

Modélisation du transfert d'eau et de chaleur à travers la craie non saturée avec un schéma à double porosité - Validation avec des données expérimentales depuis la surface du sol jusqu'à la nappe

Thiéry D.¹, Amraoui N.¹

(1) BRGM, F-45060 Orléans, France
d.Thiery@brgm.fr, n.amraoui@brgm.fr

MOTS CLÉS : ZNS crayeuse, Modélisation à double porosité, Transfert de chaleur

RÉSUMÉ

Afin d'améliorer la compréhension des inondations par remontée de nappe dans les bassins versants crayeux observées dans le nord de la France, un site expérimental a été mis en place dans le bassin de Hallue, situé dans le bassin de la Somme (France).

La craie fracturée non saturée recouvrant l'aquifère crayeux a été suivie pour comprendre sa réaction aux événements de pluie longs et abondants lorsqu'elle atteint un état de quasi-saturation. La teneur en eau et la température du sol ont été suivis jusqu'à une profondeur de 8 m, et la pression matricielle jusqu'à la nappe phréatique, à 26 m de profondeur. Le suivi s'est déroulé sur une période de 2,5 ans (en 2006-2008) dans des conditions naturelles et pendant deux périodes de forte infiltration artificielle.

Le code de calcul MARTHE, qui modélise l'écoulement et le transfert de chaleur dans le continuum Zone-non-saturée-Zone saturée, a été adapté pour reproduire avec un schéma à double porosité les périodes de forte saturation observées. Des lois de rétention et de perméabilité composites, intégrant l'augmentation de la perméabilité proche de la saturation et l'augmentation de la porosité disponible résultant des fractures, ont été introduites dans le code. Avec ces lois composites, les teneurs en eau et les pressions mesurées à toutes les profondeurs pendant toute la période sont bien simulées par le modèle, y compris pendant les périodes de forte infiltration artificielle. La température de l'eau dans le sol a également été bien simulée à toutes les profondeurs, ce qui contribue à la validation du modèle. Le modèle a été utilisé pour calculer la recharge de l'aquifère sur une longue période incluant des sécheresses et des hautes eaux. La recharge calculée est réaliste car elle permet de simuler les niveaux piézométriques observés.

INTRODUCTION

Cet article décrit la modélisation des écoulements à travers la craie fracturée non saturée, à partir des données recueillies jusqu'à des profondeurs de 23 m sur le site expérimental de Warloy-Baillon pendant 2,5 ans. Un modèle d'écoulement verticalement discrétisé résolvant l'équation de Richards, avec des lois caractéristiques (pression-saturation et perméabilité-saturation) composites a permis de simuler toutes les données recueillies sur le site expérimental, y compris pendant les expériences d'infiltration artificielle. Les données simulées comprennent la teneur en eau (et la température) dans le sol jusqu'à 8 m de profondeur et la pression jusqu'à la nappe phréatique. L'article décrit également comment les données mesurées ont été utilisées pour établir les lois caractéristiques composites du modèle en intégrant l'augmentation de la perméabilité à l'approche de la saturation et l'augmentation de porosité disponible résultant des fractures. Les fonctions composites permettent en particulier modéliser des conditions très humides pendant lesquelles l'écoulement préférentiel par les fractures est prédominant.

SITE EXPÉRIMENTAL ET DONNÉES DISPONIBLES

Le site expérimental est situé à Warloy-Baillon dans le bassin de l'Hallue (Somme, Nord de la France), à 21 km au nord-est d'Amiens. Dans le bassin de l'Hallue, l'aquifère est constitué par les formations perméables de craie du Turonien supérieur et du Sénonien, qui sont recouvertes de plusieurs mètres de limons quaternaires sur le plateau et d'alluvions dans la vallée. La couche de craie non-saturée atteint 30 à 50 m d'épaisseur sur le plateau. La rivière Hallue draine l'aquifère de la Craie aussi bien en basses eaux qu'en hautes eaux.

