



HAL
open science

MODÉLISATION DES TRANSPORTS D'EAU, DE CHALEUR ET DE SOLUTÉ SOUS UN BASSIN DE D'INFILTRATION

André Baudoin, Jean Paul Gaudet, Arnaud Foulquier, Florian Malard

► **To cite this version:**

André Baudoin, Jean Paul Gaudet, Arnaud Foulquier, Florian Malard. MODÉLISATION DES TRANSPORTS D'EAU, DE CHALEUR ET DE SOLUTÉ SOUS UN BASSIN DE D'INFILTRATION. 1er symposium méditerranéen de geoengineering (SMGE'09), Jun 2009, Alger, Algérie. pp 210-217. hal-00423968

HAL Id: hal-00423968

<https://hal.science/hal-00423968>

Submitted on 13 Oct 2009

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

MODÉLISATION DES TRANSPORTS D'EAU, DE CHALEUR ET DE SOLUTÉ SOUS UN BASSIN DE D'INFILTRATION

BAUDOIN André¹, GAUDET Jean-Paul²,
FOULQUIER Arnaud³ & MALARD Florian³

andre.baudoin@ujf-grenoble.fr

¹ : *Lab d'Études des Transferts en Hydrologie et Environnement ; Univ Joseph Fourier ; Grenoble ; France*

² : *Lab d'Études des Transferts en Hydrologie et Environnement ; CNRS ; Grenoble ; France*

³ : *Ecologie des Hydrosystemes Fluviaux, CNRS, UMR 5023, Universite de Lyon 1 ; France*

RÉSUMÉ : *L'urbanisation amène à imperméabiliser de façon massive la surface du sol, et donc à créer des bassins d'infiltration pour les eaux de pluie. Ces bassins provoquent des transports importants (hydriques, soluté, chaleur) qui peuvent perturber et polluer la nappe sous-jacente. Le milieu étant généralement très hétérogène, le calage entre expérimentation et modélisation est rarement satisfaisant à cause de la difficulté pour faire des mesures (accès au sous sol, faible densité et bruit). Nous proposons ici une étude numérique de l'influence de l'hétérogénéité du sol sur la répartition des champs de concentration en soluté et de température engendrés par un bassin d'infiltration. La modélisation confirme que l'évolution des concentrations en soluté est très bruitée par les hétérogénéités de perméabilité du sol. Le champ de température est beaucoup moins perturbé par les hétérogénéités, et donc plus facilement interprétable.*

MOTS CLÉS : *bassin d'infiltration, transferts de chaleur et de soluté, zones non-saturée et saturée*

ABSTRACT : *Urbanization leads to the intensive waterproofing of the ground surface thus creating infiltration basins for rainwater. The subsoil immediately beneath these basins is therefore the focal point of considerable transport (hydrous, solute, heat) which can perturb and pollute the aquifer. The subsoil is generally heterogeneous, thus the adjustment between experimentation and simulation is relatively difficult due to the random representivity of the measure used. This problem exists for the electrical measurement (resistivity) of the quality of the water depending on the solute concentration. The authors propose here a study of the influence of the heterogeneousness of the soil on the temperature and the distribution of the solute concentration fields produced by an infiltration basin. This method of measurement is not as sensitive to heterogeneousness and therefore its interpretation is made easier.*

KEYWORDS : *infiltration basin, transport of heat and solute, vadose and saturated zone*

Introduction

Les communautés urbaines se préoccupent de plus en plus de l'état des nappes souterraines à proximité des grands centres urbains. Ainsi, il a été mesuré une augmentation des températures et une dégradation de la qualité des eaux sous les villes, ceci pouvant être dû à plusieurs facteurs : imperméabilisation partielle de la surface et donc modification de la localisation et de l'intensité des flux d'infiltration (d'eau ayant lessivé des surfaces chargées en éléments chimiques) et des flux de chaleur, croissance exponentielle des systèmes de climatisation "géothermiques",... Une de ces préoccupations concerne les bassins d'infiltration.

L'accroissement des surfaces imperméabilisées conduit à gérer l'évacuation de flux importants de collecte des pluies météoriques dans des bassins d'infiltration implantés au pourtour des villes lorsqu'il n'existe pas de rivière à proximité. Ces ouvrages ne sont pas sans conséquences sur les aquifères sous-jacents. On observe à l'aplomb et à l'aval de ces bassins des perturbations du sous-sol dont : des variations des températures en fonction des apports et des saisons, une "pollution" par une eau de surface qui s'est chargée en soluté lors de son

ruissellement. La particularité de ces deux phénomènes réside dans la nature des flux d'infiltration, caractérisés par des débits importants d'eau chargée de polluant, à température différente de celle du sol, ceci sur une petite surface. Il devient alors important de connaître l'impact de ces bassins sur l'eau du sous-sol, laquelle peut parfois être en relation directe ou indirecte avec des ouvrages de pompage.

