

Zeitschrift: Bulletin technique de la Suisse romande
Band: 66 (1940)
Heft: 19

Artikel: Etude de quelques écoulements souterrains
Autor: [s.n.]
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-50667>

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: 26.01.2026

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.

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

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'Ecole d'ingénieurs de l'Université de Lausanne et des Groupes romands des anciens élèves de l'Ecole 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.

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*, par M. E. FEYLESSOUFI, ingénieur. — *Restrictions et économies dans le domaine de l'énergie*, par M. ED. DELLEY, ingénieur, Fribourg. — *Société suisse des ingénieurs et des architectes : Communiqué du Comité central*. — *Société vaudoise des ingénieurs et des architectes : Commission des occasions de travail*. — *Conférences relatives à la corrosion*. — SERVICE DE PLACEMENT.

Etude de quelques écoulements souterrains.

Nous donnons ici un abrégé du texte et les conclusions d'un travail que vient d'achever au Laboratoire d'hydraulique de l'Ecole d'ingénieurs de Lausanne M. E. Feylessoufi, ingénieur.

L'objet de cette étude était d'examiner de manière détaillée le problème particulier de l'écoulement de l'eau sous un rideau de palplanches à travers un terrain perméable homogène, et de chercher à déterminer soit par voie mathématique, soit par voie expérimentale, l'importance du débit suivant les positions relatives du rideau et du sous-sol imperméable.

L'auteur fut en outre amené à compléter ses recherches par l'examen du cas où la paroi de palplanches est liée à l'aval à un radier bétonné plus ou moins long.

(Réd.)

I. Ecoulement sous une paroi de palplanches.

§ 1. EXPOSÉ DU PROBLÈME.

Dans une couche de terrain perméable homogène d'épaisseur constante t est enfoncée une paroi de palplanches verticale ; les palplanches n'atteignent pas la couche perméable sous-jacente et s'arrêtent à une certaine hauteur au-dessus de celle-ci égale à at . De part et d'autre de la paroi de palplanches le niveau de l'eau n'atteint pas la même cote et la différence est maintenue constante et égale à ΔH (fig. 1).

Nous nous proposons d'étudier le champ de l'écoulement qui s'établit sous les palplanches et en particulier de déterminer les lignes de courant, les débits, les vitesses et les pressions. On constate que cet écoulement possède une *symétrie géométrique* ; les lignes de courant et les lignes équipotentielles sont symétriques par rapport à un axe confondu avec la paroi de palplanches. Les vitesses ne possèdent pas cette symétrie totale, leurs vecteurs sont anti-symétriques, c'est-à-dire ont la même intensité, des supports symétriques, mais sont de directions opposées.

Les conditions aux limites de l'écoulement défini ci-dessus sont les suivantes :

1. *Les filets de courant sont normaux* à la surface du sol. Cette dernière correspond donc à une ligne équipotentielle de l'écoulement.

2. *Le long de la paroi de palplanches les filets de courant sont parallèles* et contournent brusquement la paroi à sa base. La paroi est donc une *ligne de courant limite*.

3. Les filets de courant immédiatement voisins de la couche imperméable lui sont également parallèles ; cette couche est donc aussi une *ligne de courant limite*.

La solution mathématique rigoureuse du problème, satisfaisant aux conditions énoncées ci-dessus, ne peut être donnée. Nous proposerons diverses solutions approchées dont nous étudierons les propriétés. Nous confronterons ensuite les résultats ainsi obtenus avec ceux donnés par l'expérience.

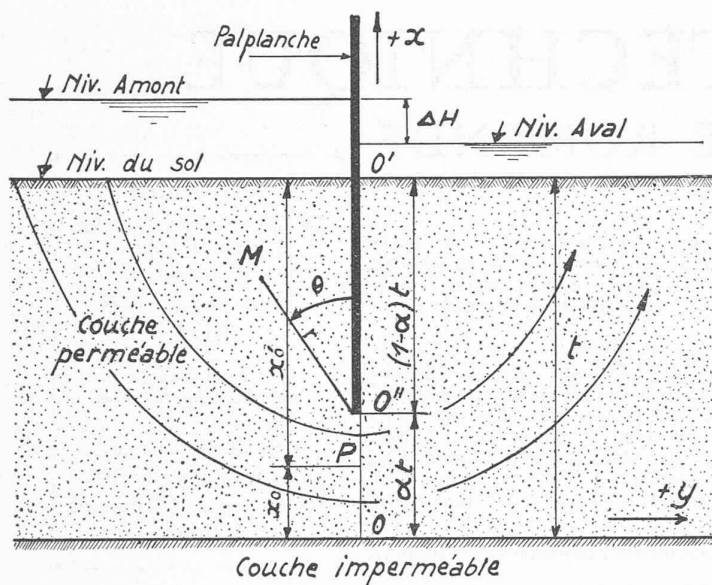


Fig. 1.

