

Caractérisation de l'infiltration profonde sur la parcelle expérimentale de Boissy-le-Châtel

Hocine Henine^{1,*}, Moussa Kanaté¹, Cédric Chaumont¹, Arnaud Blanchouin¹, Arnold-Fred Imig², Rémi Clément², Julien Tournebize¹

¹ UR HYCAR, Antony, INRAE

² UR Reversaal, Lyon, INRAE

* hocine.henine@inrae.fr

Résumé

Ce travail porte sur l'étude de l'infiltration profonde dans la parcelle agricole drainée du site expérimental de Boissy-le-Châtel (Orgeval, Seine-et-Marne). Cette parcelle, suivie depuis 1972, est représentative des sols hydromorphes du bassin parisien. L'objectif était de quantifier la part de la pluie nette traversant la couche argileuse située sous les drains, habituellement considérée comme imperméable. Cependant, les fluctuations observées du niveau de la nappe de Brie sous-jacente indiquent que la recharge de cet aquifère ne peut résulter que d'une infiltration profonde significative.

L'analyse hydrologique de six années de données expérimentales met en évidence une infiltration moyenne d'environ 95 mm/an, soit une part importante des pluies hivernales. La modélisation numérique réalisée avec Hydrus-2D/3D a permis de simuler ces transferts et de préparer les conditions du traçage prévu pour la prochaine saison hydrologique, afin de suivre plus finement la dynamique de l'eau dans le sol durant l'hiver.

Points clefs

- ✓ *La parcelle de Boissy-le-Châtel, drainée et suivie depuis 1972, représentative des sols hydromorphes du bassin parisien.*
- ✓ *Les bilans hydrologiques montrent recharge moyenne de la nappe de Brie de 95 mm/an.*
- ✓ *La modélisation Hydrus-2D/3D confirme ces transferts profonds et permet de préparer un traçage destiné à suivre la dynamique de l'eau durant la prochaine saison hivernale.*

Abstract

This work focuses on the study of deep infiltration within the drained agricultural plot of the Boissy-le-Châtel experimental site (Orgeval, Seine-et-Marne). This plot, monitored since 1972, is representative of the hydromorphic soils of the Paris Basin. The objective was to quantify the portion of net rainfall that infiltrates through the clay layer located beneath the drains, a layer commonly considered impermeable. However, fluctuations observed in the level of the underlying Brie aquifer indicate that its recharge can only result from significant deep infiltration.

The hydrological analysis of six years of experimental data reveals an average deep infiltration of about 95 mm per year, representing a substantial share of winter rainfall. Numerical modelling using Hydrus-2D/3D made it possible to simulate these transfers and to prepare the conditions for a tracer experiment planned for the next hydrological season, with the aim of more precisely tracking water dynamics in the soil during winter.

Key points

- ✓ The Boissy-le-Châtel plot, drained and monitored since 1972, is representative of the hydromorphic soils of the Paris Basin.
- ✓ Water budget at plot scale indicate an average recharge of the Brie aquifer of about 95 mm/year.
- ✓ Hydrus modelling confirms this recharge and supports the preparation of a tracer experiment to monitor soil water dynamics during the next winter season.

Introduction

L'agriculture représente un secteur économique important en France, avec une Surface Agricole Utile (SAU) de 29,1 millions d'hectares.