Le site a été équipé pour suivre les paramètres contrôlant la recharge dans la craie non-saturée et saturée. La teneur en eau et la température ont été suivies dans le sol et la craie non-saturée entre 0,2 et 8 m de profondeur. La pression a été mesurée depuis la surface jusqu'à la nappe phréatique. Les mesures ont été effectuées pendant la période 2006-2008. Quelques épisodes de recharge naturelle importante ont eu lieu durant cette période. En outre deux expériences de forte infiltration artificielle ont été réalisées en mai 2007 et en avril 2008 pour simuler les conditions d'inondation (Amraoui et al. 2008b).

Évolution temporelle des paramètres hydrauliques dans des conditions naturelles

Aux profondeurs comprises entre 0,5 et 8 m, les variations de teneur en eau sont faibles, de l'ordre de 1 à 2% (Fig. 4), et des mesures très précises sont donc nécessaires pour en déterminer les variations. Au cours de l'expérience d'infiltration de mai 2007, la teneur en eau mesurée était significativement plus élevée que dans les conditions naturelles, y compris les périodes de forte recharge.

Analyse de l'expérience d'infiltration de mai 2007

L'expérience d'infiltration de mai 2007 a été analysée au pas de temps horaire. À chaque profondeur, les « temps de réaction » de la variation de teneur en eau et de pression ont été déterminés. L'augmentation de la teneur en eau à chaque profondeur a été rapide. La pression a également augmenté rapidement. Il n'a fallu que 21 heures pour que l'augmentation atteigne une profondeur de 8 m (0,38 m/h) et 32 heures pour atteindre une profondeur de 19 m (0,59 m/h) (Fig. 7). Ces réactions étaient rapides car la teneur en eau au début de l'expérience était relativement élevée jusqu'à 8 m de profondeur. Après le temps de réaction, la pression était presque nulle, ce qui correspond à un gradient vertical de charge hydraulique proche de 1. L'eau s'infiltrant en surface à un débit de 289 mm/j, avec un gradient hydraulique de 1, la perméabilité est donc estimée à au moins 289 mm/j.

DÉTERMINATION DES LOIS CARACTÉRISTIQUES DANS LA ZONE NON-SATURÉE

Détermination des lois de rétention

Les lois de rétention décrivent la relation succion (ou pression) en fonction de la teneur en eau. Pour modéliser correctement le flux naturel, les lois de rétention ont été déterminées en utilisant les valeurs mesurées *in situ* plutôt que d'expériences en laboratoire. La succion a été représentée en fonction de la teneur en eau à chaque profondeur de mesure entre 0,2 et 8 m. Les données montrent une hystérésis considérable - à une profondeur donnée, la même teneur en eau peut correspondre à des succions très différentes. L'hystérésis a cependant tendance à diminuer avec la profondeur. Pendant l'expérience d'infiltration, la teneur en eau est beaucoup plus grande que dans des conditions naturelles. Cette augmentation de la teneur en eau est due à un effet de double porosité : les volumes de fracture dans la craie ne sont accessibles que très proche de la saturation (à faible succion).

Pour caractériser la loi de rétention, on a essayé d'utiliser une loi homographique, généralement adaptée aux milieux poreux classiques. Cependant, une telle loi homographique n'a pas pu

reproduire les effets de double porosité. Un essai d'utiliser une loi de Van Genuchten (1980) n'a pas donné de meilleurs résultats. (Voir Fig. 1, à 6,50 m de profondeur)

