

Zeitschrift: Bulletin technique de la Suisse romande
Band: 66 (1940)
Heft: 20

Artikel: Etude de quelques écoulements souterrains
Autor: Feylessoufi, E.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-50669>

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: 21.12.2024

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

BULLETIN TECHNIQUE

DE LA SUISSE ROMANDE

Paraissant tous les 15 jours

ABONNEMENTS :

Suisse : 1 an, 12 francs
Etranger : 14 francs

Pour sociétaires :

Suisse : 1 an, 10 francs
Etranger : 12 francs

Prix du numéro :

75 centimes.

Pour les abonnements
s'adresser à la librairie
F. Rouge & C^{ie}, à Lausanne.

Organe de la Société suisse des ingénieurs et des architectes, des Sociétés vaudoise et genevoise des ingénieurs et des architectes, de l'Association des anciens élèves de l'École d'ingénieurs de l'Université de Lausanne et des Groupes romands des anciens élèves de l'École polytechnique fédérale. —

COMITÉ DE PATRONAGE. — Président: R. NEESER, ingénieur, à Genève; Vice-président: M. IMER, à Genève; secrétaire: J. CALAME, ingénieur, à Genève. Membres: *Fribourg*: MM. L. HERTLING, architecte; A. ROSSIER, ingénieur; *Vaud*: MM. F. CHENAUX, ingénieur; E. ELSKES, ingénieur; EPITAUX, architecte; E. JOST, architecte; A. PARIS, ingénieur; CH. THÉVENAZ, architecte; *Genève*: MM. L. ARCHINARD, ingénieur; E. ODIER, architecte; CH. WEIBEL, architecte; *Neuchâtel*: MM. J. BÉGUIN, architecte; R. GUYE, ingénieur; A. MÉAN, ingénieur cantonal; *Valais*: M. J. DUBUIS, ingénieur; A. DE KALBERMATTEN, architecte.

RÉDACTION: D. BONNARD, ingénieur, Case postale Chauderon 475, LAUSANNE.

ANNONCES

Le millimètre sur 1 colonne,
largeur 47 mm :
20 centimes.

Rabais pour annonces
répétées.

Tarif spécial
pour fractions de pages.

Fermage des annonces :
Annonces Suisses S. A.
8, Rue Centrale (Pl. Pépinet)
Lausanne

CONSEIL D'ADMINISTRATION DE LA SOCIÉTÉ ANONYME DU BULLETIN TECHNIQUE
A. STUCKY, ingénieur, président; M. BRIDEL; G. EPITAUX, architecte; M. IMER.

SOMMAIRE : *Etude de quelques écoulements souterrains* (suite et fin), par M. E. FEYLESSOUFI, ingénieur. — *La carrière d'ingénieur*. — *Société suisse des ingénieurs et des architectes: Rapport de gestion de l'année 1939*. — *Groupe professionnel des architectes pour les relations internationales: Des livres pour les architectes et ingénieurs prisonniers de guerre*. — *NÉCROLOGIE: Roger Chavannes, ingénieur*. — *BIBLIOGRAPHIE*. — *COMMUNIQUÉ*. — *SERVICE DE PLACEMENT*.

Etude de quelques écoulements souterrains,

par E. FEYLESSOUFI, ingénieur.

(Suite et fin)¹.

§ ESSAIS SUR MODÈLE (suite).

Méthode semi-graphique de détermination du débit.

En partant de quelques lignes de courant observées en laboratoire et d'une équipotentielle connue, à la limite par exemple, par application de la méthode graphique de Prasil, on détermine le champ de l'écoulement (lignes de courant et lignes équipotentielles). La figure 7 est l'image d'un tel champ pour $\alpha = 0,5$.

On sait par ailleurs que le débit d'un tube de courant de largeur unité est

$$\Delta q = \Delta l \cdot v = K \frac{\Delta F}{\Delta S} \Delta l = K \Delta F \frac{\Delta l}{\Delta S}$$

Si m est le nombre de tubes de courant de même débit et n le nombre d'éléments de différence de potentiel ΔF contenus dans la différence de charge ΔH , $n = \frac{\Delta H}{\Delta F}$ le débit total est :

$$Q = K \Delta H \cdot \frac{m}{n} \cdot \frac{\Delta l}{\Delta S} = \mu K \Delta H.$$

On constate que le débit Q pour une bande de même largeur est proportionnel à K et H et à un coefficient sans dimensions qui ne dépend que de la forme du champ d'écoulement, et non de ses dimensions. En effet si l'on change l'échelle des longueurs, le rapport $\frac{\Delta l}{\Delta S}$ de chaque

élément restera le même pour les mêmes valeurs de m et de n .

