

# Caractérisation des infiltrations profondes sous système drainé : Application à la parcelle de Boissy le Chatel

Hocine HENINE <sup>1\*</sup>, Fella BACHA <sup>1</sup>, Rémi CLEMENT <sup>1</sup>, Alain GUERIN <sup>1</sup>, Cédric CHAUMONT <sup>1</sup>, Julien TOURNEBIZE <sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institut National de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture (IRSTEA), Unité Hydrosystèmes et Bioprocédés. 1, rue Pierre-Gilles de Gennes, CS 10030, 92761 Antony ; France.

\* [hocine.henine@irstea.fr](mailto:hocine.henine@irstea.fr)

## 1. Résumé

Le drainage agricole est un dispositif utilisé pour faire face à l'engorgement temporaire hivernal des sols hydromorphes. La parcelle expérimentale de Boissy le Châtel (Orgeval, Seine et Marne) mise en place en 1972, est un exemple de ce type de sol dans le bassin parisien. Sous un système de drainage, l'infiltration profonde a été classiquement négligée dans les études hydrologiques compte tenu de l'existence d'un horizon à forte teneur en argile supposé imperméable. Or, en considérant les fluctuations du niveau de la nappe de Brie sous-jacente, la recharge de l'aquifère ne peut que provenir de cette infiltration profonde.

L'objectif de notre travail est, dans un premier lieu, d'arriver à comprendre le fonctionnement hydrologique de la parcelle en déterminant finement tous les termes du bilan hydrique, et, dans un deuxième temps, de mettre en relation le fonctionnement avec les fluctuations de la nappe de Brie observées afin d'arriver à décrire l'infiltration profonde. Ceci est réalisé à partir de l'exploitation des données expérimentales menées sur la parcelle de Boissy depuis de longues années. Elles représentent une source importante de données qui nous permettent d'établir des schémas d'écoulements de l'eau pour mettre en évidence cette relation. La mise en évidence de cette infiltration profonde s'est faite en comparant les résultats de trois approches distinctes : hydrologique, géophysique et modélisation. Sur une période d'étude de 60 jours, cette infiltration est estimée à 80 mm environ (0.12 mm/jour).

## 2. Introduction

Depuis l'adoption du drainage agricole, plusieurs études traitant son influence sur la réponse hydrologique des bassins versants ont été menées. Le fonctionnement hydrologique d'un sol drainé est fortement influencé par la présence des tuyaux perforés enterrés de drainage agricole.

À l'échelle de la parcelle, le drainage agricole permet d'évacuer les excès d'eau temporaires dans le sol durant la saison humide et ainsi de rabattre la nappe perchée. Cela engendre une augmentation de la capacité d'infiltration du sol et, en conséquence, de réduire le ruissellement de surface (Augeard et al., 2005 ; Kao et al., 1998 ; Henine, 2010).

La question d'infiltration profonde à travers une couche relativement imperméable, à l'origine de la formation de la nappe perchée en hiver et à plus forte teneur en argile, est très peu évoquée dans la littérature. Généralement, celle-ci est négligée en considérant l'horizon où reposent les drains quasi imperméable. En France, ce domaine n'a pas été approfondi depuis les travaux de recherche effectués par Chopin (1988) et Zimmer (1988). Ces infiltrations peuvent être estimées soit directement à partir d'un calcul du flux à travers la couche imperméable (gradient vertical de pression ou de teneur en eau) soit à partir d'un calcul du bilan hydrique à l'échelle d'un système fermé (parcelle, bassin versant). Sous hypothèse d'un ruissellement nul, le bilan hydrique fait intervenir un déficit de restitution du drainage agricole qui est associé à des infiltrations profondes (Chopin, 1988 ; Zimmer, 1988). Par ailleurs, la nature pédologique du sol influence fortement le coefficient de restitution et donc de l'infiltration profonde (Zimmer et al. 1991).

Ainsi, l'importance de ce dernier et son intensité dépendent des critères morphologiques du sol qui jouent ici un rôle important.

