

INONDATIONS, INFILTRATIONS ET COUPLAGES D'ÉCOULEMENTS PARTIELLEMENT SATURÉS ET NON-SATURÉS

G.Trégarot¹, R.Ababou¹, A.Larabi²

(1) Institut de Mécanique des Fluides, Allée Camille Soula, 31400 Toulouse, France

(2) Ecole Mohammadia d'Ingénieurs, B.P. 765 Agdal, Rabat, Maroc

Résumé

Dans les bassins hydrologiques, l'eau s'écoule aussi bien en surface qu'en profondeur. Elle ruisselle, se stocke, s'infiltre, et s'évapore à travers la surface topographique. Les processus mis en jeu ne se produisent pas séparément au cours du cycle de l'eau, même s'ils sont souvent découplés dans les modèles utilisés pour quantifier les flux. Une formulation mixte pression-teneur en eau de l'équation de Richards permet de modéliser comme un seul domaine d'écoulement les zones non saturées, totalement saturées, partiellement saturées (nappes libres, flaques et nappes perchées). Pour tester cette approche, des problèmes simplifiés d'écoulements sont modélisés en coupe 2D à l'aide d'un code de calcul 3D (BIGFLOW): 1) infiltration à la surface d'un sol sableux avec lentille d'argile générant une nappe perchée; 2) échanges nappe-rivière pendant et après une averse; 3) propagation d'un front de saturation dans les berges sèches d'un cours d'eau (Polubarinova-Kochina, 1962). Le 1^{er} cas se produit lors du débordement d'un cours d'eau; le 2nd cas modélise le débit de base dû à la recharge-décharge d'une nappe drainée par un cours d'eau; et le 3^{ème} cas peut se produire lors du passage d'une onde de crue. Les processus simulés sont analysés et comparés à certaines solutions analytiques. Ces expérimentations numériques font partie d'une action plus large de paramétrisation, couplage, et simulation spatialement distribuée du cycle de l'eau dans les bassins hydrologiques.

Abstract

Hydrologic flows come under many different guises: unsaturated flow through soil; free surface groundwater flow; confined groundwater flow; run-off over land surfaces and in streams; and other phenomena like perched water tables, surface ponding, seepage and exfiltration at hydrological interfaces. This paper investigates, in particular, the case of coupled saturated / unsaturated flows with one or several free surfaces, based on a variably saturated mass conservation equation and a generalized form of the flux-gradient law of Darcy-Buckingham. Several simplified test cases are modeled in 2D using the 3D BIGFLOW code : 1) infiltration in a soil with a clay lens under ponding or flooding (perched water table); 2) subsurface flow and discharge to a stream during and after a rainfall event; 3) saturation front problem of Polubarinova-Kochina (1962). In some cases we compare the numerical results with analytical solutions. This investigation is part of a broader research effort aimed at formulating, parametrizing, and modeling spatially distributed and coupled flows in hydrological basins.

1. Infiltration et formation de nappes dans un terrain sableux hétérogène inondé

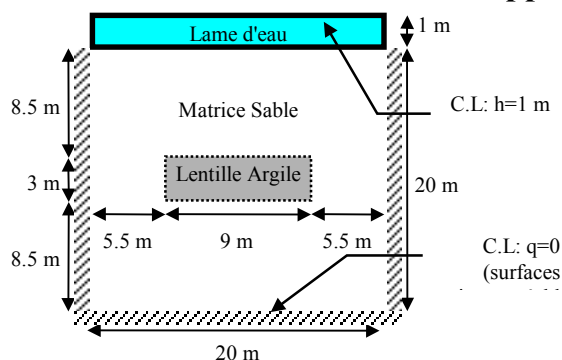


Fig. 1: Représentation schématique du sol sous lame d'eau constante ou "inondation" (section verticale).

Un sol sableux reposant sur un socle imperméable et contenant une lentille d'argile rectangulaire est soumis en surface à une inondation qui peut résulter du débordement d'un cours d'eau (Fig. 1). L'évolution spatiale et temporelle de l'état hydrique du sol, initialement uniforme (sec ou humide), est suivie jusqu'à saturation complète. L'état final totalement saturé est caractérisé par un profil de pression hydrostatique (atteint en un temps fini).

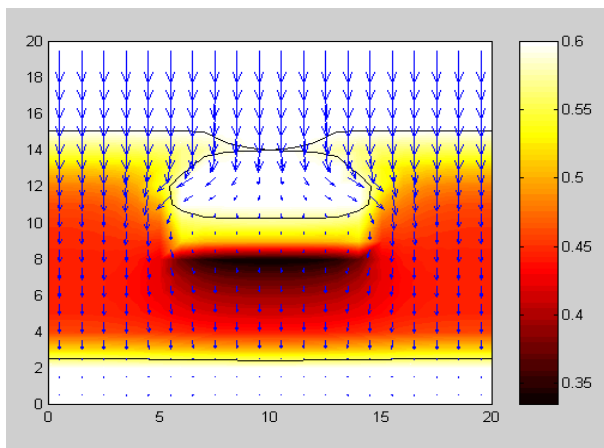


Fig. 2: Champ de teneur en eau, densités de flux, et surfaces libres dans le cas humide ($t=1$ jour).