Cependant, un des principaux obstacles au développement de l'agriculture est l'engorgement des terres en eau. Les sols lessivés, dont la perméabilité décroît avec la profondeur, favorisent la formation d'une nappe perchée en hiver, rendant les terres trop humides et affectant la croissance des plantes. Pour pallier ce problème, le drainage souterrain est utilisé pour évacuer les excès d'eau temporaires dans le sol en améliorant la qualité des sols pour l'exploitation agricole. Le drainage souterrain est une technique ancienne qui s'est intensifiée avec la modernisation de l'agriculture, notamment en France dès les années 1960-1970, principalement pour les cultures céréalières (Nédélec, 2005). Aujourd'hui, environ 3 millions d'hectares, soit plus de 10 % de la surface agricole utile, sont drainés. Cette technique consiste à installer à environ 1 m de profondeur de la surface du sol un réseau de drains et de collecteurs, facilitant ainsi l'écoulement l'eau collectée vers le réseau hydrographique. Au-delà de cet intérêt agronomique, le drainage modifie la réponse hydrologique des écoulements de surface en réduisant fortement voire quasi totalement le ruissellement sur certains sols (Henine et al., 2012 ; King et al., 2014). À l'échelle d'une parcelle agricole, le drainage agricole améliore donc la capacité d'infiltration des sols et réduit significativement le ruissellement de surface (Augeard et al., 2005 ; Henine, 2010 ; Kao et al., 1998). En période de drainage intense, l'eau de pluie infiltrée est dirigée vers le réseau de drainage, limitant ainsi les flux d'infiltration en profondeur, généralement considérés comme négligeables.

La compréhension de l'impact sur les hydrosystèmes des réseaux de drainage fait pleinement partie des objectifs du PIREN Seine et de l'axe 5 pour répondre aux demandes des partenaires pour évaluer les effets des continuités et discontinuités spatio-temporelles sur les ressources en eau. Le partage de la pluie nette entre l'infiltration (recharge aquifère) et écoulement de subsurface (drainage) est un point bloquant dans les outils de modélisation du PIREN Seine du fait de leur granulométrie spatio-temporelle. La question d'infiltration à travers la couche relativement imperméable à plus forte teneur en argile, à l'origine de la formation de la nappe de proche surface en hiver, est très peu évoquée dans la littérature. En France, les recherches sur ce domaine remontent aux travaux de (Chopin, O., 1988 ; Henine et al., 2013 ; Zimmer, 1988). Généralement négligée, cette infiltration peut être estimée par le calcul du flux à travers la couche imperméable (gradient vertical de pression ou de teneur en eau) ou par un bilan hydrologique à l'échelle d'un système fermé (parcelle, bassin versant). En l'absence de ruissellement, un déficit de restitution du drainage agricole est associé à ces infiltrations profondes (Chopin, O., 1988 ; Zimmer, 1988). De plus, la nature pédologique du sol influence fortement le coefficient de restitution et donc de l'infiltration profonde (Zimmer et al., 1991).

La parcelle expérimentale de Boissy-le-Châtel (Henine et al. 2013), située sur le bassin versant de l'Orgeval, en Seine-et-Marne, mise en place en 1972, constitue un site d'étude privilégié pour analyser l'infiltration des eaux dans le bassin parisien. Ce sol, caractéristique de la région, est soumis à un système de drainage où l'infiltration profonde a longtemps été négligée en raison de la présence de l'horizon argileux supposé imperméable. Cependant, l'observation des fluctuations du niveau de la nappe de Brie sous-jacente suggère que la recharge de l'aquifère provient nécessairement de cette infiltration profonde.

Ainsi, pour caractériser ces infiltrations, plusieurs méthodes existent. Elles reposent soit sur la modélisation (Grismer, 2013 ; Henine et al., 2013 ; Hopmans, 2011), soit sur des mesures *in situ*. Parmi ces dernières, on trouve l'analyse de la teneur en eau, du potentiel matriciel, des concentrations d'isotopes naturels, des variations du niveau de la nappe phréatique, la tomographie de résistivité électrique (ERT) ou encore l'étude de la température (Arora and Ahmed, 2011 ; Bechkit, 2011 ; Clément et al., 2014 ; Henine et al., 2013 ; Tabbagh et al., 2009 ; Zimmer et al., 1991). Une autre approche consiste à utiliser un lysimètre (Pütz et al., 2016 ; Sobaga et al., 2023).