En général, il existe plusieurs méthodes pour caractériser les infiltrations profondes. Elles sont basées soit sur la modélisation (Hopmans 2011, Grismer 2013), soit sur des mesures in situ par exemple la mesure de la teneur en eau, le potentiel matriciel, les concentrations d'isotope naturel et les variations des niveaux de la nappe phréatique, la tomographie de résistivité électrique (ERT) ou la température (Arora and Ahmed, 2011, ; Zimmer et al. 1991, Tabbagh et al. 2009, Bechkit 2011, Rimon et al. 2011).

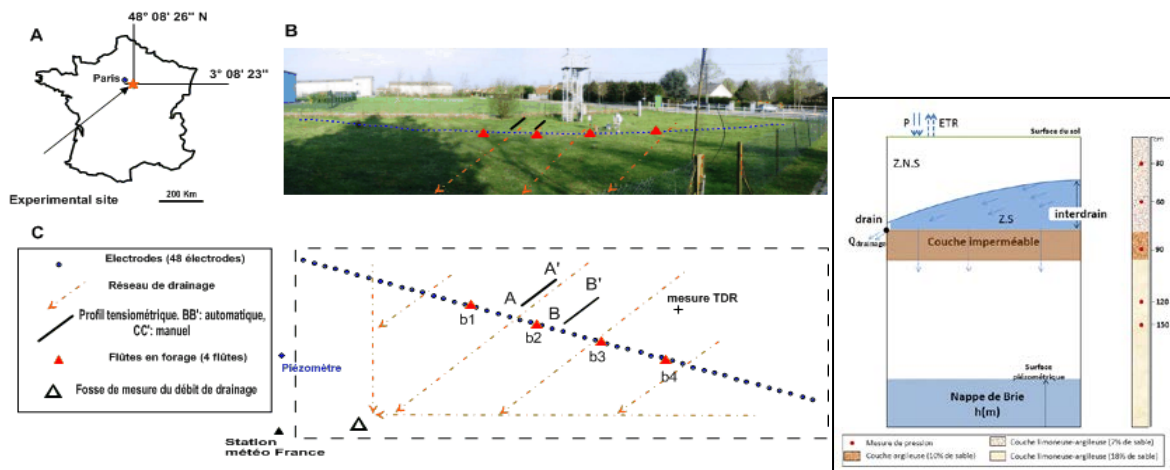
L'originalité de ce travail consiste à associer la mesure géophysique aux mesures classiques hydrogéologiques pour mieux caractériser l'infiltration profonde. Contrairement aux méthodes de mesures locales, l'avantage d'utiliser la mesure géophysique est d'acquérir une information spatialisée. Ces avantages ont rendu son utilisation très répandue dans différentes études hydrologiques et environnementales.

La mise en évidence de cette infiltration profonde s'est faite selon trois approches :

- une approche hydrologique : Une analyse du comportement du système en se basant sur l'application des méthodes hydrologiques classiques permettra de comprendre le schéma de circulation de l'eau dans le sol et de localiser dans le temps la période de recharge de la nappe de Brie. Cette recharge peut être estimée à partir d'un calcul du bilan hydrique.
- une approche géophysique : Une prospection sur terrain en utilisant la méthode de la tomographie de résistivité électrique (ERT) permettra d'étudier la spatialisation de l'information ponctuelle à l'échelle de toute la parcelle obtenue par l'étude hydrologique et de pouvoir valider ou pas la fiabilité de la première approche. L'étude de cette approche se basera sur des analyses de tomographies de résistivités électriques à différentes périodes afin d'étudier l'évolution de l'état humide du sol.
- une approche de modélisation numérique : elle permettra de transcrire le schéma de circulation de l'eau dans le sol et donc de valider l'hypothèse d'infiltration profonde. Dans chaque étape de modélisation du système, les observations faites sur terrain seront reproduites ainsi que les hypothèses émises dans notre travail. L'infiltration sera introduite en tant que perte pour le système afin de quantifier le taux de recharge de la nappe de Brie. Corps de texte en times 11, justifié à gauche et à droite, avec espacement simple entre les lignes d'un paragraphe. Chaque paragraphe sera également suivi d'un espacement de 3 mm.