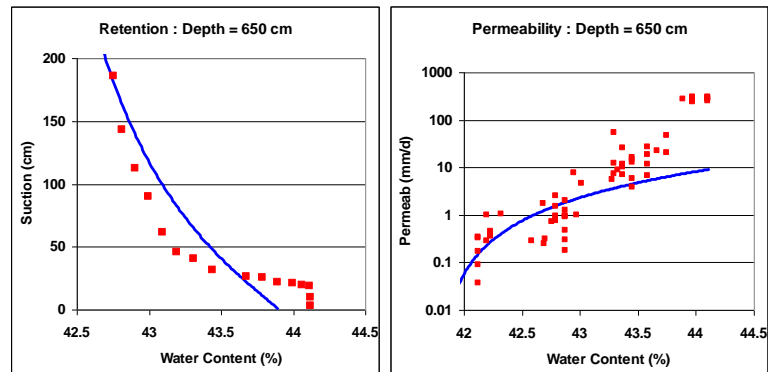


Figure 1 – Essai d'utilisation d'une loi classique de rétention (à gauche) et de perméabilité (à droite)

Il était donc nécessaire de modifier la formulation de rétention pour l'adapter aux données mesurées. Une loi de rétention composite, à simple porosité, un peu similaire à celle de Brouyère (2006), a été choisie pour représenter le milieu poreux fracturé. On a utilisé une fonction associant deux lois homogographiques (Thiéry et al., 2018) : une pour la matrice poreuse et une autre pour les teneurs en eau supérieures à un seuil correspondant à la mise en action des fractures (Fig. 2).

Détermination des lois de perméabilité à partir des données de terrain

Une « fonction puissance » simple, généralement bien adaptée aux milieux poreux standards, a d'abord essayée mais comme prévu par l'analyse de l'expérience d'infiltration de mai 2007, cette fonction n'a pas été en mesure d'ajuster toute la gamme des valeurs de perméabilité calculées à partir des observations. La loi de perméabilité « puissance » ajustée sur les teneurs en eau faibles à moyennes sous-estimait considérablement les perméabilités correspondant à une saturation plus élevée. Cela prouve qu'en raison des fractures dans la craie, la perméabilité verticale est considérablement plus grande quand le milieu est proche de la saturation.

En utilisant la même approche que pour la loi de rétention, une loi de perméabilité composite simple a été définie (Thiéry et al., 2018).

La loi de perméabilité composite a été ajustée aux données de toutes les profondeurs où les teneurs en eau ont été mesurées. Les lois composites obtenues aux 8 profondeurs permettent de reproduire correctement les données mesurées aussi bien en condition naturelle que lors de l'expérience d'infiltration (Fig. 2). À la profondeur de 6,5 m, par exemple, la loi de perméabilité intégrant les fractures donne une perméabilité à saturation de 450 mm/j, soit 50 fois supérieure à la perméabilité à saturation de la seule matrice poreuse.

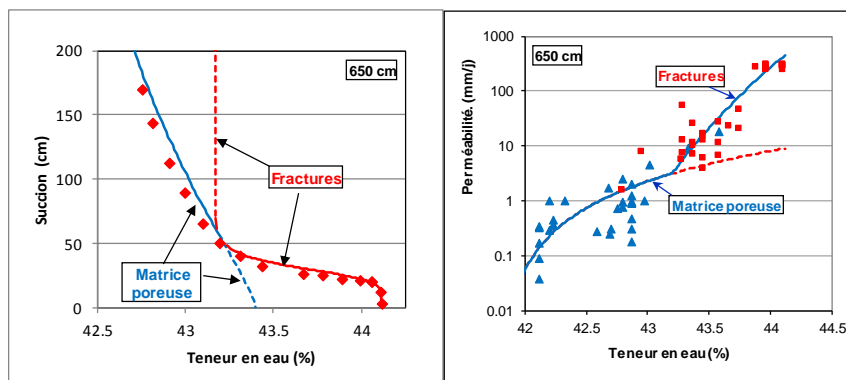


Figure 2 – Loi de rétention composite (à gauche) et loi de perméabilité composite (à droite)

En convertissant la teneur en eau en pression, par la loi de rétention correspondante, on a obtenu à chaque profondeur la relation perméabilité en fonction de la pression. Il apparaît que la perméabilité augmente brutalement, généralement lorsque la pression dépasse -50 cm (Fig. 3), ce qui correspond aux résultats rapportés par divers auteurs.

