

Zeitschrift: Bulletin technique de la Suisse romande
Band: 64 (1938)
Heft: 27

Artikel: Le mouvement de l'eau dans les massifs pulvérulents
Autor: Favre, H.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-49261>

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: 12.01.2026

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

Le mouvement de l'eau dans les massifs pulvérulents,

par M. H. FAVRE,

professeur à l'Ecole polytechnique fédérale, à Zurich.

(Suite et fin.)¹

La similitude mécanique des eaux souterraines et les études sur modèles réduits.

Nous rappellerons tout d'abord sommairement les principales lois générales de la similitude mécanique. Nous examinerons ensuite comment on peut appliquer ces lois au problème qui nous intéresse.

Deux mouvements sont dits mécaniquement semblables lorsque :

1. ils sont géométriquement semblables (trajectoires semblables, formes des masses semblables, etc.) ;
2. les grandeurs homologues de même espèce physique (forces, vitesses, etc.) sont dans le même rapport, qui peut être différent selon la grandeur considérée.

Désignons par :

L, l deux longueurs caractéristiques homologues,

M, m deux masses élémentaires homologues,

$F_1, F_2, \dots, f_1, f_2, \dots$ les forces agissant respectivement sur ces masses,

T, t les temps correspondants,

$(v), v$ les vitesses respectives des masses M, m .

Les majuscules ou les lettres entre parenthèses se rapportent au premier mouvement (nature), les minuscules au second (modèle).

Appelons en outre :

$$(I) \left\{ \begin{array}{ll} \lambda = \frac{L}{l} & \text{le rapport constant des longueurs (inverse de l'échelle des longueurs),} \\ \mu = \frac{M}{m} & \text{celui des masses,} \\ \chi = \frac{F_1}{f_1} = \frac{F_2}{f_2} = \dots & \text{celui des forces,} \\ \tau = \frac{T}{t} & \text{celui des temps,} \\ \epsilon_v = \frac{(v)}{v} & \text{celui des vitesses.} \end{array} \right.$$

De la définition de la vitesse, on déduit la relation

$$(II) \quad \epsilon_v = \frac{\lambda}{\tau}$$

A l'aide des équations du mouvement de Newton, on établit l'équation suivante, appelée « condition de Bertrand » :

$$(III) \quad \mu \frac{\lambda}{\tau^2} = \chi$$

Ces équations II et III sont d'ailleurs évidentes, la première étant celle de la définition de la vitesse du premier mouvement (nature), la seconde l'équation de Newton de ce mouvement, toutes deux écrites en pre-

nant comme unités respectives les grandeurs relatives au second mouvement (modèle).

En se basant sur la définition (I) de χ et sur la condition (II), il est facile de démontrer le théorème suivant, d'ailleurs évident en lui-même :

Pour que deux mouvements soient mécaniquement semblables, il est nécessaire et suffisant que :

1. les conditions aux limites (surfaces limitant l'écoulement, conditions d'admission et de sortie de l'eau, débit, etc.) soient elles-mêmes mécaniquement semblables ;
2. les forces $F_1, F_2, \dots, f_1, f_2, \dots$ soient telles que les conditions suivantes soient partout et à tout instant satisfaites :

$$(IV) \quad \mu \frac{\lambda}{\tau^2} = \frac{F_1}{f_1} = \frac{F_2}{f_2} = \dots$$

Précisons ce que nous entendons ici par *forces*. Il s'agit de *forces physiques*, c'est-à-dire de forces caractérisées par une certaine propriété de la matière.

Par exemple : la *pesanteur*, caractérisée par l'accélération g , le *frottement des liquides*, caractérisé par la viscosité η , etc.

Dans cet ordre d'idées, les réactions normales, les pressions dans les liquides, ne sont pas des « forces physiques » car elles ne sont pas caractérisées par une certaine propriété de la matière. Les pressions sont des *forces de réaction*, des forces *passives* qui sont la conséquence — et non la cause — des circonstances du mouvement.

Considérons maintenant deux massifs pulvérulents satisfaisant aux conditions suivantes :

1° Les limites du second massif (modèle) sont géométriquement semblables à celles du premier (nature), le rapport de similitude est λ (fig. 10).