### **3. Expérimentation**

Une parcelle drainée située à Boissy le Châtel (Figure 1), bassin versant de l'Orgeval (Seine et Marne, 77), a fait l'objet d'un suivi régulier depuis 1972. La relative homogénéité des caractéristiques pédologiques rend la parcelle de Boissy le Châtel représentative du bassin versant de l'Orgeval drainé à 80% (Trincal 1994). La superficie de la parcelle est de 615 m<sup>2</sup>, drainée par un réseau de drains anciens en poterie, installé en 1972 à une profondeur de 0,60 m à 0,80 m avec un écartement entre les drains de 6 m. Le sol de la parcelle fait partie des luvisols (des sols lessivés) hydromorphes sur les limons des plateaux, où se forme la nappe de Brie (Figure 1). Le sol est principalement limono-argileux. L'argile se retrouve en grande quantité (entre 30 à 37%) à une profondeur comprise entre 60 cm à 100 cm, formant ainsi un horizon moins perméable considéré comme imperméable, à l'origine de la formation d'une nappe perchée temporaire en période hivernale.



**Figure 1 : Dispositif expérimental de parcelle de Boissy le Châtel (Orgeval) et le schéma du système drainant.**

L'expérimentation de la parcelle de Boissy a débuté en 1972, date d'implantation du réseau de drainage. Les mesures réalisées sur la parcelle de Boissy le Châtel (Figure 1) dans le cadre de cette étude sont :

1. Les données climatiques : une station climatologique permet le suivi en continu de la pluie, la température (acquisition horaire), l'humidité et de la pression de l'air, et de calculer l'ETP. La parcelle étant couverte par une pelouse entretenue, les conditions sont respectées pour considérer l'ETP Penman Monteith comme ETR.
2. Le débit de drainage : le débit est mesuré à l'aide d'un déversoir triangulaire installé depuis Octobre 2001 en sortir du collecteur, avec une fréquence d'acquisition horaire.
3. La piézométrie : les variations du niveau de la nappe de Brie sont mesurées au niveau d'un forage installé en amont de la parcelle depuis 2008, avec une fréquence d'acquisition horaire.
4. La tensiométrie : le dispositif tensiométrique pour la mesure des pressions dans le sous-sol a été installé depuis l'année 2011. Des tensiomètres sont implantés aux profondeurs 30, 60, 120 et 150 cm, avec une fréquence d'acquisition horaire.
5. La teneur en eau : le dispositif de la TDR (Time Domain Reflectometry) a été installé depuis 1998 pour permettre des mesures automatiques de teneur en eau à différentes profondeurs, (5, 15, 25, 35, 45, 55, 75, 95, 115, 135 et 155 cm.), avec une fréquence d'acquisition de 12h.
6. La Mesure géophysique : un suivi particulier de résistivité électrique du sol a été entamé depuis 2011 avec la tomographie de résistivité électrique (ERT, en anglais). L'acquisition des données ERT est faite grâce à un équipement dédié Syscal Junior (IRIS Instruments) par application du protocole Wenner-Schlumberger et Dipôle-Dipôle. Les données sont acquises à la fréquence hebdomadaire pour l'automne et l'hiver. Pendant le printemps, l'acquisition se fait en fonction de la pluviométrie.

## 4. Résultats

### 4.1. Approche hydrologique

L'objectif de cette partie est de mettre en évidence et de quantifier à travers une analyse des variations de la teneur en eau, des pressions et de la hauteur de la nappe de Brie, l'infiltration profonde. L'étude du bilan hydrique se fait sur la période du 01/10/2012 jusqu'au 27/02/2013. Les résultats sont synthétisés sur la Figure 2.