§ 2. ENUMÉRATION DES SOLUTIONS MATHÉMATIQUES APPROCHÉES ENVISAGÉES.

Première solution approchée.

Dans cette solution, nous admettons que les lignes de courant sont des hyperboles homofocales dont le foyer est situé à la base O'' de la palplanche et le centre en O (fig. 1).

L'axe transverse de ces hyperboles passe par la paroi de palplanche et l'autre axe est confondu avec la limite supérieure de la couche imperméable.

Les lignes équipotentiels orthogonales de ces hyperboles sont des ellipses homofocales, de même foyer O'' .

En tenant compte des désignations de la figure 1, les équations paramétriques de ces deux familles de courbes sont :

$$(1) \quad \begin{cases} x = at \operatorname{ch} \varphi \cos \psi \\ y = at \operatorname{sh} \varphi \sin \psi \end{cases}$$

En supposant $\varphi = \text{constante}$ et ψ variable, le point (x, y) défini par les équations (1) décrit une ligne équipotentielle.

Si $\psi = \text{constante}$, ce même point suit une ligne de courant. On définit le potentiel $F(x, y)$ en posant :

$$(2) \quad \begin{cases} \varphi = \frac{2F}{\Delta H} \operatorname{arg ch} \frac{1}{\alpha} \\ \psi = \arccos \frac{x_0}{at} \end{cases}$$

et en tenant compte des équations (1), on définit complètement la fonction F . Pour $\psi = 0$, on obtient la ligne de courant limite suivant la paroi de palplanche et pour

$\psi = \frac{\pi}{2}$ on trouve la ligne de courant inférieure confondue avec la couche imperméable.

Pour $\varphi = \frac{\Delta H}{2}$, on trouve la ligne équipotentielle supérieure coupant la paroi de palplanche au niveau du sol, tandis que pour $\varphi = 0$ on a l'ellipse évanouissante correspondant à l'équipotentielle axiale sous la paroi de palplanche.

En partant des équations (1) et (2), on peut calculer la vitesse de l'écoulement en un point quelconque d'après l'équation fondamentale

$$(3) \quad V = K \sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial y}\right)^2}$$

En calculant $\frac{\partial F}{\partial x}$ et $\frac{\partial F}{\partial y}$, on trouve :

$$\frac{\partial F}{\partial x} = \frac{\Delta H}{2} \cdot \frac{1}{\operatorname{arg ch} \frac{1}{\alpha}} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial x} = \frac{\Delta H}{2} \cdot \frac{1}{\operatorname{arg ch} \frac{1}{\alpha}} \cdot \frac{\cos \psi \operatorname{sh} \varphi}{at(\operatorname{sh}^2 \varphi \cos^2 \psi + \sin^2 \psi \operatorname{ch}^2 \varphi)}$$

$$\frac{\partial F}{\partial y} = \frac{\Delta H}{2} \cdot \frac{1}{\operatorname{arg ch} \frac{1}{\alpha}} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial y} = \frac{\Delta H}{2} \cdot \frac{1}{\operatorname{arg ch} \frac{1}{\alpha}} \cdot \frac{\sin \psi \operatorname{ch} \varphi}{at(\operatorname{sh}^2 \varphi \cos^2 \psi + \sin^2 \psi \operatorname{ch}^2 \varphi)}$$

d'où :

$$(4) \quad V = \frac{K \Delta H}{2at} \cdot \frac{1}{\operatorname{arg ch} \frac{1}{\alpha}} \cdot \frac{1}{\sqrt{\operatorname{sh}^2 \varphi + \sin^2 \psi}}$$