2° La répartition des éléments solides dans les deux massifs est homogène et isotrope.

3° Aux limites de la zone de terrain considérée, les surfaces des eaux souterraines sont à chaque instant maintenues à des niveaux homologues.

4° L'eau située au-dessous de la surface libre a une température constante dans chacun des massifs et ne contient pas de bulles d'air.

5° Le mouvement du liquide dans les deux massifs est *laminaire*. Les coefficients de la formule de Darcy sont K (nature) et k (modèle).

Pour reconnaître si la similitude existe ou non, examinons quelles sont les *forces physiques* qui entrent en jeu.

Parmi les trois forces que nous avons indiquées, seules la première (pesanteur) et la troisième (provenant des efforts tangentiels) sont à qualifier de physiques, la seconde (ayant son origine dans les pressions normales) étant à considérer comme une force passive, *non physique*.

¹ Voir *Bulletin technique* du 17 décembre 1938, page 353.

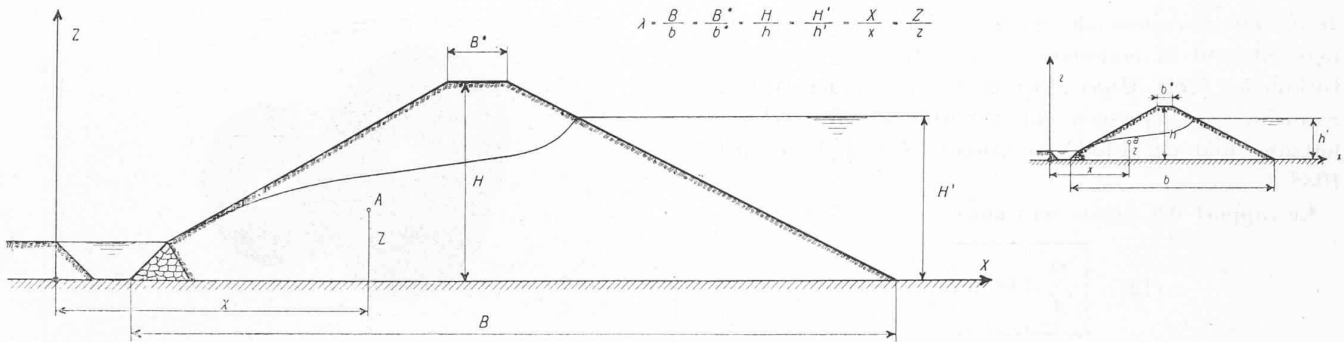


Fig. 10

Désignons par F_1 , f_1 la première force, par F_3 , f_3 la troisième.

Nous avons, en utilisant les notations du premier paragraphe pour désigner les grandeurs relatives au modèle et en utilisant les mêmes notations mais entre parenthèses pour désigner les grandeurs homologues de la nature :

$$(5) \quad F_1 = (n)(dV) \cdot (\gamma), \quad F_3 = (n)(dV) \frac{(\gamma)}{K} (\nu),$$

$$f_1 = n \cdot dV \cdot \gamma, \quad f_3 = n dV \frac{\gamma}{k} \nu.$$

La condition (IV) se réduit dans notre cas, à cause des très faibles vitesses de l'eau qui rendent la condition relative aux accélérations négligeable, à la suivante :

$$\frac{F_1}{f_1} = \frac{F_3}{f_3}.$$

D'où en substituant :

$$\frac{(n)(dV) \cdot (\gamma)}{n dV \gamma} = \frac{(n)(dV) \frac{(\gamma)}{K} \cdot (\nu)}{n dV \frac{\gamma}{k} \cdot \nu},$$

et, après simplifications, nous obtenons, pour le rapport des vitesses :

$$\frac{(\nu)}{\nu} = \frac{K}{k}, \text{ c'est-à-dire}$$

$$(6) \quad \epsilon_v = \frac{(\nu)}{\nu} = \frac{K}{k}.$$

Nous voyons ainsi que la similitude est toujours possible, puisque la relation de Bertrand nous conduit simplement au calcul du rapport inconnu des vitesses et non à une condition qu'il ne serait possible de remplir que dans certains cas exceptionnels.