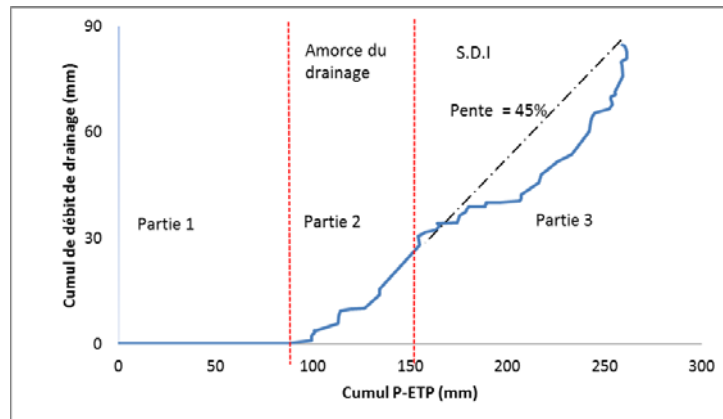


Figure 2 : Courbe des doubles cumuls de la campagne de drainage 2012/2013

La Figure 2 montre que les premières pluies (partie 1, Figure 2), autour de 100 mm, servent à imbiber le sol et à remplir la réserve utile. Les parties 2 et 3 représentent la saison d’amorce du drainage (04- 22/12/2012) et la saison de drainage intense (à partir du 22/12/2012), respectivement. Le coefficient de restitution est calculé pendant la saison de drainage intense (partie 3) et vaut 45%, indiquant une faible restitution du réseau de drainage de cette parcelle (Zimmer 1988). Le calcul du bilan hydrique sur la saison de drainage, avec l’hypothèse d’un ruissellement nul, fait intervenir un terme supplémentaire puisque la lame d’eau restituée est différente de l’apport climatique (P-ETP). Cet écart est de 83 mm calculé sur toute la saison (Tableau 3), représente la quantité d’eau susceptible de s’être infiltrée. A partir des chroniques des pressions d’eau mesurées à différentes profondeurs, nous avons calculé le potentiel hydraulique total. La figure 3 montre les variations du potentiel hydraulique sur différents profils verticaux.

Sachant que l’écoulement se produit dans le sens des potentiels décroissants, avant le début de la saison de drainage (22/12/2012), les écoulements sont plutôt ascendants (Figure 3.a). Durant les pluies hivernales, les potentiels totaux diminuent avec la profondeur, indiquant ainsi un écoulement vers les profondeurs. Cette situation est observée sur la quasi-totalité des profils durant la saison de drainage (Figure 3.b) confirmant ainsi l’importance des infiltrations profondes durant cette période, estimées à 83 mm par le calcul du bilan hydrique.

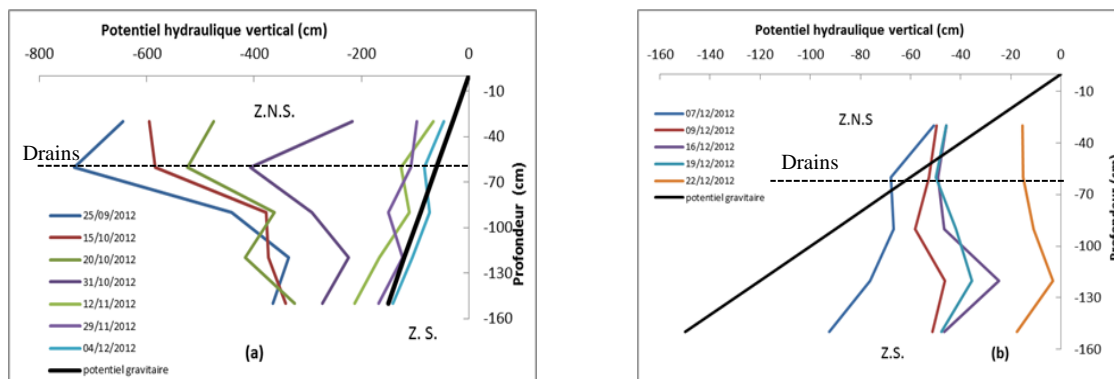
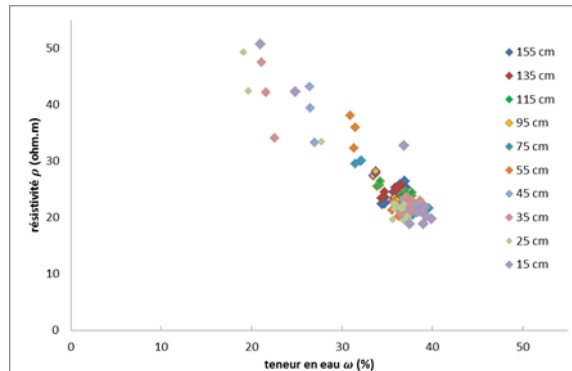


Figure 3 : Profils des potentiels hydrauliques sélectionnés avant (a) et durant (b) la saison de drainage