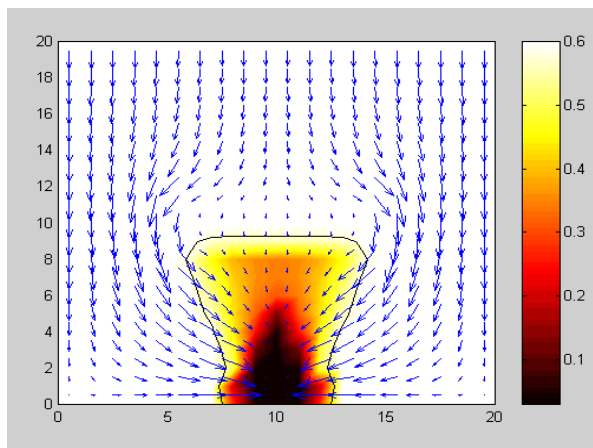


Fig. 3: Champ de teneur en eau, densités de flux, et surface libre dans le cas sec ($t=11$ jours).

Les simulations mettent en évidence la capacité du modèle à reproduire des surfaces libres mobiles multiples. De plus, les résultats montrent que les conditions antécédentes affectent fortement le processus d'infiltration, de même que l'hétérogénéité introduite ici par le contraste des conductivités hydrauliques du sable et de l'argile. Ainsi, le front d'infiltration descendant qui provient de la lame d'eau superficielle, est diffus dans le cas humide, abrupt dans le cas sec. D'autre part, on observe simultanément un drainage gravitaire interne qui crée, dans le cas humide, une nappe perchée à la surface de la lentille et une nappe phréatique sur le plancher imperméable (Fig. 2). Dans le cas sec, on n'observe qu'une seule zone saturée comprise entre la lame d'eau et le front d'infiltration, car la matrice sableuse initialement très sèche ne draine presque pas. La coexistence de 3 zones saturées dans le cas humide est un phénomène transitoire. Peu avant l'état final de saturation totale, il ne subsiste plus, dans les 2 cas testés, qu'une poche résiduelle de sol sec au-dessous de la lentille, poche alimentée par des flux convergents (Fig. 3).

2. Recharge et décharge d'une nappe phréatique dans un cours d'eau

On considère une nappe libre initialement en équilibre avec un cours d'eau transverse, en section verticale. On simule d'abord la recharge de la nappe par infiltration d'une pluie non saturante, jusqu'à atteindre un régime permanent (Fig. 4 et 5). On supprime alors l'alimentation, et on simule la décharge partiellement saturée de la nappe (et du sol) dans le cours d'eau. Ces deux épisodes peuvent être associés aux composantes souterraines du débit lors des phases de crue et de décrue d'un cours d'eau.

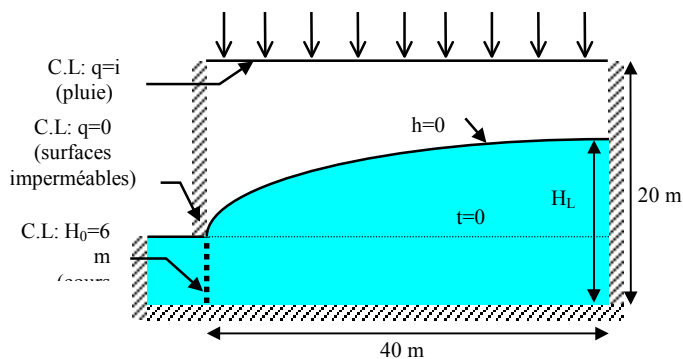


Fig. 4: Schéma de recharge de la nappe par infiltration de la pluie à travers un sol non saturé (section verticale).

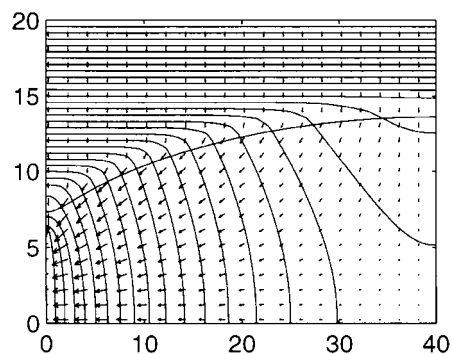


Fig. 5: Equipotentiels, densités de flux, et surface libre de la nappe ($t=8$ jours).