L'objectif de ce travail consiste à comparer ces différentes approches pour mieux caractériser l'infiltration profonde :

- Approche hydrologique : sur la parcelle de Boissy-le-Chatël (bassin versant de l'Orgeval), une analyse du comportement du système en se basant sur l'application des méthodes hydrologiques classiques permettra de comprendre la dynamique de l'eau dans le sol et de localiser dans le temps les périodes de recharge de la nappe de Brie. Cette recharge peut être estimée à partir d'un calcul du bilan hydrique.
- Approche par modélisation numérique : elle permettra de transcrire le schéma de circulation de l'eau dans le sol à la suite d'injection ponctuelle et instantanée d'un traceur et donc de valider l'hypothèse d'infiltration profonde par suivi ERT. 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.

1. Site d'étude

La parcelle de Boissy-le-Châtel est située dans le bassin de l'Orgeval, en Seine-et-Marne, à 70 km à l'est de Paris. Elle s'étend sur une superficie de 615 m² et constitue un site expérimental intégré à l'observatoire GIS ORACLE ([Oracle Orgeval INRAE](#)). Ce site est représentatif du bassin versant de l'Orgeval en Seine-et-Marne, grâce à la relative homogénéité de ses caractéristiques pédologiques (Trincal, 1994, Henine et al., 2022). Depuis les années 1960, ce site est équipé de nombreux instruments permettant le suivi des caractéristiques du sol et de son environnement.

Le réseau de drainage a été installé en 1972 (Figure 1), et est constitué de drains en poterie posés à une profondeur comprise entre 0,60 m et 0,80 m, avec un espacement de 6 mètres entre chaque ligne de drain. Chaque drain est un assemblage de tronçons en poterie de 30 cm de longueur, présentant un diamètre intérieur de 40 mm et un diamètre extérieur de 60 mm. L'eau excédentaire dans le sol s'infiltré au niveau des joints entre les tronçons. Ce réseau est connecté à un collecteur qui conduit l'eau vers l'exutoire de la parcelle. La parcelle est limitée sur les côtés par un mur d'argile de 1,20 m de profondeur l'isolant d'un apport d'eau extérieur.

Dans le cadre d'une étude sur l'infiltration profonde sous le réseau de drainage, l'instrumentation du débit de drainage a été suivie en continu depuis 1972, avec des périodes d'arrêt entre 2005 et 2011, puis entre 2019 et 2024. En février 2025, à la suite de l'installation d'un nouveau dispositif de tomographie de résistivité électrique (ERT), le suivi du débit de drainage a été remis en service. L'ensemble de l'instrumentation est installé à l'extérieur de la parcelle, dans un abri souterrain dédié.

