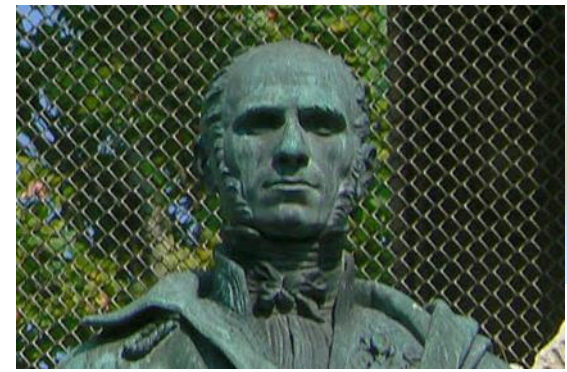


How Darcy's Law sparked various fields of subsurface hydrology

Gerrit H. de Rooij

Drinking water supply



J.P. Guyonard, <http://www.panoramio.com/photo/52415024>

Fontaines Publiques

DE LA VILLE DE DIJON

DIRECTEUR ET ARCHITECTE

DES PRINCIPES A SUITES ET DES FAMILLES A EMPLOYER

SAUS LES QUESTIONS

DE

DISTRIBUTION D'EAU

ACTUELLEMENT

PAR UN APPROPRIÉ MÉTHODE AUX PRINCIPES DE LA PUISSANCE VALLÉE

AU FILTRAGE DES EAUX

ET LA MANÈGE DES VILLES DE DIJON, DE NANCY, DE STRASBOURG ET DE LUXEMBOURG

PAR

HENRY DARCY

INGÉNIEUR CIVIL, DES PONTS ET CHAUSSEES

ET DE LA VILLE DE DIJON

PARIS

VICTOR DALMONT, ÉDITEUR,

1856

LES ÉDITIONS DE LA VILLE DE DIJON

LES ÉDITIONS DE LA VILLE DE DIJON

LES ÉDITIONS DE LA VILLE DE DIJON

LES ÉDITIONS DE LA VILLE DE DIJON

LES ÉDITIONS DE LA VILLE DE DIJON

LES ÉDITIONS DE LA VILLE DE DIJON

LES ÉDITIONS DE LA VILLE DE DIJON

LES ÉDITIONS DE LA VILLE DE DIJON

LES ÉDITIONS DE LA VILLE DE DIJON

LES ÉDITIONS DE LA VILLE DE DIJON

LES ÉDITIONS DE LA VILLE DE DIJON

LES ÉDITIONS DE LA VILLE DE DIJON

LES ÉDITIONS DE LA VILLE DE DIJON

LES ÉDITIONS DE LA VILLE DE DIJON

LES ÉDITIONS DE LA VILLE DE DIJON

LES ÉDITIONS DE LA VILLE DE DIJON

LES ÉDITIONS DE LA VILLE DE DIJON

LES ÉDITIONS DE LA VILLE DE DIJON

LES ÉDITIONS DE LA VILLE DE DIJON

LES ÉDITIONS DE LA VILLE DE DIJON

LES ÉDITIONS DE LA VILLE DE DIJON

LES ÉDITIONS DE LA VILLE DE DIJON

LES ÉDITIONS DE LA VILLE DE DIJON

LES ÉDITIONS DE LA VILLE DE DIJON

LES ÉDITIONS DE LA VILLE DE DIJON

LES ÉDITIONS DE LA VILLE DE DIJON

LES ÉDITIONS DE LA VILLE DE DIJON

LES ÉDITIONS DE LA VILLE DE DIJON

LES ÉDITIONS DE LA VILLE DE DIJON

LES ÉDITIONS DE LA VILLE DE DIJON

LES ÉDITIONS DE LA VILLE DE DIJON

LES ÉDITIONS DE LA VILLE DE DIJON

LES ÉDITIONS DE LA VILLE DE DIJON

LES ÉDITIONS DE LA VILLE DE DIJON

LES ÉDITIONS DE LA VILLE DE DIJON

LES ÉDITIONS DE LA VILLE DE DIJON

LES ÉDITIONS DE LA VILLE DE DIJON

LES ÉDITIONS DE LA VILLE DE DIJON

LES ÉDITIONS DE LA VILLE DE DIJON

LES ÉDITIONS DE LA VILLE DE DIJON

LES ÉDITIONS DE LA VILLE DE DIJON

LES ÉDITIONS DE LA VILLE DE DIJON

LES ÉDITIONS DE LA VILLE DE DIJON

LES ÉDITIONS DE LA VILLE DE DIJON

LES ÉDITIONS DE LA VILLE DE DIJON

LES ÉDITIONS DE LA VILLE DE DIJON

LES ÉDITIONS DE LA VILLE DE DIJON

LES ÉDITIONS DE LA VILLE DE DIJON

LES ÉDITIONS DE LA VILLE DE DIJON

LES ÉDITIONS DE LA VILLE DE DIJON

LES ÉDITIONS DE LA VILLE DE DIJON

LES ÉDITIONS DE LA VILLE DE DIJON

LES ÉDITIONS DE LA VILLE DE DIJON

LES ÉDITIONS DE LA VILLE DE DIJON

LES ÉDITIONS DE LA VILLE DE DIJON

LES ÉDITIONS DE LA VILLE DE DIJON

LES ÉDITIONS DE LA VILLE DE DIJON