Le premier volet de notre travail, au sein d'un projet plus vaste sur l'agglomération lyonnaise, essaie de répondre, par la modélisation, à une double interrogation : comment se propagent les panaches de perturbations thermiques et de solutés et quelle est la représentativité des mesures très locales dans des piézomètres. Le suivi de la qualité d'eau de la nappe se fait au moyen de capteurs de température et de conductivité électrique pour la concentration en soluté transporté par l'eau. Mais du fait de l'hétérogénéité du terrain, et de la difficulté à appréhender les chemins de l'eau, il est probable qu'une mesure ponctuelle de concentration ne soit pas représentative de l'état de "pollution" d'un volume plus important. En parallèle, la mesure de la différence de température entre l'eau infiltrée et celle des piézomètres, donne une information complémentaire et différente sur la propagation des perturbations, puisque la chaleur se propage dans le squelette solide de l'aquifère.

En utilisant les codes de calcul HST3D et SUTRA, développés par l'USGS, nous écrivons une modélisation des transferts de l'eau, de ses solutés et de chaleur dans le sous-sol hétérogène, en zones saturée et non-saturée, influencées par un bassin d'infiltration (bassin Django Reinhard). Les codes de calcul utilisés présentent l'intérêt, outre les multiples validations, d'être ouverts, et donc modifiables. Le maillage réalisé est actuellement en 2D vertical, dans un plan de symétrie du bassin d'infiltration et parallèle à l'écoulement de l'aquifère. La modélisation permet d'analyser l'influence d'hétérogénéités de perméabilités du sol sur le transport de soluté et de chaleur. Les résultats montrent que l'évolution de la température est influencée par la présence d'eau infiltrée, mais que la diffusion de la chaleur dans le solide gomme assez rapidement l'effet des hétérogénéités alors que la variation de concentration est très sensible à la présence d'hétérogénéités et donc de la position du point de mesure.

La généralité de ces résultats devra être fondée sur des géométries 3D et il est également prévu de confronter ces calculs avec d'autres codes numériques (Feflow).

Présentation du modèle

Le modèle 2D simule une bande de sol verticale dans l'axe d'écoulement de la nappe souterraine (hauteur = 10 m ; longueur = 20 m). En surface, on trouve une zone correspondant au bassin d'infiltration (longueur = 5 m), décentré vers l'amont de l'écoulement de nappe. Le bassin d'infiltration a une surface de l'ordre du centième de celle de la zone drainée, ceci nous amène à choisir la condition limite pour le bassin de type charge hydraulique imposée. La limite pour la face verticale amont dépend de la simulation, et pour la face aval une pression hydrostatique est imposée. Toutes les autres surfaces limites sont considérées imperméables.

La perméabilité intrinsèque du milieu est de l'ordre de $K = 10^{-12} \text{ m}^2$ (hors hétérogénéités), ce qui correspond à une conductivité hydraulique d'environ 10^{-5} m/s , sa conductivité thermique est $\lambda = 2 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$. La température de la nappe est fixée à 10°C dans la zone amont, tandis que celle infiltrée est de 20°C (comportement estival). Les concentrations de soluté sont nulle dans la nappe en zone amont, et de $0,1 \text{ kg}_{\text{soluté}}/\text{kg}_{\text{eau}}$ pour l'eau infiltrée. Il s'agit d'un soluté non réactif qui n'interagit pas avec la matrice solide (pas de sorption-désorption).

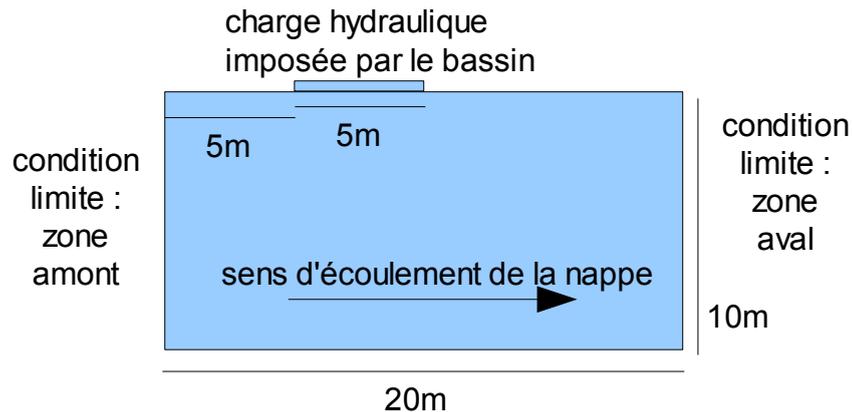


Fig 1: milieu modélisé

Comportement en zone saturée

Cette étude préalable a été menée avec le code HST3D de l'USGS (modélisation en différences finies pour les transports de chaleur et de soluté en milieu poreux saturé, en 3D ou 2D). La taille de la maille est de 0,5 m dans les deux directions. La perméabilité du sol est de 10^{-11} m^2 , pour une porosité de 0,15.