L'équation (II) permet de calculer le rapport des temps.

$$\tau = \frac{\lambda}{\epsilon_v}, \text{ d'où, en substituant}$$

$$(7) \quad \tau = \frac{T}{t} = \frac{k}{K} \cdot \lambda.$$

Enfin le rapport des débits est

$$\frac{Q}{q} = \frac{\lambda^3}{\tau} = \frac{\lambda^3}{\frac{k}{K} \cdot \lambda} = \lambda^2 \cdot \frac{K}{k}$$

$$(8) \quad \boxed{\frac{Q}{q} = \lambda^2 \cdot \frac{K}{k}}.$$

A titre d'exemple, supposons que les éléments solides constituant le modèle soient les mêmes que dans la nature et qu'il en soit de même du pourcentage des vides. Dans ces conditions, $K = k$ et les débits se comporteront comme le carré du rapport des longueurs :

$$(9) \quad \boxed{\frac{Q}{q} = \lambda^2}.$$

Des travaux récents ont établi que les coefficients K ou k sont, toutes conditions égales d'ailleurs, proportionnels au carré du diamètre des éléments (voir, par ex., Dachler, « Grundwasserströmung », Springer, 1936, p. 12).

$$K \propto D^2,$$

$$k \propto d^2,$$

où D , d désignent les diamètres caractéristiques des éléments de la nature et du modèle.

La formule (8) s'écrit alors

$$(10) \quad \boxed{\frac{Q}{q} = \lambda^2 \left(\frac{D}{d} \right)^2}.$$

Si l'on choisit alors $\frac{D}{d} = \lambda$ (réduction des éléments dans le rapport λ) on obtient à l'aide de cette nouvelle formule

$$(11) \quad \boxed{\frac{Q}{q} = \lambda^4}.$$

A titre de comparaison, faisons le raisonnement suivant. Supposons que les éléments solides du modèle et de la nature, ainsi que les vides, soient suffisamment grands pour donner lieu à des mouvements nettement turbulents de l'eau (cas d'une digue en enrochement). Si l'on choisit également $\frac{D}{d} = \lambda$, la similitude sera régie par la loi

de Froude généralisée car les seules forces physiques qui agissent sont la pesanteur et le frottement de grande turbulence (voir Meyer-Peter et Favre : « ...der Wasserbauliche Modellversuch im Dienste der Wasserkraftnutzung und der Flusskorrektur ». S. I. A. Festschrift 1938).

Le rapport des débits sera alors

$$(12) \quad \frac{Q}{q} = \lambda^{5/2}.$$

L'exposant de λ est 2,5, alors que dans le cas du mouvement laminaire il est égal à 4.

En résumé, nous voyons qu'il est possible d'étudier sur modèle réduit le mouvement des eaux souterraines dans deux cas bien déterminés :

- 1° Dans la nature, les éléments solides et les conditions d'écoulement sont tels que le mouvement est laminaire (la loi de Darcy est valable). Il suffit, pour que la similitude existe, de prendre, dans le modèle, des éléments conduisant également à un mouvement laminaire.
- 2° Dans la nature, les éléments solides et les conditions d'écoulement sont tels que le mouvement est nettement turbulent (la loi de Darcy n'est pas valable). En choisissant une échelle suffisamment grande et en prenant pour le modèle des éléments solides obtenus par réduction dans le rapport λ , le second mouvement sera également nettement turbulent et la similitude existera.

L'émetteur national suisse à ondes courtes.

Le 14 décembre courant, la maison Hasler S. A. avait convié la presse technique à visiter, dans ses ateliers de Berne, admirablement outillés, les appareils, grandioses et délicats, qu'elle a construits pour équiper notre nouvel émetteur national, à ondes courtes, de Schwarzenburg (près de Thoun). Cet examen, éclairé par les commentaires des savants spécialistes dont Hasler s'est entouré, fut suivi d'une visite des installations en préparation à Schwarzenburg : là, le colonel G. Keller, chef du Service fédéral des radiocommunications, et ses collaborateurs guidèrent leurs hôtes avec une inlassable obligeance.