Cette propriété du débit de l'écoulement souterrain paraît paradoxale, à première vue.

A l'examen, toutefois, cela se justifie aisément, car si K et H restent constants, les vitesses et les sections d'écoulement varient en raison inverse l'une de l'autre par rapport aux variations des longueurs, de sorte que

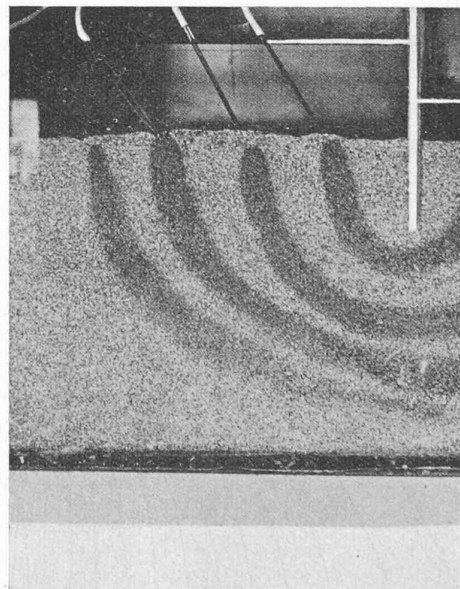


Fig. 8. — Apparition des lignes de courant sur le modèle par coloration des filets avec de la couleur d'aniline.

¹ Voir *Bulletin technique* du 21 septembre 1940.

les débits qui sont proportionnels aux produits des vitesses par les sections sont invariables.

La recherche du débit d'un écoulement revient donc à déterminer le coefficient $\mu = \frac{Q}{K\Delta H}$ dépendant de la forme de champ d'écoulement.

Les résultats du calcul du débit par cette méthode semi-graphique, et pour les mêmes cas que ceux traités analytiquement ont été consignés à la ligne 9 du tableau récapitulatif de la page 202 (B. T. du 21 septembre 1940)

§ 4. COMPARAISON DES RÉSULTATS ANALYTIQUES ET EXPÉRIMENTAUX.

1. Comparaison des débits.

Pour établir cette comparaison nous avons reporté dans le tableau récapitulatif (page 202 du B. T. du 21 septembre 1940) tous les résultats obtenus tant par voie analytique que par voie expérimentale. Nous avons également représenté graphiquement ces résultats dans le graphique de la figure 9.

Cette comparaison nous permet de tirer les conclusions suivantes :

La première solution, celle dans laquelle on admet que les lignes de courant sont hyperboliques, donne les valeurs les plus rapprochées de l'expérience. On constate que les écarts ne dépassent guère plus de + 8,3 %. Les deuxième et troisième solutions au contraire, donnent des résultats beaucoup moins satisfaisants. On obtient toujours des débits beaucoup trop faibles. Nous avons cherché les raisons de ces différences ; c'est dans l'examen de la forme des lignes de courant qu'on en trouvera une explication.

Formes des lignes de courant.

Sur chacune des représentations graphiques des champs d'écoulement correspondant aux diverses solutions approchées, nous avons figuré en pointillé les lignes de courant observées. On constate que la première solu-

tion à filets hyperboliques donne la meilleure image de ce que révèle l'expérience, en tous cas au droit de la paroi, dans la région des grandes vitesses. Les lignes de courant sont plutôt aplaties au-dessous de la palplanche et non pas fortement courbées comme dans les cas des solutions 2 et 3. Ce fait est particulièrement frappant dans les représentations de la figure 2 (B. T. du 21 septembre 1940) où l'on constate que les filets de courant observés coïncident à peu près parfaitement avec les filets de courant calculés.

Si l'on compare entre elles les trois solutions analytiques (fig. 10), on constate que chacune d'elles représente un champ d'écoulement bien défini. La première solution donne rigoureusement le champ d'écoulement qui se produirait dans un solide perméable homogène limité par l'équipotentielle extrême. Dans ce cas, notre solution néglige les pertes de charge des éléments de tube de courant compris entre la surface du sol horizontal et l'ellipse équipotentielle limite.

On voit que pour la deuxième solution le champ d'écoulement est limité à l'ellipse ligne de courant limite tangente à la couche imperméable au-dessous de la palplanche. Les formes des lignes de courant diffèrent manifestement de celles obtenues par expérience (fig. 3).

La troisième solution correspond à un écoulement s'effectuant à travers un massif limité d'une part par l'équipotentielle de surface et d'autre part par la ligne de courant tangente à la couche perméable. Dans ce cas, on constate que les lignes de courant observées diffèrent également beaucoup des lignes de courant calculées, alors même que l'approximation est meilleure que dans la deuxième solution (fig. 4).