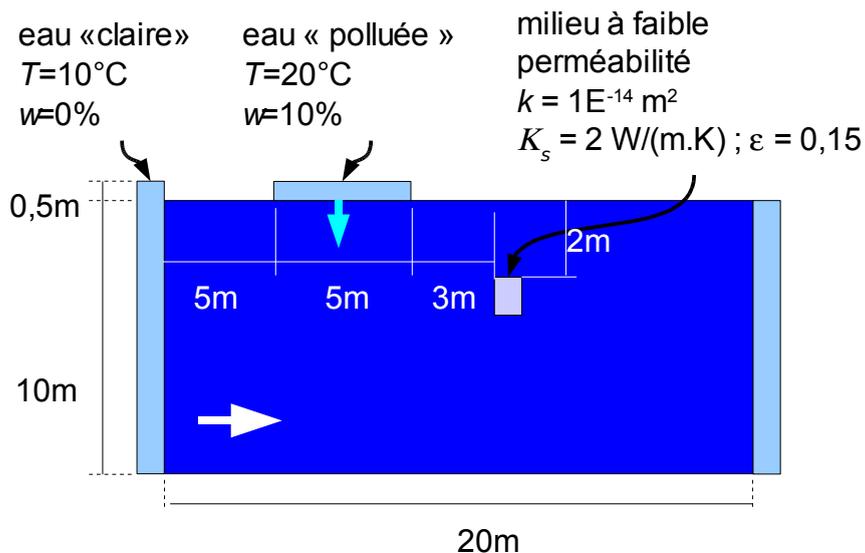


Fig 2: modélisation d'une hétérogénéité en milieu saturé

Pour cette simulation on impose en amont un flux hydraulique. Ce flux a été calculé préalablement par une simulation sans infiltration avec une charge hydrostatique amont de 50cm,. La charge hydraulique imposée par le bassin est de 50cm. L'infiltration se fait directement en zone saturée, la nappe affleure.

Dans la zone étudiée, nous plaçons une hétérogénéité carrée de 1 m de coté se trouvant à 3m en aval du bassin et 2m sous la surface du sol. Cette hétérogénéité est caractérisée par une faible perméabilité : 10^{-14} m^2 . La simulation porte sur 2000h d'infiltration en continu.

Les cartes de répartition des concentrations de soluté et des températures en fin de simulation mettent en évidence la différence de comportement. On observe qu'au bout de 2000h d'infiltration, la concentration de soluté dans l'hétérogénéité est restée constante et égale à sa valeur initiale, alors que son entourage a évolué. Au contraire, concernant le champ des températures, celui-ci n'est pas perturbé par l'hétérogénéité.