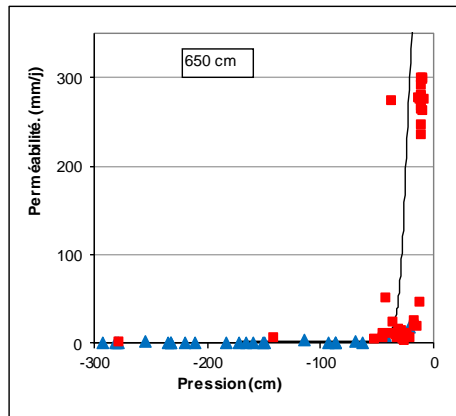


Figure 3 – Augmentation de la perméabilité aux pressions supérieures à -50 cm

MODÉLISATION NUMÉRIQUE DES ÉCOULEMENTS DE LA PÉRIODE 2006-2008

On a utilisé le code de calcul MARTHE (Thiéry, 2015a, 2015b, 2015c), qui permet de modéliser le continuum zone non saturée-zone saturée en utilisant une approche 3D en volumes finis. Le code de calcul résout l'équation de Richards numériquement pour calculer la pression, la teneur en eau et la vitesse de pores. Pour permettre les écoulements préférentiels par les fractures, les lois de rétention et de perméabilité composites décrites plus haut ont été introduites dans le code. Le module de transfert de chaleur couplé du code prend en compte le transfert par advection, la conduction thermique et la dispersion. Les principes de la modélisation mise en œuvre sont décrits en détails par Thiéry et al. (2018). Comme la surface du sol est quasi horizontale et uniformément recouverte d'herbe, on a choisi une modélisation verticale 1D.

Discrétisation et conditions aux limites

Le domaine modélisé s'étend depuis la surface du sol jusqu'à une profondeur de 27 mètres, ce qui correspond à la profondeur de la nappe la plus profonde enregistrée. Le domaine est discrétisé en mailles de tailles variables, de 25 cm près de la surface à 100 cm en profondeur.

À la limite inférieure du modèle correspondant au niveau de nappe observé le plus bas de la période modélisée, une pression égale à zéro a été imposée. À la limite supérieure du modèle, on a introduit les flux météorologiques mesurés : les précipitation et l'évapotranspiration potentielle ETP. À partir de l'ETP, le modèle calcule l'évapotranspiration réelle ETR, la somme de l'évaporation et de la transpiration par la végétation, en faisant intervenir une « succion maximale possible » correspondant à la succion maximale mesurée dans la zone racinaire comme expliqué par Thiéry et al., (2018).

La période 2006-2008 a été modélisée avec les données météorologiques journalières, avec un pas de temps de calcul interne automatiquement réduit quand nécessaire pour atteindre une convergence et un équilibre hydrique parfaits. L'expérience d'infiltration de mai 2007 a été modélisée en utilisant un pas de temps d'entrée horaire. Pour cette période, le flux d'infiltration a été ajouté aux valeurs de pluie.

RÉSULTATS DE LA MODÉLISATION HYDRAULIQUE

Simulation journalière de la période 2006-2008

Une comparaison de l'évolution temporelle des teneurs en eau observées et simulées aux profondeurs comprises entre 1,5 m et 8 m (Fig. 4) a montré que les variations étaient bien simulées à toutes les profondeurs.