#### 4.2. Approche géophysique

Afin de conforter les résultats précédents et de déterminer si l’information obtenue ponctuellement est représentative à l’échelle de la parcelle, une deuxième approche est adoptée consistant en une prospection géophysique par Tomographie de Résistivité Electrique (ERT). Pour vérifier la relation liant la résistivité

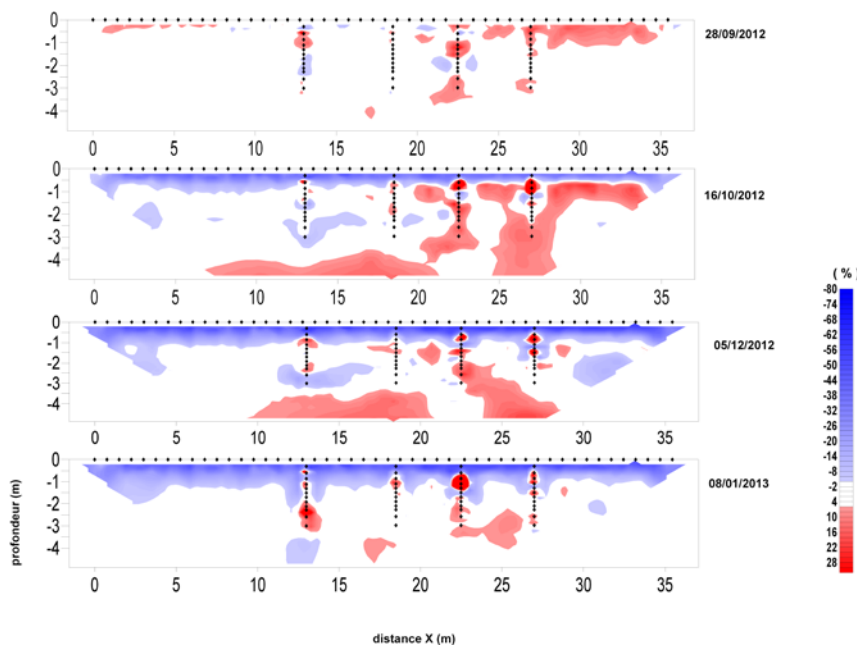
électrique du sol à la teneur en eau, une représentation graphique des variations de ces deux paramètres sur les différentes profondeurs a été établie (Figure 4).



**Figure 4 : Variation des résistivités électriques en fonction de la teneur en eau sur les différentes profondeurs.**

Pour des valeurs de teneur en eau de 30 à 40%, la résistivité est plutôt faible et est de l'ordre des 20 Ohm.m. L'analyse du graphique horizon par horizon, montre que la tendance de la teneur en eau tend plutôt à la baisse en profondeur. Ceci s'explique par la différence de porosité entre les horizons les plus profonds (horizon plus compacte) et ceux en surface. Sachant que les mesures de TDR sont plutôt locales contrairement à l'ERT, la Figure 4 montre que l'ERT est bien un indicateur de variabilité spatiale de la teneur en eau, et confirme la relation de proportionnalité inverse entre ces deux caractéristiques étudiées. Cependant nous ne transformerons pas les résistivités en teneur en eau, mais nous aurons une information qualitative intéressante.

Parmi les panneaux électriques 2D réalisés, 5 profils marqués par de grandes variations des résistivités électriques, correspondant aux fluctuations importantes du niveau de la nappe de Brie, ont été sélectionnés. Les variations de la teneur en eau (12/12/2012) sont représentées par les variations relatives de la résistivité par rapport à une date de référence, exprimées en pourcentage (Figure 5).