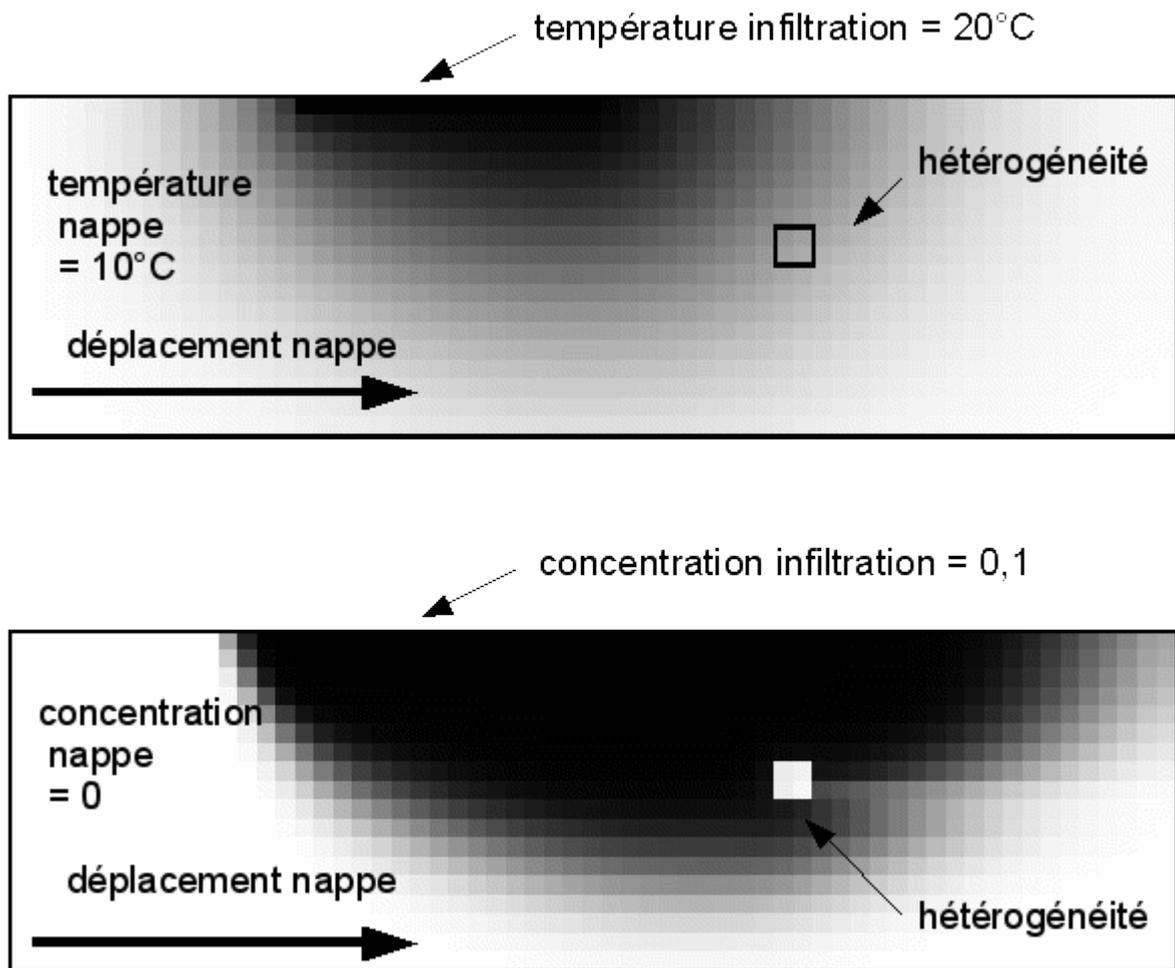


Fig 3 : champs de températures et concentrations

En conséquence, la mise en place d'un capteur mesurant la concentration de soluté dans l'hétérogénéité ne permet pas de voir passer le front de concentration, tandis qu'une mesure de température voit passer le front de température. Cependant, on constate également que dans ces conditions de simulation, la vitesse de propagation du champ de température est sensiblement plus faible que celle du champ de concentration. Ceci impose alors d'avoir une mesure relativement plus sensible, ou de considérer qu'un retard à la détection, en fonction de l'emplacement du capteur est acceptable. On voit également apparaître que malgré le déplacement de la nappe (vitesse de l'ordre de 1,7 m/h), il y a des traces de diffusion de chaleur et de soluté vers l'amont à proximité de la surface d'infiltration.

La simulation avec le code HST3D permet de calculer simultanément la température et la concentration, mais est limitée à la zone saturée. Dans ce cas, la viscosité de l'eau est reliée à sa température.

Comportement en présence d'une zone non saturée

Nous utilisons ici le code SUTRA, qui permet le calcul aussi bien en zone saturée que non-saturée. Par contre, température et saturation sont calculées séparément, et dans le cas de la concentration, la viscosité est constante.

Pour cette étude, nous comparons le comportement d'un milieu homogène en terme de perméabilité, avec un milieu "bi-hétérogène". La configuration géométrique du système étudié est la même que précédemment, hormis le fait que l'aquifère n'affleure plus, mais sa surface libre se trouve à une profondeur de 5 m au-dessous du fond du bassin d'infiltration.

Pour ce qui est des caractéristiques hydrauliques, la perméabilité est 10^{-12} m^2 en milieu homogène ; Pour le milieu "bi-hétérogène", on définit deux gammes de perméabilités : 10^{-13} à 10^{-11} m^2 et 10^{-16} à 10^{-14} m^2 . Chaque point du sol a une probabilité aléatoire de 80% d'être dans la première gamme et 20% dans la seconde. Puis sa perméabilité dans la gamme est également distribuée de façon aléatoire. En non-saturé, la pression capillaire (p_c) et la perméabilité relative de l'eau (k_r) sont conformes aux relations de Van-Genuchten :

$$S^* = \frac{S_w - S_{w, \text{res}}}{1 - S_{w, \text{res}}} = \left[1 + (a \cdot p_c)^n \right]^{\frac{n}{n-1}} \quad (1) \quad \text{et} \quad k_r = S^{*1/2} \cdot \left\{ 1 - \left[1 - (S^*)^{\frac{n}{n-1}} \right]^{\frac{n-1}{n}} \right\}^2 \quad (2)$$

avec les coefficients $a = 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$ (correspond à une charge de 0,1 m) et $n = 2$

S_w : degré de saturation du milieu

p_c : pression capillaire [Pa]

$S_{w, \text{res}}$: degré de saturation résiduel (= 0,3)

k_r : perméabilité relative de l'eau (avec ou sans soluté)

La diffusion moléculaire du soluté dans l'eau est de $10^{-9} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. La porosité du milieu est 0,35

La viscosité de l'eau est prise égale à $10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ pour le transport de soluté, et est donnée

par la loi $\mu = 239,4 \cdot 10^{-7} \times 10^{\frac{248,37}{T+133,15}}$ avec T : température [°C], pour le transport de

chaleur. Pour assurer la stabilité numérique, nous prenons la dispersion longitudinale $\alpha_L = 0,2 \text{ m}$

pour une taille de maille $\Delta L = 0,2$, ce qui donne un Peclet $Pe = \frac{\Delta L}{\alpha_L} \simeq 1 < 4$ (3)

La simulation est effectuée sur 2 cycles d'infiltration – drainage. Chaque période d'infiltration s'étale sur 24h, le drainage sur 2 semaines. Les analyses suivantes sont effectuées en fin d'infiltration et de drainage pour le second cycle, ce qui permet de voir apparaître l'effet mémoire du milieu. On trace les profils verticaux à 5 abscisses (à partir du bord amont) pour la saturation, la température et la concentration en soluté. Les abscisses choisies sont 7 m (milieu de bassin d'infiltration), 10 m (bord aval du bassin), 11 et 12 m (périphérie du bassin) et 20 m (au loin). Pour chaque graphique, nous comparons le milieu homogène avec le milieu hétérogène.

Pour compléter, nous comparons également les profils horizontaux de température et de concentration en soluté à différentes profondeurs. A noter de plus, que la concentration de soluté prise en compte est le produit de la saturation par la concentration (dans l'eau), ceci représente alors la masse de soluté par unité de volume de sol.

Profils de saturation

Degré de saturation (S) en fonction de la profondeur (z), milieux homogène et hétérogène après 24 h d'infiltration.