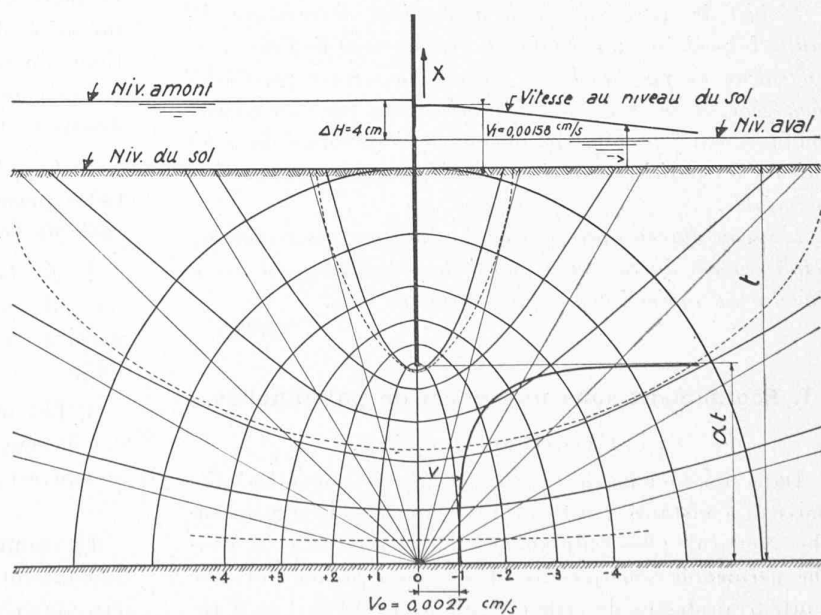


Fig. 2. — Ecoulement sous un rideau de palplanche. Première solution : lignes de courant hyperboliques. En pointillé lignes observées au modèle.

Largeur du chenal : 30 cm. $K = 0,036$ cm/sec. $\alpha = 0,5$.
Débit mesuré : 2,545 cm³/sec. Débit calculé : 2,545 cm³/sec. Ecart 0 %.

On a ainsi la vitesse en fonction de la différence de charge ΔH et des données géométriques qui déterminent complètement l'écoulement.

Sous la palplanche, la vitesse s'obtient en faisant $\varphi = 0$; en tenant compte des équations (2) on a :

$$(5) \quad v = \frac{K\Delta H}{2at} \cdot \frac{1}{\arg \operatorname{ch} \frac{1}{\alpha}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{x_0}{at}\right)^2}}.$$

La vitesse au-dessus de la couche imperméable s'obtient en faisant $x_0 = 0$ dans la formule (5); on a :

$$(6) \quad v = v_0 = \frac{K\Delta H}{2at} \cdot \frac{1}{\arg \operatorname{ch} \frac{1}{\alpha}}.$$

L'examen de l'expression (6) montre que la vitesse v_0 au contact de la couche imperméable est invariable si ΔH et t varient proportionnellement. On voit donc que cette vitesse est indépendante de l'échelle; elle ne dépend que du coefficient de perméabilité K et de la position de la base de la palplanche par rapport à l'épaisseur de la couche imperméable.

Dans l'équation (5) on peut exprimer v en fonction de v_0 et on obtient :

$$(7) \quad \frac{v}{v_0} = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{x}{at}\right)^2}}.$$

Dans le champ d'écoulement hyperbolique, la répartition des vitesses sous la palplanche, en fonction de la vitesse v_0 , est indépendante des données de l'écoulement.

A l'aide des équations (6) et (7), on peut tracer des graphiques qui permettent de calculer les vitesses dans un cas quelconque, soit :

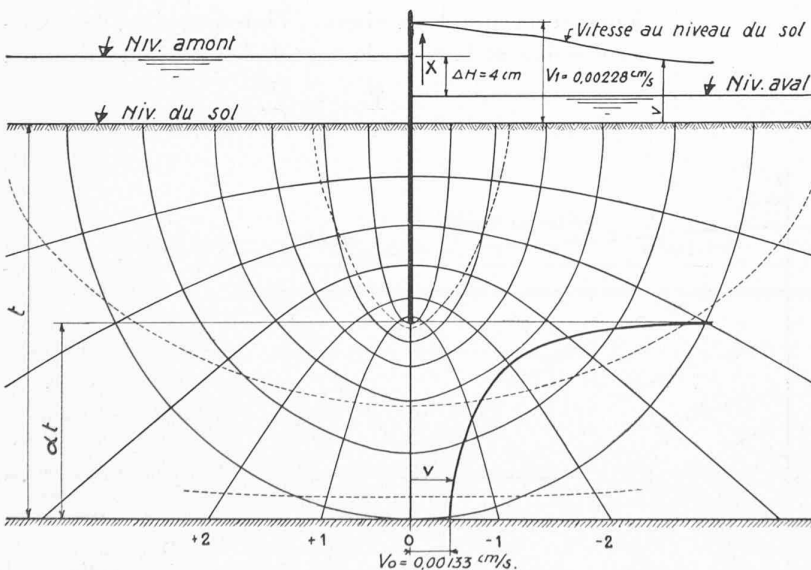


Fig. 3. — Ecoulement sous un rideau de palplanches. Deuxième solution : lignes de courant elliptiques. En pointillé lignes observées au modèle.