**Figure 5 : Variations des résistivités relatives pour les différentes dates d'étude.**

Sur la Figure 5 on remarque :

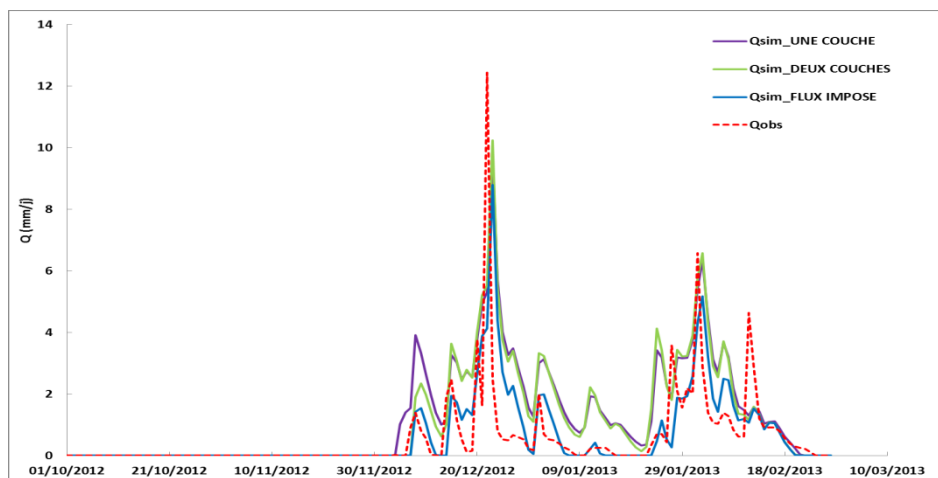
- La première tomographie du 28/09/2012 n'a pas révélé de grande variation en résistivité électrique relative. En mettant en lien ces variations avec les données climatiques du mois de septembre on constate qu'entre les deux dates, le cumul de pluie était de 34.2 mm face à un cumul de 30.1 mm en ETP. Durant ce mois, caractérisé par de forte évapotranspiration, le sol est dans un état sec. Sur les autres tomographies on observe de fortes variations de la résistivité relative. Elle atteint -50% en surface. En profondeur, à partir de 1 m, ces variations tendent à augmenter et vont jusqu'à atteindre +25%. On observe aussi que cette augmentation est concentrée plus sur le côté droit de la parcelle que celui de gauche. Cependant, ces augmentations tendent à diminuer aux cours du temps comme montré sur les tomographies du 05/12/2012 et du 08/01/2013. Pour ces dernières, on observe la présence d'une forte variation de la résistivité relative de la surface jusqu'à une profondeur de 150 cm liée à aux infiltrations des eaux de pluie en surface et en dessous de la couche semi-imperméable en profondeur.

### 4.3. Approche modélisation

L'étude est basée sur une section comprise entre le drain et l'interdrain (distance de 3m) avec un domaine d'écoulement englobant la zone non saturée et saturée du sol.

Les simulations sont réalisées sur une période du 01/10/2012 jusqu'au 27/02/2013. Trois différentes configurations du système drainant et conditions aux limites spécifiques ont été testées. La comparaison entre les différentes simulations est basée sur une analyse de la performance du modèle donnée par le critère de Nash :

1. Un système monocouche, influencé par un drainage. Ce dernier est représenté par un suintement au niveau du drain. La simulation ainsi que l'optimisation de cette étape a conduit à retenir les valeurs optimales de  $K_s=142$  cm/j et  $\theta_s=0.35$  avec un Nash de 0.16. Le graphique de simulation est représenté sur la Figure 6.
2. Un système à deux couches : une deuxième couche est introduite représentant l'horizon semi perméable. Les valeurs optimales des paramètres hydrodynamiques retenus pour la couche semi-imperméable sont  $K_s=2.4$  cm/j et  $\theta_s=0.33$  avec un Nash de 0.23.
3. Système à deux couches avec un flux d'infiltration constant imposé (0.12 cm/j imposé sur 60 jours). Ce flux imposé traduit la recharge de la nappe de Brie. Les résultats montrent une nette amélioration du critère de performance du modèle avec un coefficient de Nash de 0.73 (Figure 6).
- 4.



**Figure 6 : Résultats de la simulation des débits pour les trois étapes de modélisation réalisées.**

## 5. Conclusion

Dans le contexte actuel des fortes demandes en alimentation en eau potable et en irrigation, il est difficile de maintenir une gestion optimale des ressources en eau. L'étude du comportement de la nappe de Brie à travers ses variations à l'échelle d'une année permettra une meilleure connaissance des transferts et la gestion qualitative et quantitative de la nappe.