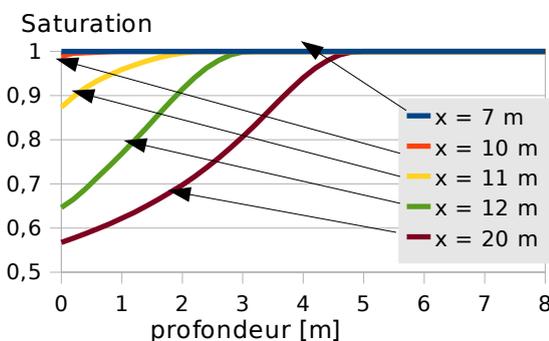


Fig 4: milieu homogène, fin infiltration

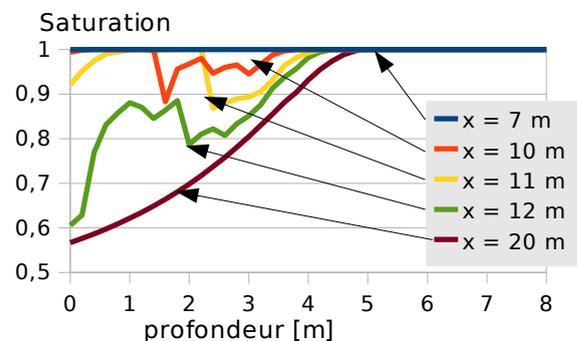


Fig 5: milieu hétérogène, fin infiltration

En milieu homogène (Fig 4), on observe qu'en dessous du bassin (au centre), le milieu est complètement saturé jusqu'à la nappe. Au loin du bassin (abscisse 20 m, soit à 10 m du bord du bassin), l'infiltration n'a aucune influence sur le profil de saturation dans la zone non-saturée. A la périphérie, et vers l'extérieur, on note une influence qui va très rapidement en décroissant

(profils aux abscisses 10, 11 et 12 m)

On observe en milieu hétérogène (Fig 5) que le profil vertical en dehors de la zone d'influence du bassin n'est absolument pas perturbée par les hétérogénéités, et il en est de même pour le profil au milieu du bassin où la saturation est totale sur toute la hauteur. Par contre, pour les zones plus proches de la périphérie du bassin, où il y a saturation partielle, les hétérogénéités donnent lieu à des profils "chahutés" ; les profils en milieu homogènes montrent que les schémas numériques sont stables.

Degré de saturation (S) en fonction de la profondeur (z), milieux homogène et hétérogène après 2 semaines de drainage.

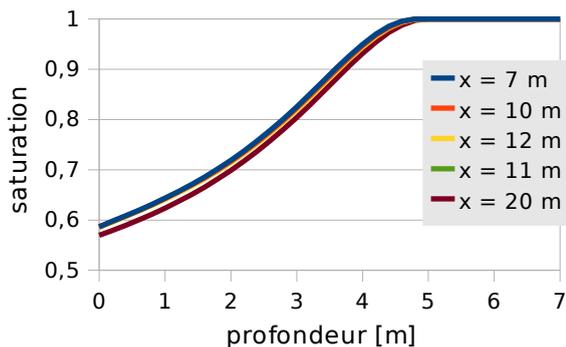


Fig 6: milieu homogène, fin drainage

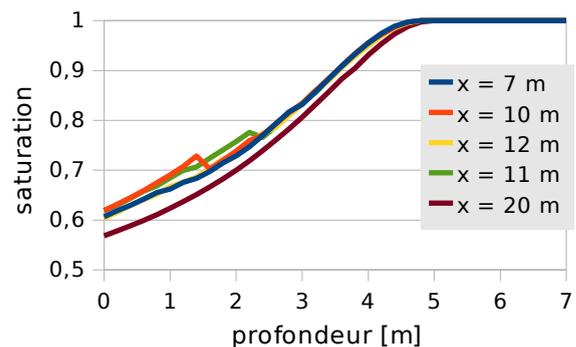


Fig 7: milieu hétérogène, fin drainage

On observe (Fig 6 & 7) qu'en fin de drainage, les courbes de saturation sont revenues aux valeurs initiales, aussi bien en milieu hétérogène qu'en milieu homogène, avec toutefois un discret effet de mémoire pour le milieu hétérogène. On en déduit qu'en faisant se succéder les cycles, on obtient assez rapidement un régime hydraulique cyclique stable.

Profils de températures

Température en fonction de la profondeur en milieux homogène et hétérogène après 24 h d'infiltration.

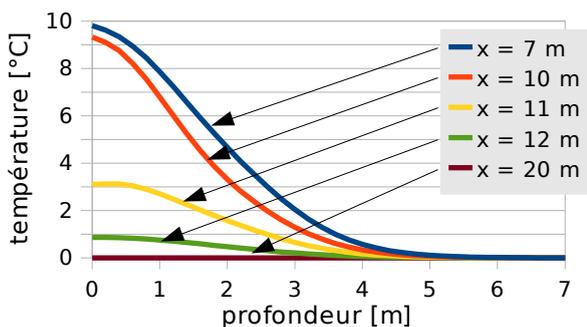


Fig 8: milieu homogène, fin infiltration

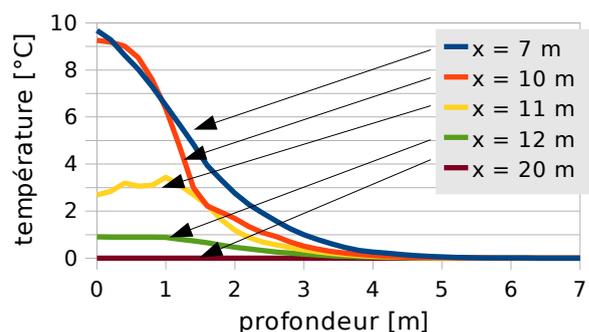


Fig 9: milieu hétérogène, fin infiltration

En fin d'infiltration (Fig 8 & 9), hormis le profil à la périphérie extérieure du bassin ($x = 11$ m), les courbes en milieu homogène ou hétérogène sont relativement proches. On note que l'influence en température est limitée à la périphérie immédiate du bassin.