Largeur du chenal : 30 cm. $K = 0,036$ cm/sec. $\alpha = 0,5$.
Débit mesuré : 2,545 cm³/sec. Débit calculé : 1,81 cm³/sec. Ecart : — 25 %.

$$\frac{v_0}{K \frac{\Delta H}{t}} = f_2(\alpha) \text{ et } \frac{v}{v_0} = f_1\left(\frac{x}{at}\right).$$

La valeur du débit est donnée par l'expression suivante :

$$(8) \quad Q = \int_{x=0}^{x=at} v dx = K\Delta H \cdot \frac{\pi}{4} \cdot \frac{1}{\arg \operatorname{ch} \frac{1}{\alpha}}.$$

Pour les différentes valeurs de α , on trouve les coefficients de débit de la ligne 3 du tableau récapitulatif, p. 202.

D'après (8), on remarque que le débit Q est indépendant de l'épaisseur t de la couche perméable et qu'il ne dépend que du degré d'enfoncement de la palplanche, du coefficient de perméabilité K et de la différence de charge.

Nous avons calculé le champ d'écoulement avec ses lignes de courant et ses lignes équipotentielle pour les trois valeurs de $\alpha = 0,1$, $\alpha = 0,5$, $\alpha = 0,8$; nous donnons à la figure 2 le cas où $\alpha = 0,5$.

Calcul des pressions contre les palplanches. Par application du théorème de Bernoulli, on obtient :

$$p_{am.} = (H + x')\gamma + \left(F - \frac{\Delta H}{2}\right)\gamma \text{ sur la face amont}$$

$$p_{av.} = (H - \Delta H + x')\gamma - \left(F - \frac{\Delta H}{2}\right)\gamma \text{ sur la face aval.}$$

γ étant le poids spécifique de l'eau.

d'où :

$$(9) \quad \left\{ \begin{array}{l} p_{amont} - p_{aval} = + 2F\gamma \quad \text{ou} \\ p_{amont} - p_{aval} = \gamma \cdot \Delta H \frac{\arg \operatorname{ch} \frac{x}{at}}{\arg \operatorname{ch} \frac{1}{\alpha}}. \end{array} \right.$$

Deuxième solution approchée.

Les lignes de courant sont des ellipses homofocales de foyer O'' et de centre O' , intersection de la palplanche et du niveau du sol (fig. 1).

Les équipotentielles, trajectoires orthogonales de ces ellipses, sont des hyperboles homofocales de foyer O'' et de centre O' . Les équations paramétriques de ces lignes d'après les désignations de la figure 1 sont

$$(10) \quad \left\{ \begin{array}{l} x' = (1 - \alpha)t \cos \varphi \operatorname{ch} \psi. \\ y = (1 - \alpha)t \sin \varphi \operatorname{sh} \psi. \end{array} \right.$$

qui définissent le potentiel $F(x', y)$, si l'on pose :

$$(11) \quad \left\{ \begin{array}{l} \varphi = \pi \frac{F}{\Delta H}. \\ \psi = \arg \operatorname{ch} \frac{x'}{(1 - \alpha)t}. \end{array} \right.$$

Pour $\Psi = 0$, on obtient la ligne de courant limite confondue avec la paroi de pal-

planches et pour $\Psi = \arg \operatorname{ch} \frac{1}{1-\alpha}$, on obtient la ligne de courant tangente à la couche imperméable sous la palplanche ; dans cette solution, l'écoulement s'effectue totalement à l'intérieur de cette ellipse limite correspondant à

$$\Psi = \arg \operatorname{ch} \frac{1}{1-\alpha}.$$

Le calcul de la vitesse en un point peut s'effectuer de la même manière que pour la première solution.

Il en est de même des débits et pressions. Les coefficients de débits obtenus dans ce cas figurent à la ligne 5 du tableau récapitulatif, page 202 ; la figure 3 donne la représentation du champ d'écoulement pour $\alpha = 0,5$.

Troisième solution approchée.