Répartition des vitesses sous la paroi.

Les différences entre les coefficients de débit obtenus dans chacune des solutions analytiques approchées et par les essais s'expliquent clairement si l'on étudie la répartition des vitesses sous les palplanches. Sur les

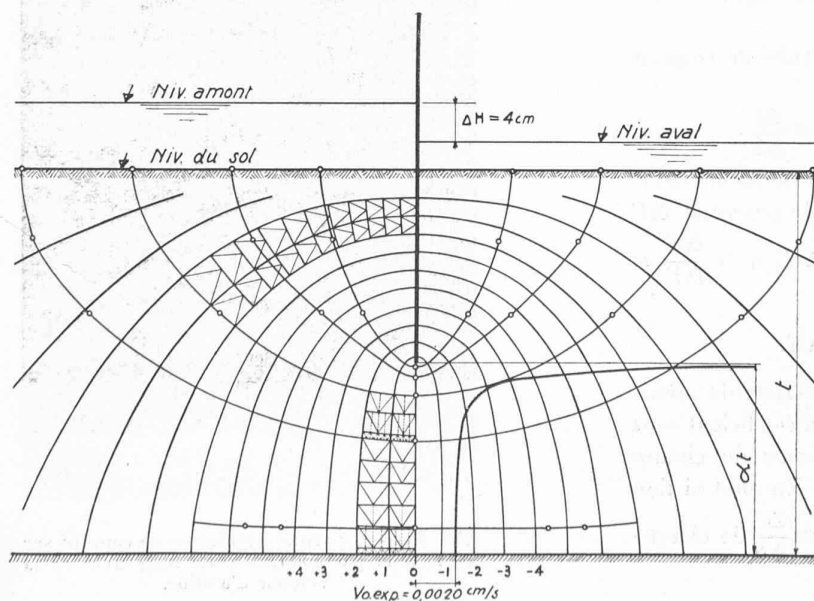


Fig. 7. — Image du champ d'écoulement obtenu par la méthode graphique de Prasil en prenant pour base quelques lignes de courant relevées sur modèle réduit.

Largeur du chenal : 30 cm
 $K = 0,036 \text{ cm}^2/\text{sec} \cdot \alpha = 0,5$
 Débit mesuré : $2,545 \text{ cm}^3/\text{sec}$
 Débit calculé graphiquement :
 $2,545 \text{ cm}^3/\text{sec}$
 Débit calculé (1^{re} solution approchée) :
 $2,545 \text{ cm}^3/\text{sec} \cdot \text{Ecart} : 0 \%$

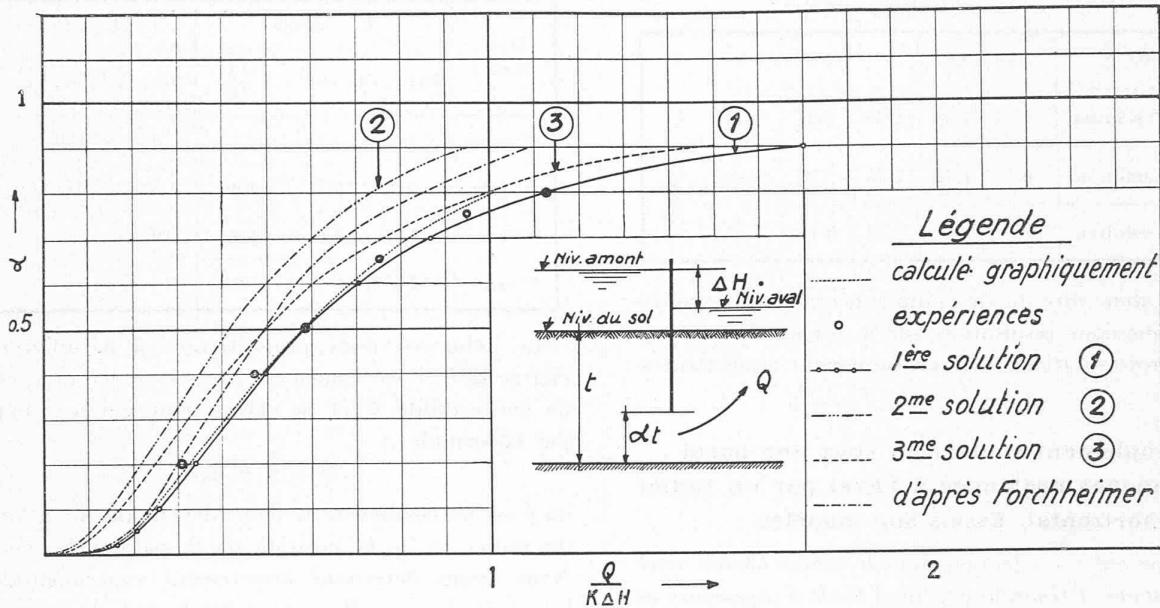


Fig. 9. — Débits obtenus par les diverses méthodes et par l'expérience en fonction du degré d'enfoncement des palplanches.