La mise en évidence de sa recharge (infiltration profonde) s'est faite selon trois axes d'études. Dans le premier axe, deux approches complémentaires ont été utilisées. La première approche consiste en une étude hydrologique, où les données climatiques et hydrologiques sont exploitées pour quantifier l'infiltration profonde qui a été estimée à environ 83 mm sur la période d'étude entre le 01/10/2012 et le 27/02/2013. La deuxième approche est consacrée à l'exploitation des pressions et de la teneur en eau pour caractériser le transfert hydrique.

Quant au deuxième axe, il consiste à l'introduction de la géophysique dans le but de spatialiser l'information hydrologique par analyse des panneaux de tomographie de résistivité électrique. Cela permet aussi le suivi des variations de l'humidité du sol et l'observation de son évolution au cours du temps. Par la suite, une validation de l'étude hydrologique a été faite à travers une confrontation temporelle des résultats des deux axes. L'apport de la géophysique complète spatialement les données liées aux mesures de la teneur en eau ponctuelles.

Enfin, le troisième axe s'appuie sur une modélisation simulant les débits drainés au niveau de la parcelle à l'aide de l'outil de simulation à base physique, Hydrus-2D. Cette démarche introduit une discrétisation du système en intégrant des conditions aux limites spécifiques (système monocouche, double couche avec ou sans échange sous-jacent). L'analyse de la performance du modèle pour reproduire les débits observés montre une amélioration du critère de Nash de 0.16 à 0.73 en intégrant une infiltration profonde. Les résultats de la modélisation nous ont permis ainsi de quantifier le flux profond infiltré à travers la couche imperméable et de déterminer sa variation temporelle.

## Références

- Arora, T. and S. Ahmed. 2011. Characterization of recharge through complex vadose zone of a granitic aquifer by time-lapse electrical resistivity tomography. *Journal of Applied Geophysics* **73**:35-44.
- Augeard, B., C. Kao, J. Ledun, C. Chaumont, and Y. Nedelec. 2005. Le ruissellement sur sols drainés: identification des mécanismes de genèse. *Ingénieries* **43**:3-18.
- Bechkit, M. A. 2011. Sur la détermination de la teneur en eau et de l'infiltration à partir de mesures passives de la température du sol. Université Pierre et Marie Curie.
- Chopin, O. 1988. Etude des infiltrations profondes. Ecole Nationale des Ingénieurs des Travaux Ruraux et des Techniques Sanitaires, Cemagref.
- Henine, H. 2010. Couplage des processus hydrologiques reliant parcelles agricoles drainées, collecteurs enterrés et émissaire à surface libre: intégration à l'échelle du bassin versant. Université Pierre et Marie Curie.
- Kao, C., Y. Nedelec, and D. Zimmer. 1998. Surface runoff mechanisms and modeling in subsurface drained fields. Pages 258-266 in *7th international drainage symposium in the 21st century : food production and the environment*, Orlando, USA, 8-10 March 1998.
- Rimon, Y., R. Nativ, and O. Dahan. 2011. Vadose Zone Water Pressure Variation during Infiltration Events All rights reserved. No part of this periodical may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying, recording, or any information storage and retrieval system, without permission in writing from the publisher. *gsvadzone* **10**:1105-1112.

- Tabbagh, A., R. Guérin, H. Bendjoudi, B. Cheviron, and M.-A. Bechkit. 2009. Pluri-annual recharge assessment using vertical soil temperature profiles: Example of the Seine river basin (1984–2001). *Comptes Rendus Geoscience* **341**:949-956.
- Trincal, L. 1994. Recensement des superficies drainées d'un bassin versant agricole à l'aide d'un SIG. Application au bassin versant expérimental de l'Orgeval en Seine et Marne. Mémoire d'ingénieur ESTG, Evry. Ecole Supérieure Des Géomètres et Topographes.
- Zimmer, D. 1988. Transferts hydriques en sols drainés par tuyaux enterrés. Compréhension des débits de pointe et essai de typologie des schémas d'écoulement. Université Pierre et Marie Curie.
- Zimmer, D., R. Bouzigues, J. C. Chossat, J. C. Favrot, and A. M. Guiresse. 1991. Importance et déterminisme des infiltrations profondes en luvisols-redoxisols drainés. Incidence sur les modalités de drainage. *Science du sol* **29**:321-337.