Buckingham (1907) extended Darcy's Law to unsaturated soils (possibly unaware of Darcy's work!). He also introduced the matric potential, essentially starting soil physics (Nimmo and Landa, 2005).

$$q = -K \nabla(h + z)$$

Law of conservation of mass in unsaturated media

$$\nabla q = -\frac{\partial \theta}{\partial t}$$

Richards (1931) presented the flow equation for unsaturated flow that since bears his name.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{d\theta}{dh} \frac{\partial h}{\partial t} = \nabla[K \nabla(h + z)]$$

Klute (1952) introduced the Kirchhoff transformation

$$\varphi = \int_{-\infty}^h K(h^*) dh^*$$

Gardner (1958) proposed an exponential hydraulic conductivity function

$$K = K_s e^{ch}$$

Darcy's Law in differential form by Dupuit (1863)

$$q = -KVH$$

Law of conservation of mass in saturated media

$$\nabla q = 0$$

Potential theory applied to drainage by Kirkham (1950s and 1960s)



Dupuit-Forchheimer-type simplifications

Dupuit-Forchheimer assumptions (1863 and 1886):

- Horizontal flow
- Flow proportional to slope of the groundwater table

Drainage

Transient Dumm-Glover drainage theory (Dumm, 1954) and others



Hooghoudt (1940) steady-state drainage equation

$$L^2 = \frac{8KD + 4Km^2}{R}$$



Advance of computers (from 1970s onwards)

Numerical solutions (late 1970s onwards)

Linearization of the steady-state version of Richards' equation



Abundance of analytical solutions, frequently related to irrigation (reviewed by Pullan, 1990)

Wide range of analytical solutions, mainly for groundwater flow towards wells: Thiem (1906), de Glee (1930), Theis (1935)

Advance of computers (from 1970s onwards)

Numerical solutions and groundwater flow modeling packages (1980s and onwards)

Drainage theory by Ernst (1956) for layered soils



Drainage theory by Ernst (1956) for layered soils

$$L^2 = \frac{8KD + 4Km^2}{R}$$

Drainage theory by Ernst (1956) for layered soils

Drainage theory by Ernst (1956) for layered soils

Drainage theory by Ernst (1956) for layered soils

Drainage theory by Ernst (1956) for layered soils

Drainage theory by Ernst (1956) for layered soils

Drainage theory by Ernst (1956) for layered soils

Drainage theory by Ernst (1956) for layered soils

Drainage theory by Ernst (1956) for layered soils

Drainage theory by Ernst (1956) for layered soils

Drainage theory by Ernst (1956) for layered soils

Drainage theory by Ernst (1956) for layered soils

Drainage theory by Ernst (1956) for layered soils

Drainage theory by Ernst (1956) for layered soils

Drainage theory by Ernst (1956) for layered soils

Drainage theory by Ernst (1956) for layered soils

Drainage theory by Ernst (1956) for layered soils

Pumping tests to determine aquifer properties (Kruseman and de Ridder, 1990)