graphiques représentatifs des champs d'écoulement (fig. 2, 3 et 4), on a représenté les diagrammes des vitesses en choisissant comme unité la vitesse v_0 au contact de la couche imperméable.

On constate en comparant ces figures que c'est la première solution qui donne les valeurs v_0 se rapprochant le plus de celles fournies par l'expérience, ainsi que le prouve le tableau suivant :

Vitesses v_0 en cm/s sous les palplanches, au niveau de la couche imperméable.

pour $\Delta H = 4$ cm $K = 0,036$ cm/sec $t = 40$ cm

α	Expériences	1 ^{re} solution	2 ^e solution	3 ^e solution
0.1	—	0.006	—	0.003
0.2	0.0038	—	0.001908	—
0.5	0.0020	0.0027	0.00133	0.0018
0.8	0.0027	0.0032	—	—
0.9	—	—	0.00152	0.003

On voit que les valeurs de v_0 dans les deuxième et troisième solutions sont inférieures à ce que donne la première solution et l'expérience.

En outre la première solution donne une répartition des vitesses sous le rideau des palplanches plus conforme à la réalité.

Pressions sur la paroi.

Cette pression varie de 4 cm d'eau au niveau du sol à 0 à la base de la palplanche. On trouve sensiblement la même répartition des pressions quelle que soit la solution approchée envisagée, ainsi que le montre le tableau ci-dessous, établi pour le cas de $\alpha = 0,5$ et $\Delta H = 4$ cm.

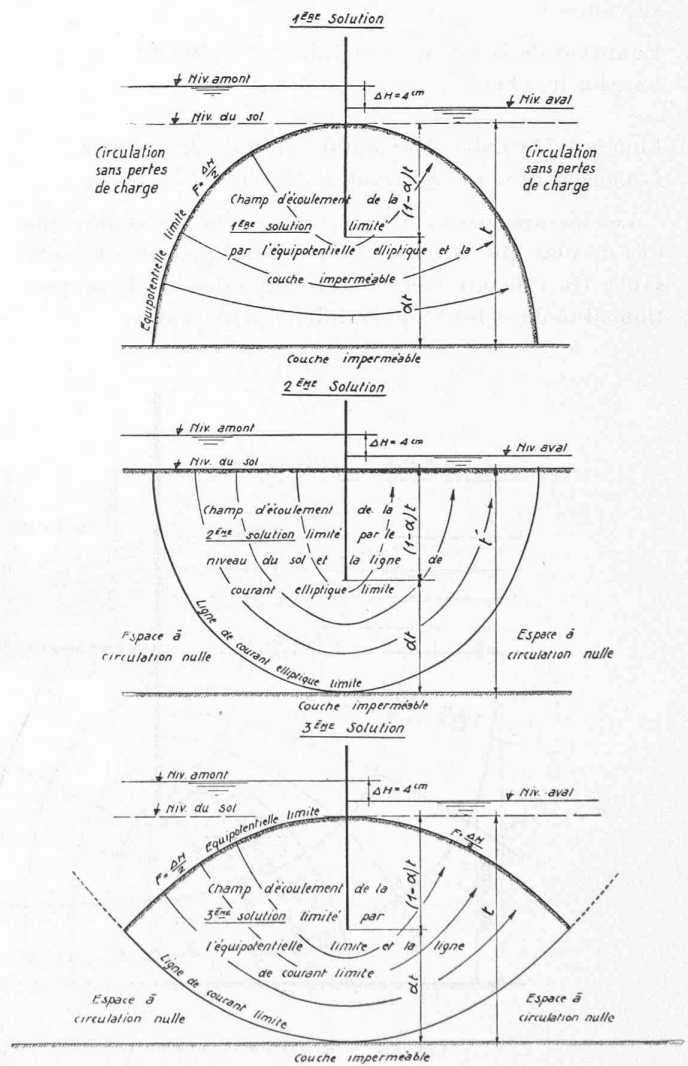


Fig. 10. — Schémas montrant les hypothèses faites dans l'application des trois méthodes analytiques examinées.

Pression contre les palplanches.