Dans cette solution, l'écoulement souterrain est assimilé à l'écoulement hydrodynamique autour d'une pointe. On sait que cet écoulement dérive de la transformation

$$\varphi + i\Psi = f(z) = z^{\frac{1}{2}} = (x + iy)^{\frac{1}{2}}$$

En introduisant les coordonnées polaires de pôle O'' , base de la palplanche (voir fig. 1), on a :

$$z^{\frac{1}{2}} = r^{\frac{1}{2}} \left(\cos \frac{\theta}{2} + i \sin \frac{\theta}{2} \right)$$

les lignes de courant et les lignes équipotentiels sont alors :

$$(12) \quad \left\{ \begin{array}{l} \Psi = r^{\frac{1}{2}} \sin \frac{\theta}{2} \\ \varphi = r^{\frac{1}{2}} \cos \frac{\theta}{2} \end{array} \right.$$

Le champ d'écoulement est limité par l'équipotentielle

$$(13) \quad \left\{ \begin{array}{l} \varphi_{\text{limite}} = \sqrt{(1-\alpha)t} \\ \text{et la ligne de courant} \\ \Psi_{\text{limite}} = \sqrt{\alpha t} \end{array} \right.$$

La ligne de courant confondue avec la paroi de palplanches correspond à $\psi = 0$. En posant

$$\varphi = \frac{2F}{\Delta H} \sqrt{(1-\alpha)t}$$

on définit le potentiel correspondant à cet écoulement, qui peut se mettre sous la forme :

$$(14) \quad F = \frac{\Delta H}{2} \sqrt{\frac{r}{(1-\alpha)t}} \cdot \cos \frac{\theta}{2}.$$

Comme pour les solutions (1) et (2) il est facile de déterminer les vitesses, débits et pressions. Les coefficients de débits obtenus dans ce cas figurent à la ligne 7 du tableau récapitulatif de la page 202. La figure 4 est une image du champ de l'écoulement pour $\alpha = 0,5$.

§ 3. ESSAIS SUR MODÈLES.

But des essais.

Ces essais ont eu pour but de vérifier sur un modèle réduit les résultats analytiques approchés obtenus avec les solutions envisagées au § 2 ci-dessus ; ils ont consisté en particulier à relever des lignes de courant et à mesurer les débits. En partant de ces observations, nous avons eu l'occasion de faire une application directe d'une méthode semi-graphique permettant de tracer les lignes équipotentiels et les lignes de courant d'un champ d'écoulement, en partant de deux lignes de courant observées. Par ce procédé on a pu également calculer le débit.

Lois de similitude.

Dans le cas d'essais à deux dimensions, pour autant que la similitude géométrique du modèle soit satisfaite, que la répartition des matériaux soit uniforme et isotrope, qu'il s'agisse d'un écoulement laminaire (pertes de charge fonction linéaire de la vitesse), l'interprétation des expériences doit se faire sur la base de l'expression suivante :

$$\frac{Q}{q} = \lambda^2 \frac{K}{k}.$$

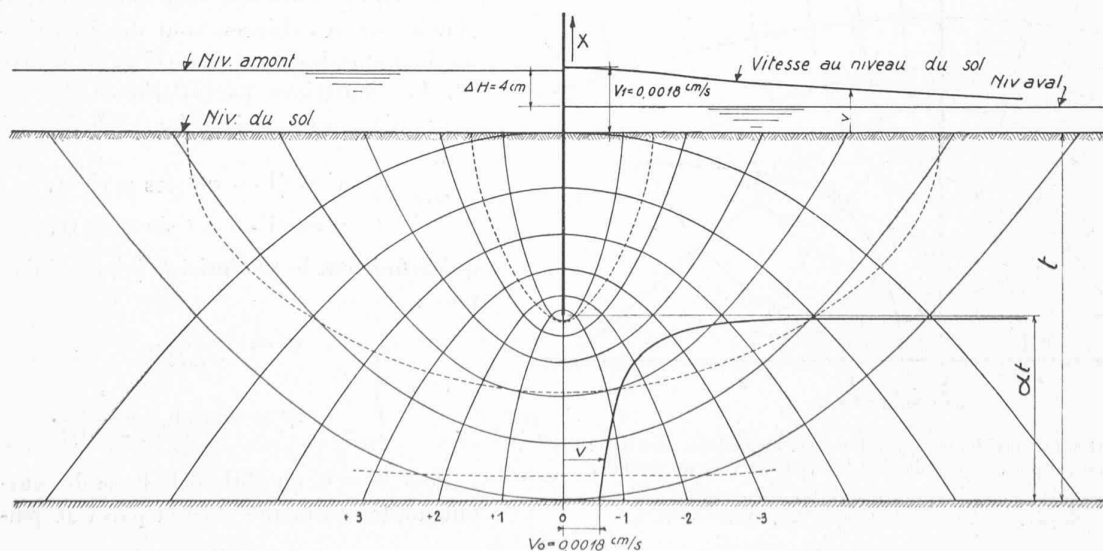


Fig. 4. — Ecoulement sous un rideau de palplanches.