Température en fonction de la profondeur en milieux homogène et hétérogène après 2 semaines de drainage.

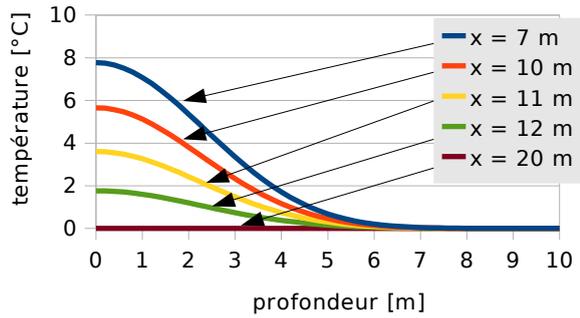


Fig 10: milieu homogène, fin drainage

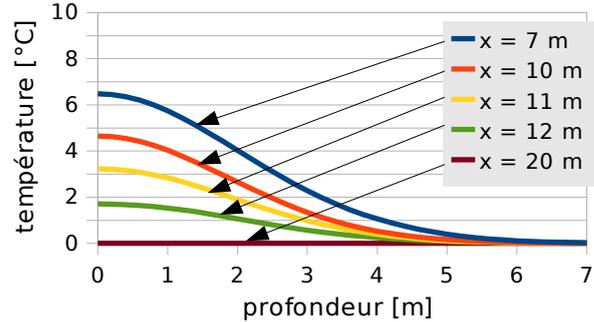


Fig 11: hétérogène, fin drainage

Pour la fin de drainage, on observe (Fig 11) que l'influence de l'hétérogénéité est marquée par des températures légèrement inférieures au comportement en milieu homogène (Fig 10) (baisse de 1°C sur la valeur maxi), mais que les formes très lisses sont respectées. On peut observer un écart de température facilement détectable jusqu'à des profondeurs entre 4 m et 4,5 m, y compris pour les profils légèrement extérieurs au bassin ($x = 11$ et 12 m).

Profils de concentration en soluté en fin de seconde infiltration

Concentration en soluté en fonction de la profondeur en milieux homogène et hétérogène après 24 h d'infiltration.

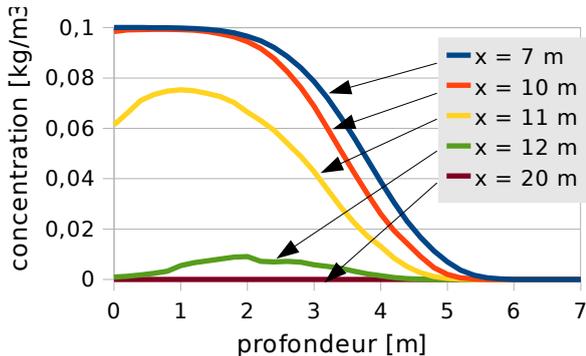


Fig 12: milieu homogène, fin infiltration

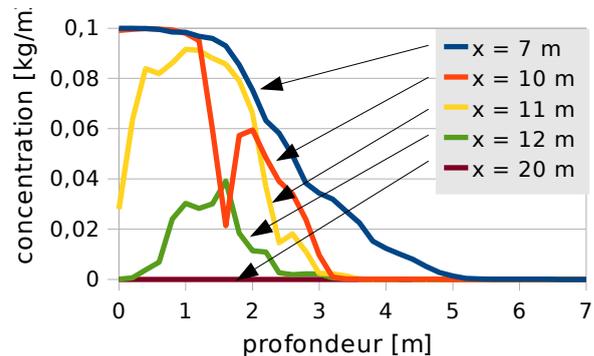


Fig 13: milieu hétérogène, fin infiltration

On rappelle que la concentration tracée ici est le produit du degré de saturation par la concentration de l'eau en soluté, c'est une masse de soluté par volume de pores [$\text{kg}_{\text{soluté}}/\text{dm}^3_{\text{pores}}$] qui peut varier de 0 à 0,1 $\text{kg}_{\text{soluté}}/\text{dm}^3_{\text{pores}}$

En fin d'infiltration dans le milieu homogène (Fig 12) on observe une légère distorsion de la courbe à l'abscisse $x = 12$ m, ceci est probablement un effet de mémoire des phases précédentes.

Pour la masse de soluté stocké dans le milieu poreux (Fig 13), on voit ici que les profils sont clairement perturbés par les hétérogénéités pour tous les profils à la périphérie du bassin (pour $x = 10, 11$ et 12 m).