Niveaux $\frac{x}{l}$		0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
Pression en cm d'eau	1 ^{re} solution	0	1,88	2,64	3,2	3,6	4
	2 ^e solution	0	1,62	2,36	2,92	3,48	4
	3 ^e solution	0	1,8	2,52	3,10	3,58	4

On peut donc dire qu'en ce qui concerne la détermination des pressions résultantes sur le rideau de palplanches, les trois solutions sont pratiquement équivalentes.

II. Ecoulement souterrain sous une paroi de palplanches prolongée à l'aval par un radier horizontal. Essais sur modèles.

Ces essais ont été effectués dans le même chenal vitré du *Laboratoire d'Hydraulique* de l'École d'ingénieurs de Lausanne que les expériences relatives au rideau simple de palplanches. Les caractéristiques du modèle furent les suivantes :

Epaisseur de la couche perméable : $t = 40$ cm.
 Largeur du chenal $l = 30$ cm.
 $\alpha = 0,5$

Longueur du radier horizontal : 1^{er} cas $L = 40$ cm.
 Longueur du radier horizontal : 2^e cas $L = 80$ cm.

Les mesures des débits nous ont permis de vérifier une fois de plus que la loi de Darcy était applicable à notre sable. On constate bien au tableau ci-dessous la proportionnalité du débit et de la différence de charge.

Désignation	$L = 40$ cm			$L = 80$ cm		
	ΔH cm	Q' cm ³ /s	$\frac{\Delta H}{Q'}$	ΔH cm	Q' cm ³ /s	$\frac{\Delta H}{Q'}$
1 ^{re} série	3.5	1.75	2	3.5	1.35	2.59
2 ^e série	6.9	3.7	1.86	6.9	2.6	2.65
3 ^e série	10.9	5.6	1.96	10.9	4.3	2.53
4 ^e série	17.6	9.3	1.89	—	—	—

Le débit est donc proportionnel à la différence de charge ΔH ; il est également proportionnel au coefficient de perméabilité K et sa valeur pourra donc s'exprimer par la formule

$$Q = \beta \cdot K \cdot \Delta H.$$

où β est un coefficient de débit dépendant de la longueur du radier et de la position de la palplanche verticale. Nous avons déterminé directement expérimentalement la valeur de ce coefficient en fonction de la longueur du radier.

Les résultats de ces mesures au modèle pour les cas particuliers de $\alpha = 0,5$ et $L = t$ et $2t$ sont donnés à la troisième ligne du tableau ci-dessous.

L	0	t	$2t$
$\frac{Q}{K\Delta H}$ graphique	0.59	0.465	0.355
$\frac{Q}{K\Delta H}$ expérience	0.59	0.475	0.365

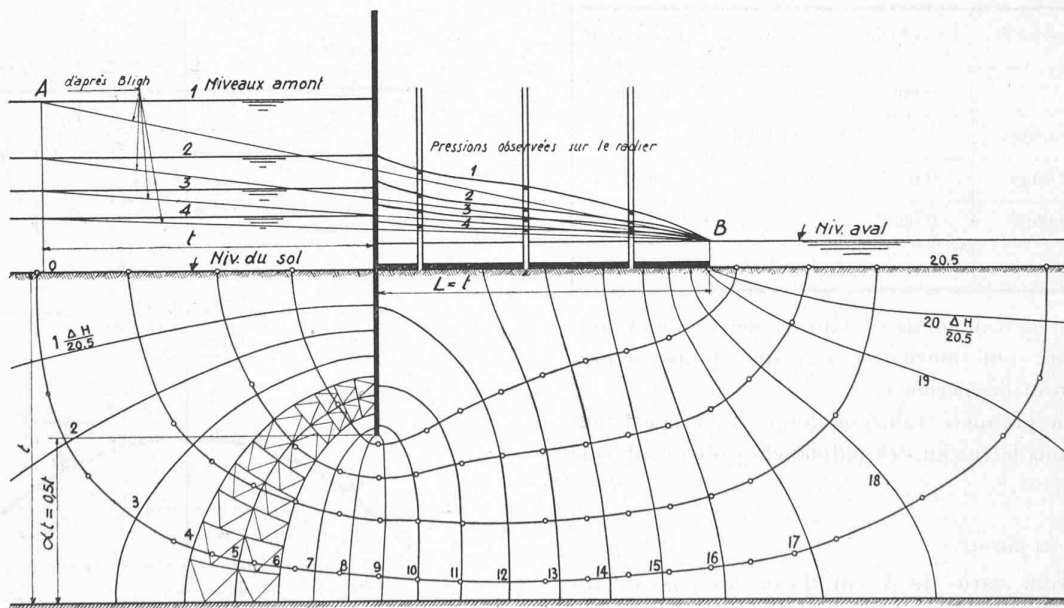


Fig. 11. — Ecoulement sous un rideau de palplanches avec radier aval de longueur égale à t . Lignes de courant observées en laboratoire.