Groundwater engineering

- Sustainable extraction
- Groundwater cleanup
- Flows in complicated 3D geohydrological settings

Aquifer heterogeneity (Dagan, 1987; Neuman, 1990)

Borden aquifer experiments (Sudicky, 1986)



Drainage theory by Ernst (1956) for layered soils



Drainage theory by Ernst (1956) for layered soils

Drainage theory by Ernst (1956) for layered soils

Drainage theory by Ernst (1956) for layered soils

Drainage theory by Ernst (1956) for layered soils

Drainage theory by Ernst (1956) for layered soils

Drainage theory by Ernst (1956) for layered soils

Drainage theory by Ernst (1956) for layered soils

Drainage theory by Ernst (1956) for layered soils

Drainage theory by Ernst (1956) for layered soils

Drainage theory by Ernst (1956) for layered soils

Drainage theory by Ernst (1956) for layered soils

Drainage theory by Ernst (1956) for layered soils

Drainage theory by Ernst (1956) for layered soils

Drainage theory by Ernst (1956) for layered soils

Drainage theory by Ernst (1956) for layered soils

Drainage theory by Ernst (1956) for layered soils

Drainage theory by Ernst (1956) for layered soils

Drainage theory by Ernst (1956) for layered soils

References

Buckingham, E. 1907. Bulletin 38, USDA, Bureau of Soils.

Dagan, G. 1987. Annual Review of Fluid Mechanics 19:183-215.

Darcy, H. 1856. Les fontaines publiques de la Ville de Dijon. Dalmont, Paris.

de Glee, G.J. 1930. Over grondwaterstromingen bij wateronttrekking door middel van putten. Watman, Delft, The Netherlands.

de Rooij, G.H. 2016. <http://oxfordindex.oup.com/view/10.1093/acrefore/9780199389414.013.3>

Dumm, L.D. 1954. Agricultural Engineering 35:726-730.

Dupuit, J. 1863. Etudes théoriques et pratiques sur le mouvement des eaux dans les canaux découverts et à travers les terrains perméables. Dunod, Paris.

Ernst, L.F. 1956. Netherlands Journal of Agricultural Sciences 4:126-131.

Forchheimer, P. 1886. Über die Ergiebigkeit von Brunnen-Anlagen und Sickerschlitzen. Zeitschrift für Architekt. Ing.-Ver., Hannover, 32:539-563.

Gardner, W.R. 1958. Soil Science 85:228-232.

Hooghoudt, S.B. 1940. Verslagen Landbouwkundig Onderzoek 46(14) B:515-707.

Klute, A. 1952. Soil Science 73:105-116.

Kruseman, G.P., and N.A. de Ridder. 1990. Analysis and evaluation of pumping test data. ILRI, Wageningen, The Netherlands.

Neuman, S.P. 1990. Water Resour. Res. 8:1749-1758.

Nimmo, J.R., and E.R. Landa. 2005. Soil Sci. Soc. Am. J. 69:328-342.

Pullan, A.J. 1990. Water Resour. Res. 26:1219-1234.

Richards, L.A. 1931. Physics 1:318-333.

Sudicky, E.A. 1986. Water Resour. Res. 22:2069-2082.

Theis, C.V. 1935. Trans. Am. Geophys. Union 16:519-524.

Thiem, G. 1906. Hydrologische Methoden. Gebhardt, Leipzig, Germany.