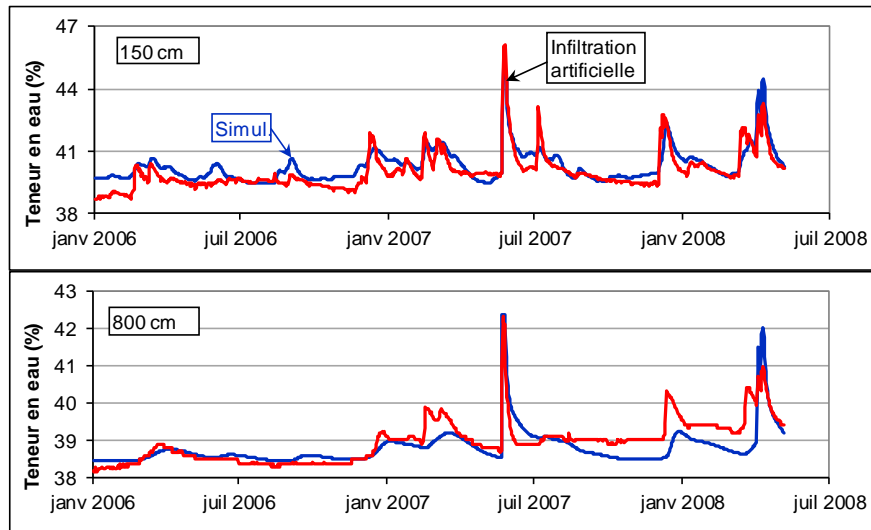


Figure 4 – Simulation de l'évolution de la teneur en eau à 0.5 m et à 8 m de profondeur

La comparaison de l'évolution temporelle des pressions observées et simulées aux profondeurs comprises entre 0,5 m et 14 m (Fig. 5) montre qu'elles sont généralement raisonnablement bien simulées. Cependant, la pression simulée à 14 m tend à être atténuée, peut-être en raison d'écoulements latéraux pour contourner des hétérogénéités, ce qui ne peut être traité avec une modélisation 1D. Compte tenu de l'hystérésis considérable qui a été observée, il n'est pas surprenant qu'il ne soit pas possible d'obtenir un ajustement parfait pour les teneurs en eau et les pressions d'une profondeur donnée.

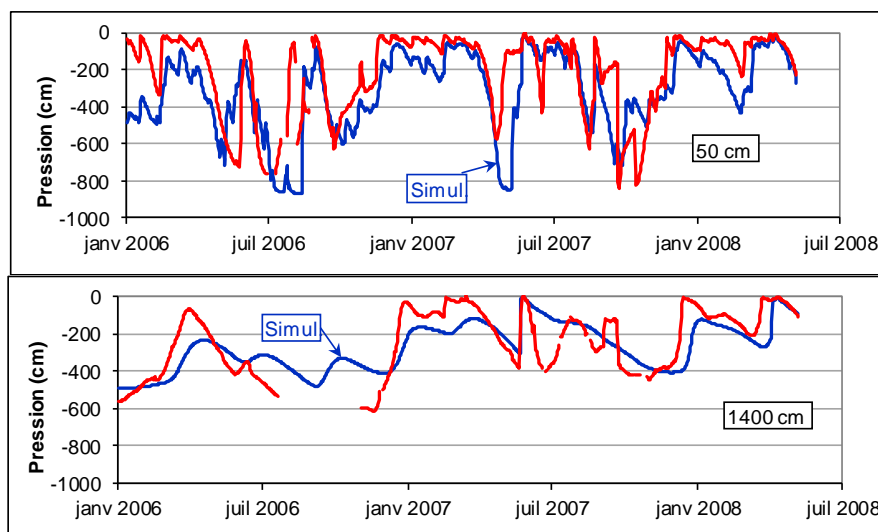


Figure 5 – Simulation de l'évolution de la pression à 0.5 m et à 14 m de profondeur

Simulation horaire de l'expérience d'infiltration de mai 2007

Une comparaison des teneurs en eau observées et simulées aux profondeurs comprises entre 1 m et 8 m a montré que les variations de teneur en eau étaient bien simulées en amplitude et en temps. (Fig. 6). Le temps de réaction de l'augmentation de pression a été raisonnablement bien simulé jusqu'à 8 m de profondeur. Aux profondeurs comprises entre 8 m et 19 m, l'ajustement est plus approximatif, ce qui peut s'expliquer par la nature beaucoup plus erratique des mesures de pression (Fig. 7).