Le « clou » de cette visite fut l'ascension d'une radio-sonde ; voir figure ci-contre.

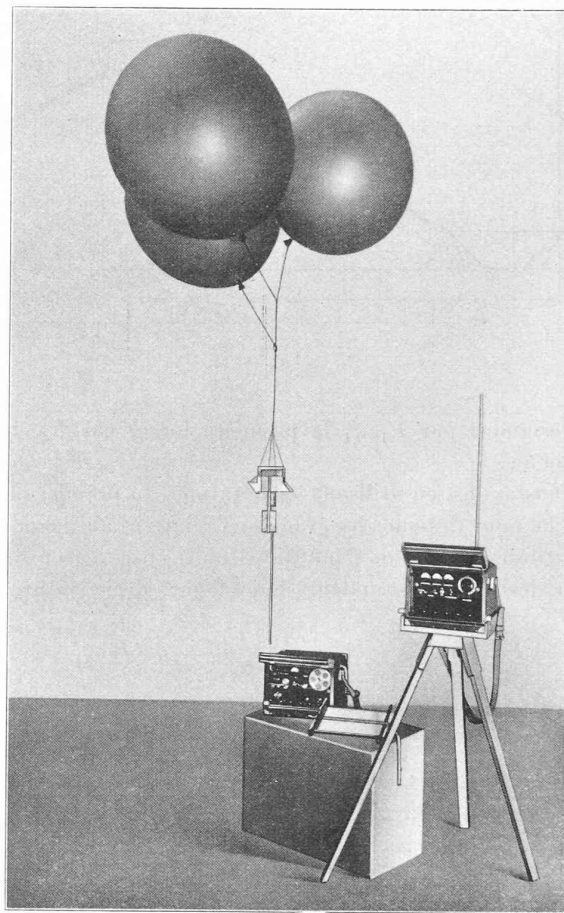
Nous reviendrons sur la belle œuvre de Schwarzenburg qui permettra à la Suisse de faire entendre sa voix jusqu'aux antipodes.

NÉCROLOGIE

Charles de Haller.

D'origine bernoise, M. Charles de Haller est né le 25 novembre 1869. C'est à l'école d'ingénieurs de Lausanne qu'il prit son diplôme d'ingénieur civil¹.

¹ Des circonstances indépendantes de notre volonté, et que nous déplorons, nous ont empêché de rendre plus tôt hommage à la mémoire de M. Ch. de Haller qui a grandement honoré la profession d'ingénieur. — Réd.



Radio-sonde
Fabrication Hasler S. A., Berne.

Il fut tout d'abord appelé à travailler pour l'entreprise des Chemins de fer de Constantinople-Salonique. Puis on lui demanda de faire des études préliminaires pour la construction du chemin de fer Martigny-Châtelard. Peu après, M. Théodore Turretini, conseiller administratif de la Ville de Genève, l'appela pour les travaux de construction du pont de la Coulouvrenière.

En mai 1897, M. de Haller fonde un bureau technique, en collaboration avec M. Bois.

Le 1^{er} mai 1899, il est engagé par la Société franco-suisse pour l'industrie électrique, qui lui fait étudier les chutes du Tusciano et du Tirino, en Italie, et il surveille les travaux du Martigny-Châtelard.

En 1906, il quitte la Société franco-suisse pour l'industrie électrique, et rouvre son bureau d'études. Il est alors activement occupé à l'examen de différents projets de forces hydrauliques que lui demandent la Società Meridionale di Eletticità, pour le sud de l'Italie, la Société Générale de Force et Lumière, pour le Dauphiné, la région de Lyon et les contrées avoisinantes. Il est appelé également à faire des études pour la mise en valeur de certaines chutes d'eau sur la rive Est de l'Adriatique.

De 1912-1914, M. de Haller a eu à s'occuper de la construction de la nouvelle usine à gaz à Genève. C'était déjà lui qui avait été appelé pour la réparation de l'ancienne.

Il avait été nommé, le 30 juin 1906, administrateur de la Società Meridionale di Eletticità. Il en a été le vice-président, de 1926 à 1929.