes qui ont été établies plus tard. C'est, à part le problème de la répartition du coup de bélier le long de la conduite, ce que je me suis efforcé de démontrer.

Prilly, le 23 février 1932.

L. Du Bois.

CHRONIQUE

Travaux importants en Suisse.

Les travaux de chômage et les C. F. F. Rappelons que fort sagement les Chemins de fer fédéraux n'ont pas diminué, malgré la crise, leur budget de construction. A l'heure actuelle, voici les importants travaux qui sont en cours :