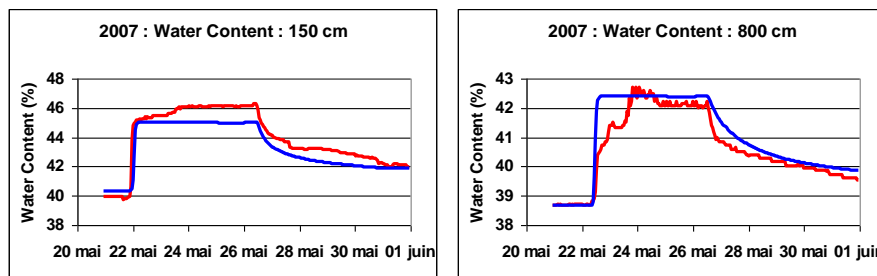


Figure 6 – Expérience d'infiltration artificielle (simulation au pas de temps horaire)

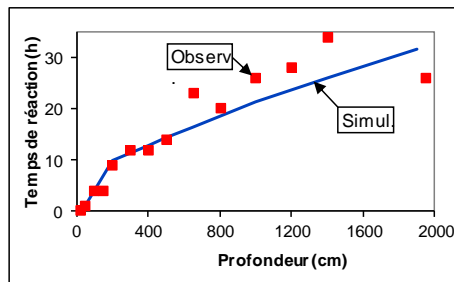


Figure 7 – Temps d'arrivée de l'augmentation de pression pendant l'expérience d'infiltration

VALIDATION DU MODÈLE

Validation du modèle par la simulation des températures dans la zone non saturée

Dans un but de validation, on a modélisé, avec le même modèle et les mêmes paramètres hydrauliques, le transfert de chaleur dans la ZNS. On a choisi des paramètres standard pour la conductivité thermique minérale ($2,5 \text{ W/m}^{\circ}\text{K}$) et la chaleur volumétrique spécifique minérale ($2,4 \cdot 10^6 \text{ J/m}^3/\text{K}$) et une dispersivité thermique longitudinale égale à 0. Avec ces paramètres supplémentaires, les températures suivies à jusqu'à 8 m de profondeurs ont été bien simulées pendant la période précédant l'expérience d'infiltration de 2007 (Fig. 8) mais nettement moins bien après.

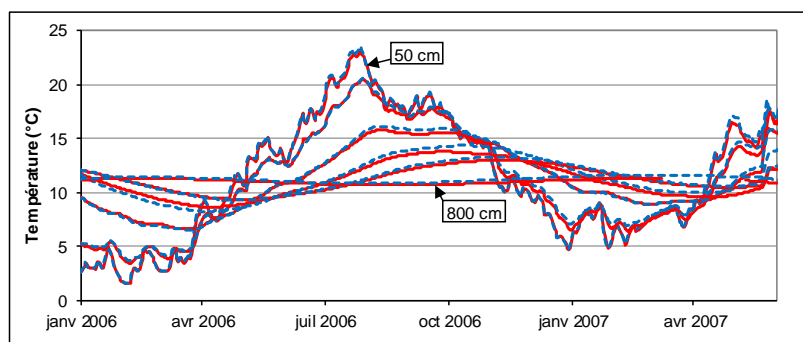


Figure 7 – Simulation des températures dans la zone non saturée de 0.5 m à 8 m de profondeur

La difficulté à simuler le transfert de chaleur lors de l'expérience d'infiltration confirme qu'une grande partie de l'eau s'écoule à travers le réseau de fractures. La schématisation à simple porosité à lois caractéristiques composites, qui simule correctement le débit, même dans des conditions extrêmes, est une approximation qui est moins adaptée à la simulation du transfert de soluté ou de chaleur.