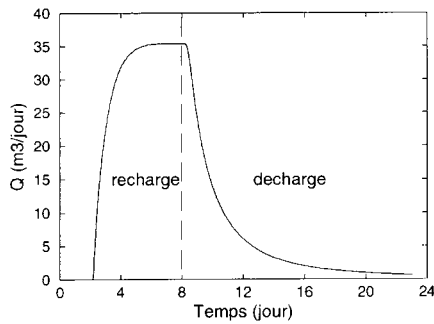


Fig. 6: Débit $Q(t)$ à l'interface nappe-rivière (recharge/décharge de la nappe).

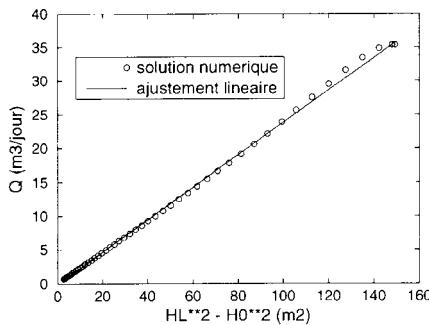


Fig. 7: Loi de perte de charge globale du système nappe/rivière, simulée et ajustée à une loi quadratique analogue à celle de Dupuit-Forchheimer.

Le débit sortant à l'interface nappe/rivière pendant la décharge est analysé en fonction du temps (Fig. 6). La loi de tarissement, analogue à l'écoulement de base observé sur un hydrogramme en période de décrue ou d'étiage, présente 3 régimes d'écoulement : 1) drainage rapide du sol sans baisse de nappe (heures); 2) drainage rapide avec baisse de nappe, à débit exponentiellement décroissant (jours); 3) drainage lent de la nappe et du sol (semaines).

Le débit est aussi analysé en fonction de la différence entre la hauteur maximale de la nappe H_L et le niveau de la rivière H_0 (Fig. 7). On obtient une loi de perte de charge globale qui s'ajuste bien à la loi quadratique:

$$Q(t) = a_0 [H_L(t)^2 - H_0^2], \text{ avec } a_0 \approx 0.240 \text{ j}^{-1}.$$

Cette loi est analogue à celle de Dupuit-Forchheimer (cf Bear [2]) qui donnerait dans notre cas, en régime permanent, $a_0 = K_S/L \approx 0.256 \text{ j}^{-1}$. Ce résultat est très intéressant car il généralise la loi de Dupuit-Forchheimer au régime non stationnaire de décharge d'une nappe.

3. Infiltration dans les berges sèches d'un cours d'eau lors d'une onde de crue

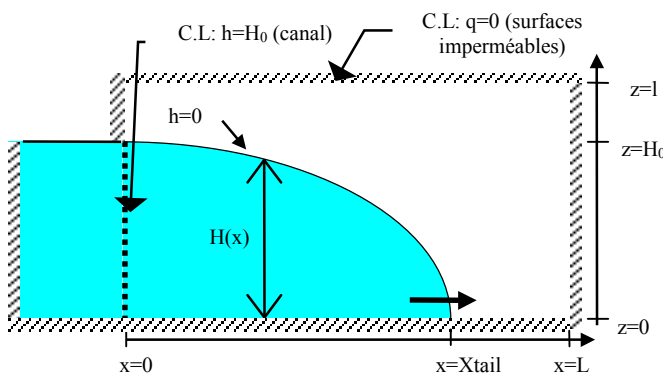


Fig. 8: Schéma du problème du front de saturation de Polubarinova -Kochina (1962).

Polubarinova-Kochina [3] donne la position $H(x,t)$ de la surface libre dans le sol, à partir de laquelle on en déduit le débit spécifique entrant à l'interface canal/sol $Q_0(t)$, et celle de la tête du front de saturation sur le plancher imperméable $x_{tail}(t)$:

$$\frac{H}{H_0} \approx -c \left(\frac{x\sqrt{\Phi}}{\sqrt{2KH_0t}} - c \right) - \frac{1}{4} \left(\frac{x\sqrt{\Phi}}{\sqrt{2KH_0t}} - c \right)^2 - \frac{1}{72c} \left(\frac{x\sqrt{\Phi}}{\sqrt{2KH_0t}} - c \right)^3 + \frac{1}{576c^2} \left(\frac{x\sqrt{\Phi}}{\sqrt{2KH_0t}} - c \right)^4 \dots$$

$$x_{tail} = c \sqrt{\frac{2KH_0}{\Phi}} \sqrt{t} \quad \text{et} \quad Q_0 = \frac{79c}{144} \sqrt{\frac{KH_0\Phi}{2}} \frac{1}{\sqrt{t}}$$

avec, pour $x = 0$, $1 = c^2(1 - 1/4 + 1/72 + 1/576 + \dots) \Rightarrow c \approx 1.14277$.