Largeur du chenal : 30 cm . $K = 0,036$ cm/sec . $\alpha = 0,5$.
 Débit mesuré : 5,6 cm³/sec . Débit calculé graphiquement 5,5 cm³/sec Ecart : - 1,8 %.

Comme dans le cas de la palplanche seule, il est possible de tracer les lignes de courant et les équipotentielles en appliquant la méthode de Prasil et en partant de deux lignes de courant observées ; ces champs d'écoulement pour $\alpha = 0,5$ et pour les deux valeurs de $L = t$ et $L = 2t$ sont reportés sur les figures 11 et 12.

On peut ainsi, par application de la méthode semi-graphique calculer les débits. Les valeurs trouvées par ce procédé sont notées à la ligne 2 du tableau ci-dessus. On voit que l'écart entre les mesures aux modèles et les résultats du procédé semi-graphique varie de 0 à 2,7 % dans les cas que nous avons envisagés.

Nous avons en outre mesuré les sous-pressions agissant aux divers points du radier et comparé les résultats de ces observations avec les chiffres obtenus par la méthode de Bligh généralement appliquée.

Il résulte de l'examen du tableau ci-dessous que pour les deux cas étudiés les sous-pressions se montrèrent nettement plus grandes que ne l'aurait laissé prévoir l'application de la loi simplifiée de Bligh. Dans ce tableau récapitulatif d désigne la distance entre le rideau de palplanches et le point de mesure (tube piézométrique), h les sous-pressions en cm d'eau.

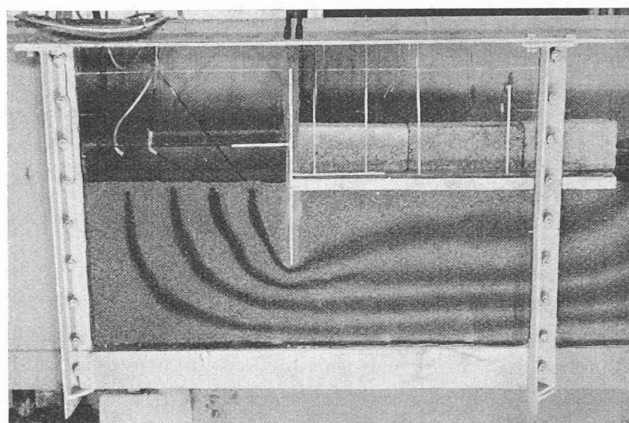


Fig. 13. — Paroi de palplanches avec radier aval. Apparition au modèle des lignes de courant par coloration à l'aniline de quelques filets.

III. Conclusions.

1. Le champ d'écoulement sous une paroi simple de palplanches peut être représenté en première approximation en adoptant un tracé hyperbolique des lignes de courant ; les hyperboles sont homofocales et de foyer situé à la base de la palplanche.

Leur axe non transverse coïncide avec la couche imperméable. Les formes des lignes de courant observées diffèrent assez peu de celles résultant de cette hypothèse. Les écarts entre les débits mesurés et ceux calculés sur la base de cette hypothèse des filets hyperboliques sont petits et ne dépassent pas + 8,3 %.

Les autres solutions approchées envisagées supposant les lignes de courant elliptiques ou assimilant

d en cm	$\Delta H = 3.5$ cm			$\Delta H = 6.9$ cm			$\Delta H = 10.9$ cm			$H\Delta = 17,6$ cm		
	h observé en cm	h Bligh en cm	Ecart en %	h observé en cm	h Bligh en cm	Ecart en %	h observé en cm	h Bligh en cm	Ecart en %	h observé en cm	h Bligh en cm	Ecart en %
5.4	5.4	4.8	-11	7.2	6.2	-13.8	9.2	8.0	-13	12	11	-8.3
18	4.8	4.2	-12.5	6	5.2	-13.3	7.4	6.2	-13.2	10	8	-20
30.5	4.4	3.8	-13.6	5.2	4	-23	5.8	4.6	-20	7	5.4	-23
40	3.1	3.1	0	3.1	3.1	0	3.1	3.1	0	3.1	3.1	0