Troisième solution :
lignes de courant

$$\Psi = r^{\frac{1}{2}} \sin \frac{\theta}{2}.$$

En pointillé lignes observées au modèle.

Largeur du chenal : 30 cm
 $K = 0,036 \text{ cm}^2/\text{sec}$
 $\alpha = 0,5$.

Débit mesuré :
2,545 cm^3/sec

Débit calculé :
2,160 cm^3/sec

Ecart : - 15 %.

Installation pour étude d'écoulements souterrains

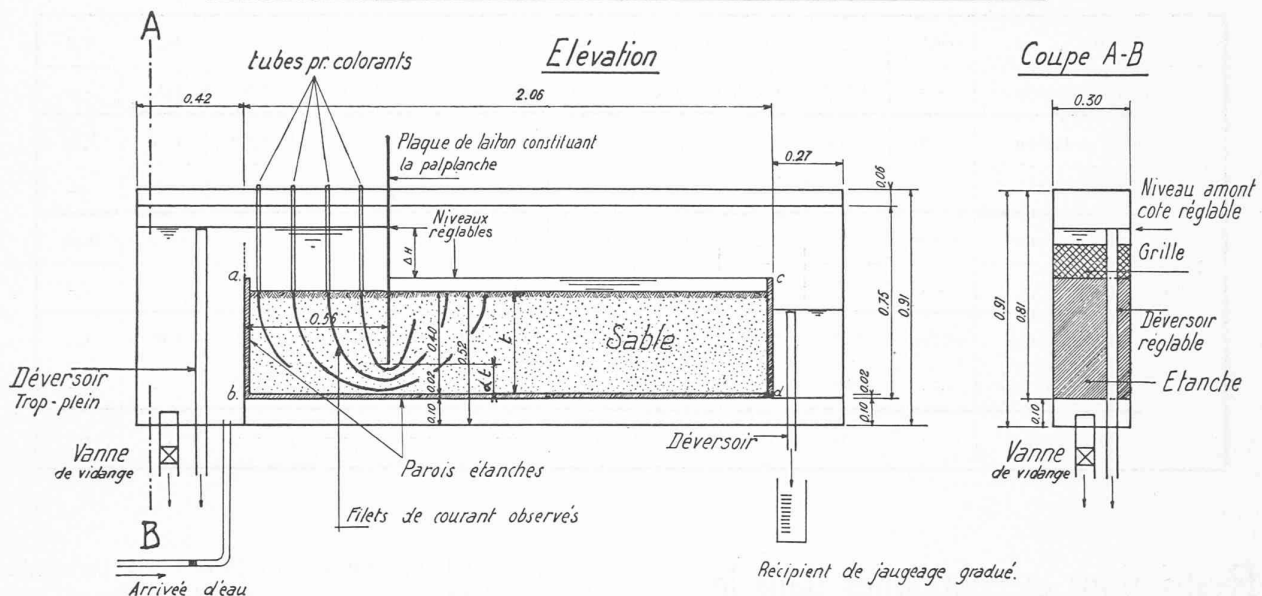


Fig. 5. — Appareillage servant à l'étude des écoulements souterrains.

Q et K , respectivement q et k désignent le débit et le coefficient de perméabilité en réalité et au modèle. λ définit l'échelle des longueurs du modèle. Le rapport $\frac{P}{p}$ des pressions est proportionnel à λ .

Description de l'installation d'essais.

Les essais ont été effectués dans un chenal vitré de 2,75 m de longueur, 30 cm de largeur (fig. 5).

Pour maintenir les niveaux constants à l'amont et à l'aval, on a prévu deux tubes déversoirs formant trop-plein et arasés aux cotes désirées. Le champ de l'écoulement est délimité par les deux parois étanches ab et cd .

Pour déceler les filets, on a injecté au niveau du sol amont en quatre points un colorant d'aniline rouge qui est entraîné par la circulation.

Les mesures des débits ont été effectuées à des intervalles réguliers pendant toute la durée de chaque expérience par jaugeage au moyen d'un réceptier gradué. On a pu constater que le débit n'est pas constant; au début de l'expérience il diminue légèrement et n'atteint une valeur invariable qu'au bout d'un certain temps; c'est cette valeur que nous avons considérée comme représentant le débit permanent.

La perméabilité du sable utilisé avait été au préalable

soigneusement déterminée en réalisant dans un appareil approprié l'expérience classique de Darcy. La valeur moyenne de K put être fixée à $k = 0,036$ cm/sec.