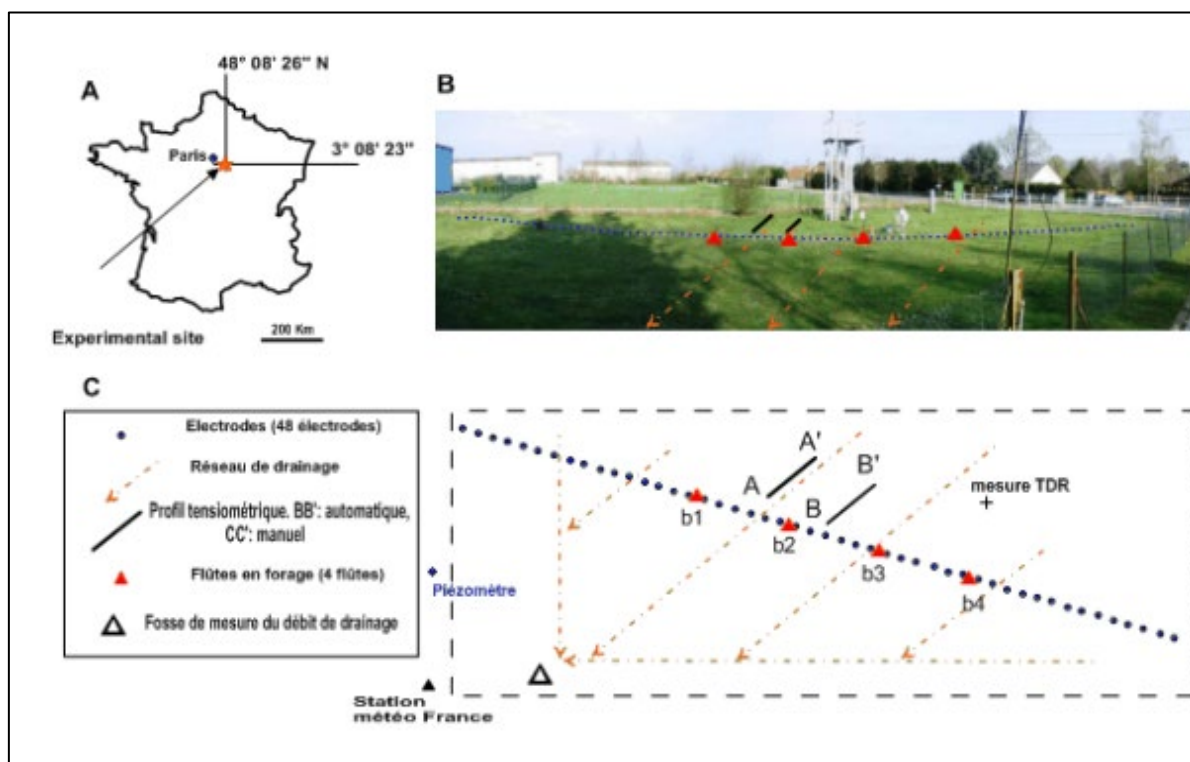


Figure 1. Dispositif expérimental de parcelle de Boissy le Châtel (Orgeval) et le schéma du système drainant

2. Quantification des infiltrations profondes avec l’approche hydrologique

L’objectif de cette approche est de comprendre la dynamique de l’eau dans le sol, de quantifier la part de la pluie nette qui s’infiltré, et de localiser les périodes de recharge de la nappe sous-jacente (nappe de Brie), à travers une analyse des données hydrologiques de terrain (précipitations, ETP, débits drainés) ainsi que de la hauteur de la nappe de Brie, afin de mettre en évidence l’existence d’une infiltration profonde. Cette approche repose sur les hypothèses suivantes :

- L’infiltration profonde est estimée uniquement pendant la période de drainage intense. Cette période est favorable à un écoulement gravitaire significatif. En dehors de cette période l’infiltration est physiquement impossible ou négligeable.
- La recharge de la nappe de Brie, située sur un plateau, provient exclusivement des précipitations, sans apport externe. Cela permet d’attribuer toute variation positive du niveau piézométrique à l’infiltration profonde issue l’infiltration profonde local.
- L’évapotranspiration réelle est assimilée à l’évapotranspiration potentielle. Cette approximation réduit les incertitudes liées au calcul de l’ETR, difficile à mesurer directement. Elle implique toutefois une surestimation des pertes en eau, ce qui peut conduire à une légère sous-estimation de l’infiltration profonde.

L’étude porte sur la période allant du 01/08/2012 au 31/07/2018. Dans un premier temps, nous avons défini les différentes phases de la saison de drainage pour chaque année hydrologique (du 1er août au 31 juillet), en mettant particulièrement l’accent sur les périodes d’amorçage du drainage et de drainage intense. Cette analyse permet d’identifier les moments propices à la recharge de la nappe de Brie. La recharge est ensuite estimée à partir du bilan hydrique, calculé pour chaque année.

Pour définir les différentes phases de drainage, la méthode des doubles cumuls pluies-débits est utilisée, comme proposée initialement par Aldanondo (1979) et reprise par (Chopin, O., 1988), (Lesaffre, 1989) et (Zimmer, 1988).

La méthode consiste à tracer les cumuls de lames d’eau drainés en fonction des cumuls de pluie. Les ruptures

de pente permettent de distinguer les trois phases caractéristiques : période sèche et/ou de recharge de la réserve utile du sol, amorce de drainage, et drainage intense. Le coefficient de restitution (CR) est calculé à partir de la pente de ces courbes : il représente le rapport entre la lame d’eau drainée et précipitée (P-ETP). En période de drainage intense, un défaut de restitution à 100 % théorique représente alors la part infiltrée sous drainage.