Concentration en soluté en fonction de la profondeur en milieux homogène et hétérogène après 2 semaines de drainage

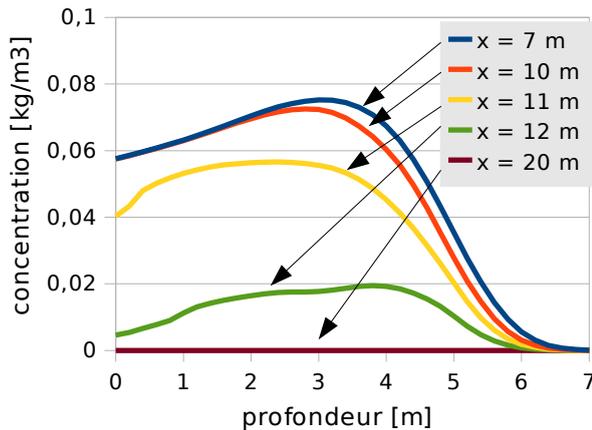


Fig 14: milieu homogène, fin drainage

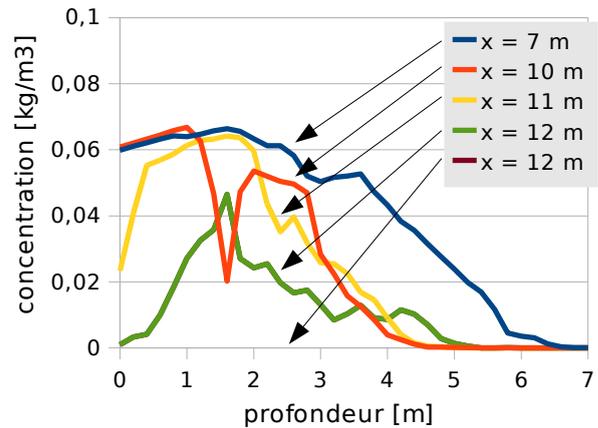


Fig 15: milieu hétérogène, fin drainage

Contrairement aux profils de températures, les profils de soluté sont perturbés par les hétérogénéités. A l'aplomb du bassin, on a une présence notable de soluté jusqu'à une profondeur de 6 m. A la périphérie du bassin, par contre, en milieu hétérogène, la présence se limite à la profondeur 4,5 m, alors qu'en milieu homogène, elle la même qu'au centre.

Comparaison entre profils horizontaux de température et de concentration en soluté

On trace les profils horizontaux pour différentes profondeurs ($z = 0$; 1 ; 2 ; 3 ; et 4 m) aux mêmes instants que précédemment, c'est à dire en fin d'infiltration et en fin de drainage du 2nd cycle.

Températures et concentration en fin d'infiltration, profils horizontaux.

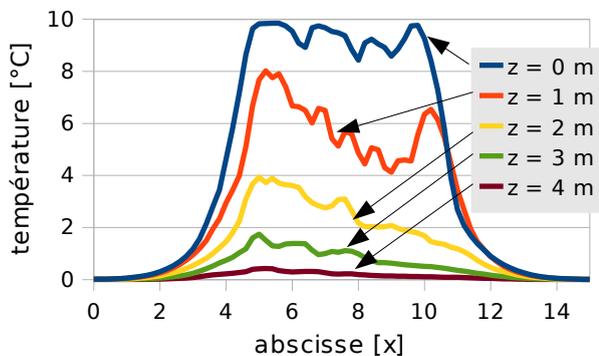


Fig 16: Températures en fin d'infiltration

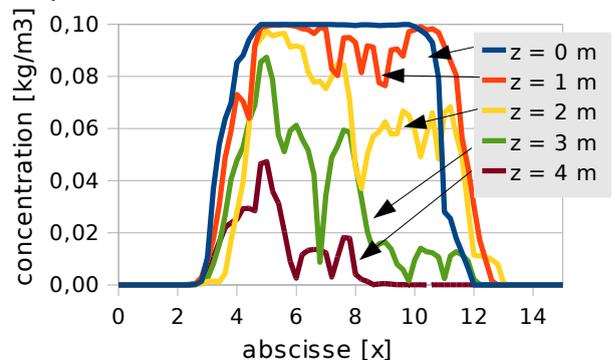


Fig 17: Concentrations en fin d'infiltration

Si les courbes de températures sont légèrement influencées par les hétérogénéités, elles sont néanmoins très distinctes les unes des autres, et la hiérarchie des profondeurs est respectée. Ceci n'est pas vérifié pour les courbes de concentrations. Par ailleurs, on peut observer que la profondeur de pénétration du soluté est plus importante que celle de la température, mais de façon disparate.

Températures et concentration en fin de drainage, profils horizontaux.