Contrôle de la validité de la loi de Darcy pour le cas du sable utilisé.

Si la loi de Darcy est vérifiée, les débits Q' doivent être proportionnels aux différences de charge ΔH ; c'est ce que nous avons contrôlé dans une première série d'expériences pour nous assurer que le sable utilisé était bien convenable. Les résultats des mesures sont reportés dans le tableau ci-dessous. On voit que dans chaque cas le rapport $\frac{\Delta H}{Q'}$ est pratiquement constant. La loi de Darcy est donc bien vérifiée dans notre cas.

Détermination expérimentale des coefficients de débits.

Le débit sous la palplanche est directement proportionnel au facteur $K \cdot \Delta H$, produit du coefficient de perméabilité par la perte de charge. Par nos essais nous avons déterminé directement, en mesurant différents débits et différentes pertes de charge, les valeurs du coefficient $Q : K \Delta H$ pour plusieurs valeurs de α . Les moyennes des chiffres obtenus figurent à la ligne 2 du tableau récapitulatif de la page 202. (A suivre.)

Débits mesurés et charges correspondantes pour divers enfoncements de palplanches. $l = 30$ cm $K = 0,036$ cm/sec

$\alpha = 0,2$			$\alpha = 0,3$			$\alpha = 0,4$			$\alpha = 0,5$			$\alpha = 0,65$			$\alpha = 0,75$			$\alpha = 0,8$		
ΔH_{cm}^{en}	$Q'_{cm^3/sec}$	$\frac{\Delta H}{Q'}$	ΔH_{cm}^{en}	$Q'_{cm^3/sec}$	$\frac{\Delta H}{Q'}$	ΔH_{cm}^{en}	$Q'_{cm^3/sec}$	$\frac{\Delta H}{Q'}$	ΔH_{cm}^{en}	$Q'_{cm^3/sec}$	$\frac{\Delta H}{Q'}$	ΔH_{cm}^{en}	$Q'_{cm^3/sec}$	$\frac{\Delta H}{Q'}$	ΔH_{cm}^{en}	$Q'_{cm^3/sec}$	$\frac{\Delta H}{Q'}$	ΔH_{cm}^{en}	$Q'_{cm^3/sec}$	$\frac{\Delta H}{Q'}$
4	1,35	2,96	4	1,7	2,35	3,5	1,8	1,94	4	2,56	1,56	3,6	2,9	1,24	4	4,1	0,97	4	4,9	0,81
8,5	2,9	2,93	5,2	2,2	2,36	5	2,6	1,92	7	4,55	1,53	5	4,0	1,25	4,9	4,9	1	8	9,5	0,84
16,5	5,4	3,05	7,1	3,1	2,29	7	3,6	1,94	11,1	7,5	1,48	7,4	6,1	1,21	7	7	1	12	14,6	0,82

Tableau récapitulatif des coefficients de débit.

α		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.65	0.7	0.75	0.8	0.9
$\frac{Q}{K\Delta H}$	Expériences	—	0.312	0.392	0.475	0.59	—	0.746	—	0.95	1.13	—
	1 ^{re} solution	0.26	0.34	0.42	0.50	0.59	0.71	0.79	0.87	0.99	1.13	1.70
	Ecart + %	—	8.2	6.6	5	0	—	5.5	—	4.0	0	—
	2 ^{me} solution	0.146	0.22	0.29	0.35	0.42	0.50	0.54	0.61	0.65	0.73	0.96
	Ecart — %	—	29.5	26	29	28.5	—	22.5	—	31.5	35	—
	3 ^{me} solution	0.166	0.25	0.328	0.408	0.5	0.61	0.68	0.76	0.86	1.00	1.5
	Ecart — %	—	19.8	16.3	15.8	15.2	—	8.8	—	11.5	—	—
	Méth. graph.	—	0.32	—	—	0.59	—	—	—	—	1.01	—

Restrictions et économies dans le domaine de l'énergie

par ED. DELLEY, ingénieur, Fribourg.

La crise aiguë du combustible et du carburant dont souffrent la plupart des pays européens, une année après l'ouverture des hostilités, est assurément aggravée, dans une très large mesure par les difficultés du transport ; elle est due surtout à une pénurie, causée par une extraction excessivement ralentie de certains gros bassins houilliers et par les besoins considérablement accrus, dans les pays en guerre, des fabriques d'armements et des industries travaillant pour la défense nationale. Cette crise, qui est une crise énergétique, sera demain mondiale pour peu que le conflit s'étende à d'autres continents. Elle atteint déjà, bien qu'assez faiblement encore, des pays riches en combustibles minéraux.