Afin d’illustrer la méthodologie de délimitation des périodes de drainage, la Figure 2 présente le cumul de lames d’eau drainées en fonction des cumuls (P-ETP) pour l’année hydrologique 2015-2016.

La Figure 2 montre que les premières pluies (période de rehumectation), représentant un cumul d’environ 215 mm, servent à réhumecter le sol en surface et à remplir la réserve utile. Les parties 2 et 3 correspondent respectivement à la saison d’amorce du drainage (du 10 septembre au 17 novembre 2015) et à la saison de drainage intense (du 17 novembre 2015 au 26 juin 2016), respectivement. Le coefficient de restitution est calculé durant cette dernière phase (partie 3) et s’élève à 71 %, indiquant une forte restitution du réseau de drainage de la parcelle (Zimmer, 1988).

Durant la première période, la nappe est encore profonde. La recharge de la nappe intervient à la fin de cette période, lorsque la capacité au champ du sol est atteinte et que l’écoulement gravitaire commence. Les périodes 2 et 3 indiquent la formation de la nappe perchée et la remontée de la nappe souterraine au-dessus des drains. Cela engendre la formation de l’écoulement de nappe vers les drains et le début de la saison de drainage (partie 3).

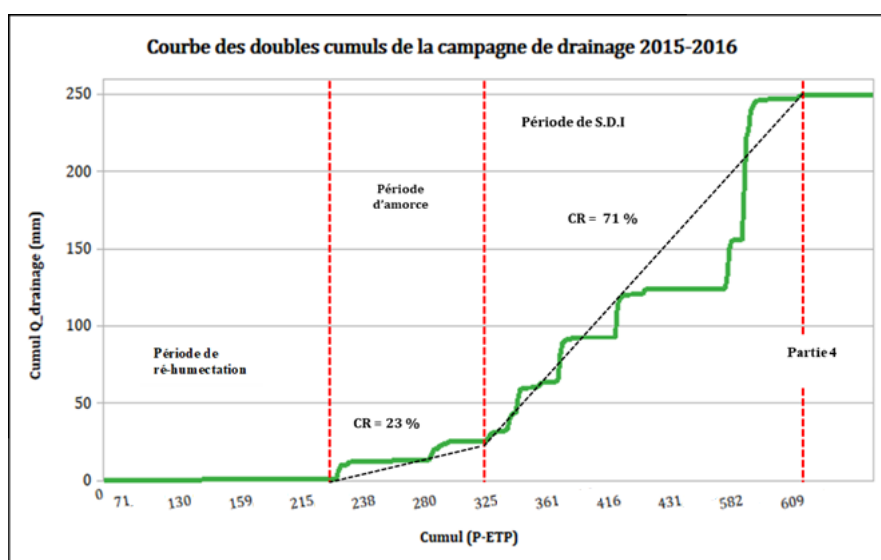


Figure 2. Courbe des doubles cumuls de la campagne de drainage 2015-2016

L’analyse du bilan hydrique sur la période 2012-2018 met en évidence une variabilité interannuelle marquée dans les conditions de recharge de la nappe de Brie (Tableau 1).

Tableau 1. Récapitulatif du calcul du bilan hydrique de 2012 à 2018

Années	Période d'amorce		Saison de drainage intense (SDI)					
	CR (%)	RU (mm)	CR (%)	Cum (P-ETP) (mm)	Cum_Qd (mm)	P - ETP - Qd (mm)	Début	Fin
2012-2013	40	137	74	193.41	88.81	104.6	07-déc	28-mai
2013-2014	18	103	57	248.23	141.89	106.34	28-oct	10-mars
2014-2015	9	229	70	233.88	163.8	70.08	15-nov	08-mai
2015-2016	23	175	71	316.45	224.08	92.37	17-nov	25-juin
2016-2017	11	136	70	342.75	239.64	103.11	04-févr	27-mars
2017-2018	29	108	61	412.28	307.39	107.89	10-sept	12-juin
Moyenne =						97.40 ± 14 mm		