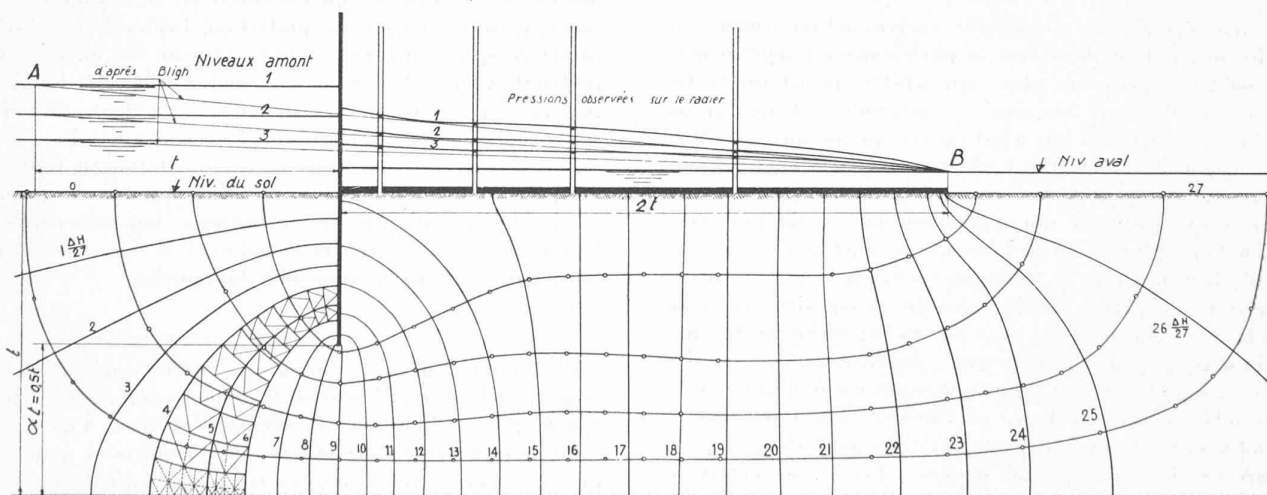


Fig. 12. — Ecoulement sous un rideau de palplanches avec radier aval de longueur égale à $2t$. Lignes de courant observées en laboratoire.

Largeur du chenal : 30 cm . $K = 0,036$ cm³/sec . $\alpha = 0,5$.
Débit mesuré : 4,3 cm³/sec . Débit calculé graphiquement : 4,2 cm³/sec . Ecart : - 2.3 %.

l'écoulement à l'écoulement hydrodynamique autour d'une pointe, sont moins satisfaisantes.

2. La méthode semi-graphique, d'après laquelle au moyen d'une construction semblable à celle de Prasil on détermine le champ d'écoulement en partant de deux filets soigneusement observés, donne de bons résultats ; les débits mesurés et calculés coïncident d'une façon satisfaisante. Nous avons appliqué cette méthode tant au cas des palplanches seules, qu'à celui où les palplanches étaient prolongées par un radier horizontal.

3. L'influence du radier horizontal à l'aval des palplanches se traduit par une forte diminution du débit, à cause de la plus grande longueur de terrain à traverser par l'eau. C'est ainsi que si l'on place un radier dont la longueur est égale à la profondeur de la couche perméable, pour $\alpha = 0,5$, le coefficient de débit est tombé de 0,59 à 0,465. Si la longueur du radier double, le coefficient de débit diminue encore de 0,465 à 0,355.

4. La détermination expérimentale des sous-pressions nous a permis de constater que dans les cas considérés, la loi de Bligh qui suppose que la perte de charge se répartit uniquement sur le filet limite contournant la base des ouvrages, donne des sous-pressions trop faibles.

La carrière d'ingénieur.

M. Armand Circé, directeur des études à l'École polytechnique de Montréal, a publié sous ce titre dans la Revue trimestrielle canadienne de juin 1940 un article dont nous tirons les lignes qui suivent. Nos lecteurs ont eu déjà l'occasion d'apprécier la perspicacité avec laquelle M. Circé traite de tels sujets¹. On ne saurait retirer avec plus d'à-propos le voile qui, trop souvent, cache aux yeux du public et des ingénieurs eux-mêmes leur vraie personnalité et le rôle qu'ils jouent ou mériteraient de jouer dans la société actuelle, pour autant qu'ils veuillent bien attacher à leur éducation et à leur formation le temps et les soins qu'il convient. (Réd.)

PRÉAMBULE.