La Suisse est un des pays qui risque le plus de souffrir du manque de charbon et d'essence. Elle s'est trouvée déjà dans une situation précaire pendant l'avant-dernière guerre. Ses importations de charbon qui ascendaient à 3 400 000 t en 1913, d'une valeur de 107 millions de francs, étaient tombées à 2 150 000 t en 1918, valant 316 millions de francs. On dut importer du charbon américain à des prix très élevés. En 1920, deux ans après la fin des hostilités, les principaux arrivages de charbon (45 %) provenaient des Etats-Unis. La tonne de charbon valait alors, en moyenne, 205 fr. (franco station frontière) contre 31 fr. 30 en 1913. Et l'on était satisfait de pouvoir en importer, même à ce prix.

A la veille de la présente guerre, en 1938, nous ne couvrons, par nos propres ressources, bois et électricité, que le quart, à peine, de nos besoins d'énergie¹. Cette année-là, nos importations de charbon se sont élevées à près de 3 350 000 t valant 128 millions de francs ; celles de 1939, à 4 000 000 t valant 167 millions. L'Allemagne nous a fourni près de 1 740 000 t, la France 583 000 t, la Belgique 566 000 t, la Hollande 440 000 t, l'Angleterre 410 000 t, la Pologne 184 000 t, soit respectivement les 44 %, 15 %, 14 %, 11 %, 10 % et 4,5 % de nos importations totales de charbon. La consommation de résidus de pétrole pour le chauffage a été également importante : 171 100 t en 1938, 193 400 t en 1939, qui nous ont coûté, franco station frontière, sans frais de douane, respectivement

16 567 000 et 17 872 000 fr., en chiffres ronds. Du contingent de 1939, 61 000 t (31 %) provenaient de la Guyane ; 59 000 t (30 %), des Etats-Unis ; 25 300 t (13 %), de l'Iran ; 10 700 t (5,5 %), de l'URSS ; 10 600 t (5,5 %), du Pérou ; 9850 t (5 %), de la France ; 8570 t (4,5 %), de la Roumanie ; 7300 t (3,8 %), de l'Italie. Les marchés français, belge et hollandais, voire même anglais sont momentanément perdus pour nous. L'Allemagne s'est déclarée disposée à nous fournir, cette année, une quantité de charbon équivalente à ce qu'elle nous a livré l'année dernière, y compris la part de la Pologne. Notre approvisionnement en charbon serait donc assuré jusqu'à concurrence du 50 % environ.

La tonne de houille, d'origine sarroise, qui valait en moyenne 38 fr., il y a exactement une année, nous coûtait 66 fr. au mois d'août 1940 ; aux mêmes dates, le prix de la tonne de résidus de pétrole était, respectivement de 102 fr. 50 et de 303 fr. 50 ; et les prix ne font que monter. On frémit en supputant la sortie de numéraire qu'entraîneront nos futurs achats au dehors, avec la hausse prononcée qui se fait de plus en plus sentir, et en envisageant la détérioration du change qui en résultera fatalement.

Notre approvisionnement et notre ravitaillement en essence pour moteurs (benzine et huile lourde) ne se présente pas sous des conditions plus favorables que ceux en charbon. Le rationnement sévère auquel sont soumis les véhicules à moteurs de toutes catégories est suffisamment éloquent par lui-même pour que nous en parlions encore ici. Nous avons importé un peu plus de 216 000 t d'essence en 1938, près de 205 000 t en 1939. L'année dernière, les livraisons de la Roumanie se sont élevées à 91 000 t environ, c'est-à-dire à 44 % du total, celles des Etats-Unis à 59 000 t (29 %), celles de l'Iran à 34 500 t (17 %), celles de la Guyane à 10 500 t (5 %). Le marché roumain, le seul sur lequel l'acheteur européen puisse encore s'approvisionner n'est accessible que pour autant que la situation ne s'aggrave pas dans les Balkans. Quant à l'Amérique, il n'est pas possible de dire aujourd'hui si nous pourrions jamais recevoir, au cours du présent conflit, et du charbon et de l'essence en quantités appréciables.

La situation est donc dangereuse, angoissante même. Nous ne nous tirerons de ce mauvais pas qu'en diminuant à l'extérieur notre consommation d'énergie importée et en faisant intervenir notre production indigène de bois, de charbon et d'électricité. Il faudra se restreindre en tout, en supprimant non seulement le moindre gaspillage, mais encore les plus

¹ Voir *Bulletin technique* du 26 août 1939, p. 228.