Validation du modèle par la simulation des niveaux de nappe pendant une longue durée

Comme la teneur en eau et la pression n'ont été suivies que pendant 2,5 ans, d'autres données ont été utilisées pour valider le modèle sur de longues périodes comprenant des crues et des sécheresses. Pour ce faire, on a utilisé les niveaux piézométriques suivis à Senlis-Le-Sec (à 3,5 km de distance). On a calculé la recharge journalière de l'aquifère en bas du modèle numérique MARTHE en utilisant les précipitations journalières de Bernaville pendant les 20 ans de la période 1988-2008. La série de recharge de l'aquifère calculée a ensuite été converties en niveaux piézométrique avec un modèle hydrologique à réservoir classique (Thiéry, 2015d).

La Fig. 9 montre qu'une simulation précise des niveaux de nappe a été obtenue (coefficient de corrélation égal à 0,927) aussi bien en périodes d'étiage que de hautes eaux (années 1994, 1995, 2001 et 2002). En particulier, les niveaux de nappe pendant la crue historique de 2001 ont été simulés correctement. La période de 2008 a toutefois été sous-estimée.

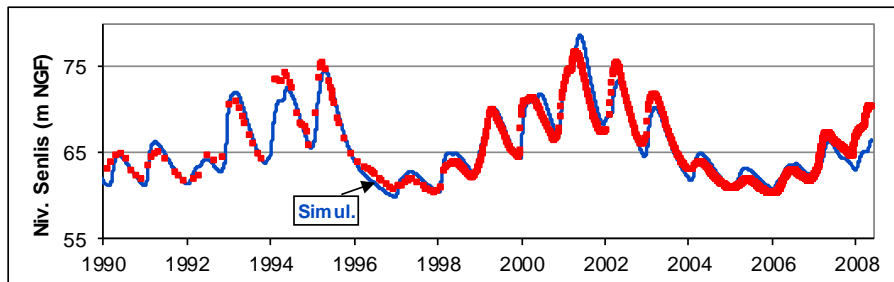


Figure 9 – Niveau du piézomètre Senlis-Le-Sec observé et simulé de 1990 à 2008

RÉSUMÉ ET CONCLUSIONS

Les données recueillies sur le site de Warloy-Baillon au cours de la période 2006-2008 sur toute l'épaisseur de la ZNS ont permis de déterminer in situ les paramètres hydrauliques nécessaires à la simulation sans avoir à s'appuyer sur les données de la littérature. L'expérience d'infiltration à fort débit a été essentielle pour définir les lois de rétention et de perméabilité en zone non-saturée. Les données recueillies ont confirmé l'hypothèse d'une augmentation soudaine de la perméabilité pour une succion inférieure à environ 50 cm et de l'augmentation de la porosité à mesure que les fractures commencent à être conductrices. Le seuil de perméabilité correspondant de l'ordre de 2 à 8 mm/j. L'expérience d'infiltration a montré que la perméabilité à saturation intégrant les fractures dépasse 300 mm/j ($3,5 \cdot 10^{-6}$ m/s).

Les données mesurées ont été modélisées en utilisant le code de calcul MARTHE en utilisant une approche à simple porosité avec des lois de rétention et de perméabilité composite. La modélisation a été réalisé quasiment sans calibration et a permis de simuler correctement l'évolution des teneurs en eau jusqu'à une profondeur de 8 m et également - ce qui, à notre connaissance, est nouveau - les variations de pression jusqu'à 23 m. Les teneurs en eau et les pressions pendant l'expérience d'infiltration ont également été simulées avec précision au pas de temps horaire, ce qui montre que la dynamique du débit rapide a été bien reproduite.

Le modèle a été vérifié en utilisant la recharge calculée au bas du modèle pour simuler le niveau de la nappe libre pendant une période de 20 ans. Ce n'est pas réellement une validation, mais cela renforce la confiance dans l'approche de modélisation utilisée. Cela confirme également la possibilité d'utiliser, avec précaution, le modèle à l'échelle locale.