A une époque où l'ingénieur exerce indirectement, sur l'ordre social et sur le régime de notre existence quotidienne, une influence peut-être plus considérable qu'à toute autre période de l'histoire humaine, on rencontre un très grand nombre de personnes qui n'ont encore qu'une idée extrêmement vague de l'importance du rôle dévolu à celui qui, en somme, est à la base de la civilisation moderne. Pareille anomalie trouve peut-être son explication dans la nature même de fonctions qui retiennent leurs desservants loin de la foule afin de leur procurer le calme nécessaire à la concentration d'esprit et de pensée qu'elles exigent. L'ingénieur travaille sans bruit et sans phrases. Dans les laboratoires de recherches ou d'essais, le public pénètre peu ; dans les usines, l'ouvrier répète des gestes et des opérations concourant à une œuvre d'ensemble, conçue, élaborée et calculée dans des bureaux d'études où il ne s'aventure pas ; en des régions éloignées, sur le parcours des rivières et des fleuves, à l'écart des centres de peuplement, sont édifiés de grands ouvrages d'art que voient rarement les populations qui en bénéficient. Bien peu des travaux de l'ingénieur et du savant intéressent la publicité

¹ Voir *Bulletin technique* des 23 mars et 6 avril 1940, p. 66 et 80.

tapageuse, qui veut une action sensationnelle et propre à frapper l'esprit populaire.

Des activités de certaines classes de professionnels, le peuple se fait une idée tangible, souvent vécue, et qui le satisfait. Ainsi, il est rare que le citoyen ordinaire, ou l'un de ses parents ou amis, n'ait pas été partie à quelque litige le mettant en présence des hommes de loi et lui faisant voir d'assez près le fonctionnement du rouage judiciaire pour qu'il en puisse apprécier l'efficacité et la valeur. Ses rapports avec les praticiens de la science médicale sont de telle nature qu'il lui est impossible de ne pas garder une impression bien nette et quelquefois douloureuse de cette fréquentation. L'idée qu'il se fait du champ d'action de ces professionnels n'est peut-être pas toujours très complète, mais il est quand même assez renseigné sur la nature de leurs attributions pour se libérer des doutes et des imprécisions qui embarrassent son jugement lorsqu'il veut évaluer le rôle de l'ingénieur.

Dans l'exercice de sa profession, ce dernier touche peu l'imagination populaire. Il travaille généralement avec des collègues parlant comme lui un langage technique inconnu du profane. Son art est strictement utilitaire, fait appel au raisonnement mathématique et bannit toute réaction émotive. Aussi, le monde journalistique ne lui accorde-t-il qu'une attention médiocre ; il ne reçoit pas d'éclaircissement publicitaire, et le compte rendu de ses travaux scientifiques ou de ses réalisations techniques occupe dans les journaux à grand tirage une place inférieure à celle de la femme à barbe ou du dernier attentat aux mœurs. Lorsqu'on veut bien lui consacrer quelques lignes, c'est généralement pour ajouter à la confusion habituelle en l'assimilant au mécanicien de locomotive ou au chauffeur de fournaise.

Il n'est donc pas étonnant que, dans ces conditions, le public éprouve parfois le besoin d'une appréciation plus juste des fonctions de ce professionnel dont il entrevoit tout de même confusément et instinctivement l'action dans tout ce qui l'entoure, dans son habitation, dans ses établissements industriels, dans son confort matériel, et qu'il cherche de plus en plus à savoir « ce que c'est que l'ingénieur ».

C'est pour répondre à ce besoin que les lignes qui suivent ont été écrites. Les élèves de l'enseignement secondaire, qui en prendront connaissance, y trouveront peut-être quelque assistance dans le choix de leur vocation, et s'ils ont déjà des préférences pour la carrière d'ingénieur, jugeront plus facilement s'ils possèdent les qualifications et la mentalité nécessaires au succès dans cette profession. Les indications sur le caractère spécial du travail de l'ingénieur, les qualités désirables chez lui, la formation scientifique requise et les opportunités offertes, pourront les guider vers un choix raisonné et raisonnable plutôt qu'impulsif et sentimental. Les conséquences d'une décision hâtive dans l'orientation de toute une vie peuvent être irréparables, et, s'il contribue à renforcer l'idée que l'attention la plus minutieuse doit être portée au besoin de direction du jeune homme à la fin de ses études secondaires, cet article sera mille fois justifié.

CE QU'EST L'INGÉNIEUR.

Pour obtenir une conception concrète et simplement physique du rôle de l'ingénieur et de la place qu'il occupe dans le développement industriel, économique et social d'un pays, il suffit de regarder autour de soi et de considérer ce qu'il resterait des signes extérieurs de notre civilisation actuelle si l'on en supprimait ce qui est attribuable à l'ingénieur. Sa contribution la plus évidente au progrès humain apparaît à l'énumération de tout ce qui, au cours des âges, a amélioré le confort matériel de l'homme. Du seul point de vue scientifique, tech-