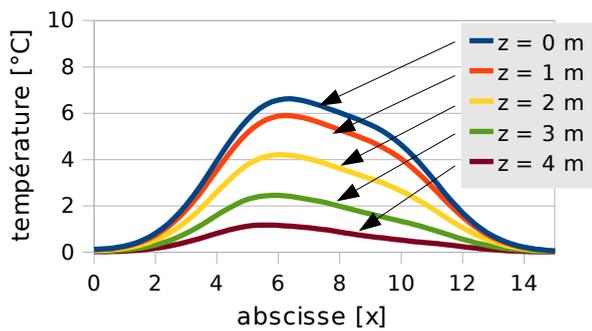


Fig 18 : champ de température

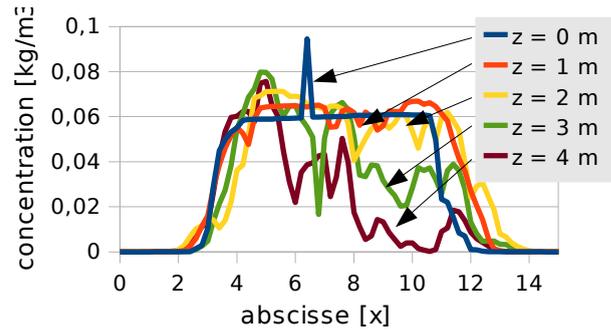


Fig 19: champ de concentration soluté

Ces 2 graphiques mettent clairement en évidence la différence de comportement des 2 variables (température et concentration en soluté) provoquée par la présence d'hétérogénéités. Les caractères relevés précédemment sont encore accentués puisque les courbes de températures se sont lissées, alors que celles de concentration sont difficiles à discerner les unes des autres. Avec la concentration il était difficile de tirer une information globale à partir d'une information locale en fin d'infiltration, ça devient impossible après 2 semaines de drainage.

Conclusion

Les simulations, avec les hypothèses choisies, montrent les différences de comportement pour le transport de soluté ou de chaleur. En phase d'infiltration, les deux grandeurs sont transportées essentiellement par advection et la mesure de la température ou de la concentration dépend étroitement de la présence d'hétérogénéités, même si la température y est légèrement moins sensible. Par contre, durant en phase de drainage, les mouvements hydrauliques deviennent beaucoup plus lents, et donc l'advection est fortement ralentie. En conséquence, le transport de soluté devient lui aussi très lent, le champ de concentration est presque figé. A contrario, pour la température, la diffusion thermique prend en partie le relais, et donc la chaleur continue à se diffuser significativement, avec une cinétique plus lente et un abaissement de la température.

D'autre part, les hétérogénéités induisent un champ de concentrations très perturbé, quelle que soit la phase (infiltration ou drainage), alors que la diffusion thermique permet de lisser le champ de température et le rapproche de ce qui est observé pour un milieu homogène. La mesure et l'interprétation en sont donc grandement facilitées. Ceci s'explique probablement par deux phénomènes : une diffusivité thermique dans le fluide bien plus importante que la diffusivité moléculaire, et la diffusion thermique dans la matrice solide qui n'existe pas pour le soluté.

Parallèlement à ceci, lorsqu'il y a advection, le transport de soluté est plus rapide que celui de chaleur à cause de son caractère conservatif dans la phase liquide (hypothèse dans ce travail), alors que la chaleur est progressivement perdue par l'eau au contact de la matrice solide. En conséquence, les difficultés rencontrées avec la mesure de température sont : une diminution progressive du niveau de température alors que la concentration en soluté est toujours présente, la condition d'un écart significatif entre l'eau de nappe et celle de pluie. Pour la première difficulté, le suivi en continu permet d'enregistrer d'abord l'élévation de température (dans notre hypothèse) bien avant l'uniformisation qui demande des temps très longs (en attendant le prochain événement pluvieux). Pour la seconde difficulté, en considérant plusieurs événements successifs, il est peu probable que la température de pluie reste identique à celle de l'aquifère.

La mesure de température pour suivre l'infiltration de l'eau de pluie chargée en soluté nous semble donc offrir un complément intéressant à la mesure des concentrations, notamment parce qu'il semble que pour cette variable thermique, on atteint plus facilement un milieu

homogène équivalent. Ceci devra évidemment être validé par une modélisation en 3D, correspondante à une expérimentation en conditions réelles. Pour la suite immédiate de l'étude, nous envisageons de travailler sur un approfondissement du comportement modélisé en 2D (changement de conditions limites, influence de la distribution des perméabilités, cycles supplémentaires pour atteindre des distances plus grandes...), puis sur la modélisation 3D. Il est également prévu de confronter ces calculs avec d'autres codes numériques (Feflow).

Bibliographie

Bories S, Prat M (1995). *Transferts de chaleur dans les milieux poreux*. Techniques de l'ingénieur Génie énergétique ISSN 1762-8741 ; 1995, vol. 2,

Chastanet J, Kaskassian S, Côme JM, Malard F & Foulquier A (2008). *Transport de chaleur et température des nappes phréatiques à l'aplomb des bassins d'infiltration d'eau de ruissellement pluvial*. Projet ANR-05-ECOT-006 (document confidentiel)

Clifford I, Voss and Alden M, Provost (2003). *SUTRA : a model for saturated-unsaturated variable-density ground-water flow with solute or energy transport*. Water resources investigations report 02-4231, US Geological Survey
pp. B8250.1-B8250.32

Foulquier A, Malard F, Barraud S, Gibert J (2009). *Thermal influence of urban groundwater recharge from storwater basins*. HYDROLOGICAL PROCESSES 23, 0 – 0 (2009) Published online in Wiley InterScience ; (www.interscience.wiley.com) DOI: 10.1002/hyp.7305

Kenneth L. Kipp, Jr. (1997). *Guide to the Revised Heat and Solute Transport Simulator: HST3D – v2*. Water-Resources Investigations Report 97-4157