L'analyse de la simulation de la période 1988-2008, intégrant la crue historique de 2001, a montré cependant que l'effet des fractures à forte saturation des lois de rétention et de perméabilité était

rarement activé. En effet le flux d'écoulement à travers la ZNS était la plupart du temps inférieur à 8 mm/j, donc inférieur au seuil auquel d'activation de l'écoulement préférentiel par les fractures. Pour vérifier les possibilités de modélisation du schéma sélectionné, les variations de température jusqu'à une profondeur de 8 m ont été modélisées sans étalonnage supplémentaire du modèle. La température a été bien simulée dans des conditions naturelles mais moins bien pendant l'expérience d'infiltration. Cela confirme qu'un modèle de simple porosité, qui suppose implicitement un équilibre instantané entre la matrice et les fractures, peut modéliser avec précision la teneur en eau et le débit, mais moins bien les transferts de solutés ou de chaleur. En effet, dans le milieu fracturé réel, la masse en solution ou la chaleur est transférée très rapidement à travers le réseau de fractures, sans avoir suffisamment de temps pour que l'échange avec la matrice se produise ou pour atteindre l'équilibre.

Remerciements

Ces résultats ont été obtenus dans le cadre du projet INTERREG III-A FLOOD1, un projet conjoint entre le BRGM, l'Université de Brighton (Royaume-Uni) et le British Geological Survey (BGS). Les partenaires financiers étaient les fonds FEDER, le MEDAD (Ministère de l'Écologie et du Développement Durable) par l'intermédiaire de la DIREN de Picardie, le Conseil Régional de Picardie et le Conseil Général de la Somme.

Références bibliographiques :

- Amraoui, N., Noyer, M.L., Wuilleumier, A., Chrétien, P., Feret, M.J., Bertrand, L., Poinclou, C., 2008b. Projet INTERREG III-A FLOOD1. Rôle des eaux souterraines dans le déclenchement des crues : Instrumentation et suivi du site expérimental de la Somme, caractérisation hydrodynamique de la craie. BRGM/RP-56632-FR report, 121 p.
<http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-56632-FR.pdf> (accès Avril 2018).
- Brouyère, S., 2006. Modelling the migration of contaminants through variably saturated dual-porosity, dual-permeability chalk. J. Contam. Hydrol. 82, 195-219. <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2005.10.004> (accès Avril 2018).
- Thiéry, D., 2015a. Code de calcul MARTHE – Modélisation 3D des écoulements dans les hydrosystèmes - Notice d'utilisation de la version 7.5. Rapport BRGM/RP-64554-FR, 306 p., 150 fig.
<http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-64554-FR.pdf> (accès Avril 2018).
- Thiéry, D., 2015b. Modélisation 3D du transport de masse et du transfert thermique avec le code de calcul MARTHE – version 7.5. Rapport BRGM/RP-64765-FR, 324 p., 158 fig.
<http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-64765-FR.pdf> (accès Avril 2018).
- Thiéry, D. (2015c) – Modélisation 3D des écoulements en Zone Non Saturée avec le code de calcul MARTHE – version 7.5. Rapport BRGM/RP-64495-FR. 87 p., 32 fig.
<http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-64495-FR.pdf> (accès Avril 2018).
- Thiéry, D., 2015d. Validation du code de calcul GARDÉNIA par modélisations physiques comparatives. Rapport BRGM/RP-64500-FR, 48 p., 28 fig.
<http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-64500-FR.pdf> (accès Avril 2018).
- Thiéry D., Amraoui N., Noyer, M.L. (2018) - Modelling flow and heat transfer through unsaturated Chalk – Validation with experimental data from the ground surface to the aquifer. Journal of hydrology, Volume 556C, 2018, pp 660-673.
- Van Genuchten M.T., 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Sci. Soc. Amer. J., 44, p. 892-898. doi:10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x