Ces formules résultent des équations de Boussinesq supposant un écoulement saturé quasi-horizontale (Dupuit), et un drainage-remplissage instantané de la porosité lors des

Le problème du stockage d'eau dans les berges lors du passage d'une onde de crue revient à étudier l'imbibition horizontale d'un sol sec de conductivité saturée K et de porosité efficace Φ , à partir d'un canal de hauteur d'eau fixée ($H_0=5$ m). Un front de saturation se forme et avance sur le plancher imperméable.

mouvements de la surface libre. On a tenté de simuler ce type de comportement numériquement, en régime variablement saturé, avec BIGFLOW.

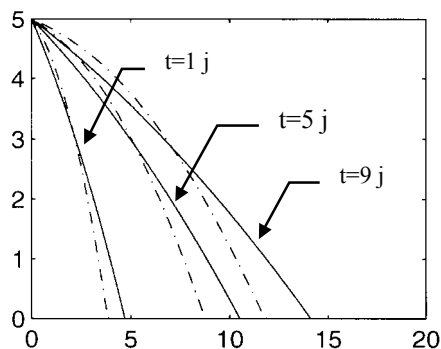


Fig. 9: Surface libre dans le sol à $t=1, 5, 9$ jours. Comparaison numérique (· · ·), analytique (—).

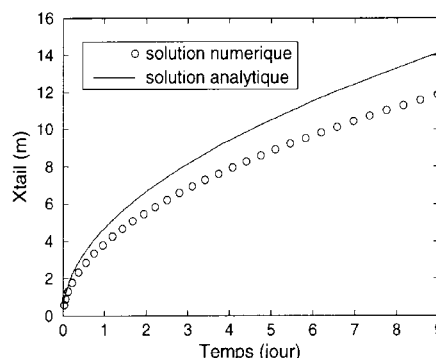


Fig. 10: Position de la tête du front de saturation $X_{tail}(t)$. Comparaison numérique, analytique.

Les simulations montrent un front de diffusion insaturé en aval de la surface libre. Celle-ci recoupe la surface libre analytique (Fig. 9), et la tête du front de saturation avance moins vite que la solution analytique tout en ayant la même croissance en $t^{1/2}$ (Fig. 10). Pour se rapprocher de la solution analytique, nous avons introduit une forte anisotropie de conductivité, qui force un écoulement quasi-horizontale, et nous avons joué sur les paramètres n et α de la courbe de rétention $\theta(h)$ (modèle Van Genuchten). De grandes valeurs des paramètres α et n sont nécessaires pour représenter un sol grossier. Augmenter le paramètre d'échelle α a pour effet de diminuer la frange capillaire, mais il reste à tester la sensibilité de la solution à l'exposant n .

Conclusion

L'utilisation d'un modèle d'écoulement à saturation variable, hétérogène et anisotrope, couplant directement les écoulements saturés et non saturés, nous a permis de suivre numériquement l'évolution multidimensionnelle de zones partiellement saturées telles que nappes phréatiques, nappes inverses, nappes perchées, fronts de saturation, en observant leurs naissances, interactions, disparitions. De plus, les expérimentations numériques présentées ici reproduisent bien certains phénomènes d'écoulements à saturation variable observés dans les sols et aquifères d'un bassin : nappes perchées transitoires dans un bassin au sous-sol hétérogène; alimentation par une nappe d'accompagnement du débit de base d'un cours d'eau en décrue (loi de tarissement et loi globale de perte de charge); infiltration latérale d'un canal en crue et stockage dans les berges (loi d'avancement du front de saturation). Ces expérimentations sont poursuivies dans le but de mieux représenter les écoulements associés à différents types d'interfaces et de milieux, y compris anisotropes, fissurés, et macroporeux. *Remerciements:* Ce projet a été partiellement financé par le Programme Hydrobag du GIS Ecobag, et par le Programme National de Recherche en Hydrologie (PNRH).

Références bibliographiques

- [1] Ababou R, Bagtzoglou A.C.: *BIGFLOW, a Numerical Code for Simulating Flow in Variably Saturated Heterogeneous Geologic Media: Theory and User's Manual 1.1*, NUREG/CR-6028. Report. U.S. NRC, Government Printing Office, Washington DC, 1993.
- [2] Bear J. : *Dynamics of Fluids in Porous Media*, Ch. 8. Dover Publications, New York, 1988.
- [3] Polubarinova-Kochina P.YA. : *Theory of Ground Water Movement*, Ch. 13. Translated from the russian by J.M. Roger de Wiest, Princeton University Press, Princeton, New Jersey, 1962.