Le coefficient de restitution (CR) pendant la saison de drainage intense varie de 57 à 74 %, avec des valeurs particulièrement élevées en 2012-2013 et 2015-2016, traduisant une efficacité du drainage. Cependant, un CR faible n'implique pas systématiquement un bilan de recharge plus important, comme l'illustre l'année 2014-2015, où le CR atteint 70 %, mais le bilan net reste modeste (70 mm), probablement en raison d'une forte capacité de rétention du sol en début de saison (RU = 229 mm) ou de pertes importantes par évapotranspiration (Zimmer, 1988). Le cumul des précipitations nettes (P - ETP) joue un rôle déterminant, avec des valeurs atteignant jusqu'à 412 mm en 2017-2018. Cette même année, le débit drainé cumulé (307 mm) est le plus élevé de la série, et le bilan de recharge (108 mm) confirme une année très favorable à l'infiltration profonde, d'autant plus que la saison de drainage s'étale sur près de neuf mois. À l'inverse, l'année 2016-2017 présente une saison de drainage intense exceptionnellement courte (moins de deux mois), mais un bilan élevé (103 mm), ce qui suggère une recharge concentrée sur une courte période, liée à des précipitations abondantes et efficaces en début d'année. La moyenne annuelle du bilan net d'infiltration est estimée à environ 97 mm.

Ces résultats confirment la régularité des conditions climatiques nécessaires au déclenchement du drainage en zone tempérée. Malgré des fluctuations annuelles, la SDI reste concentrée sur les mois d'hiver, période où l'évapotranspiration est minimale et le cumul des précipitations peut dépasser la capacité de stockage du sol. La recharge efficace précède généralement la SDI d'environ 2 à 4 semaines, traduisant un temps de latence entre la saturation des sols et le début du drainage actif. Dans l'ensemble, les résultats (Tableau 1) montrent que la recharge de la nappe de Brie dépend à la fois du volume des précipitations nettes (P - ETP), de la durée et de l'intensité du drainage, ainsi que de la capacité de rétention des sols. En moyenne, environ 97 mm par an sont disponibles pour l'infiltration profonde, représentant la quantité d'eau susceptible d'alimenter la nappe durant cette période de drainage intense. Cette infiltration confirme l'existence d'un apport réel à la nappe, dont la variabilité dépend principalement du climat de l'année considérée.

Pour ce qui est des périodes de recharge, la période d'amorce débute généralement entre début septembre et mi-octobre, bien que certaines années présentent des démarrages plus précoces, comme en 2017-2018 où elle commence dès le 10 août. Cette phase transitoire, souvent courte (1 à 2 mois), précède directement le début du drainage intense (SDI), indiquant que les premières pluies automnales suffisent généralement à saturer les sols et aussi à provoquer la remontée de la nappe superficielle en surface.

La Figure 3, représentant l'année 2015-2016, illustre bien cette dynamique. La période d'amorce commence dès le 10 septembre 2015, marquant un démarrage précoce de réhumectation du sol. La SDI commence à partir du 17 novembre 2015, avec une hausse progressive du cumul de drainage (courbe verte), traduisant un excédent net d'infiltration. Cette SDI se prolonge jusqu'au 25 juin 2016, soit une durée de plus de 7 mois. Le cumul des précipitations nettes (P - ETP, courbe rouge) augmente régulièrement, et la nappe de Brie (courbe bleue) remonte en surface, atteignant un pic en juin. Les fluctuations de la nappe sont caractéristiques d'une recharge soutenue, rendue possible par une pluviométrie régulière et une évapotranspiration modérée durant cette période. La fin de la SDI coïncide avec une augmentation notable de l'ETP, traduisant la transition vers la saison sèche.

Ce résultat met en évidence une situation particulièrement favorable à la recharge de la nappe de Brie, comparable à celle observée en 2017-2018. À l'inverse, certaines années comme 2016-2017, présentent des SDI très courtes (moins de deux mois), souvent associées à des déficits hydriques importants. De manière générale, la fin de la saison de drainage intense intervient entre mars et juin, en lien avec l'élévation des températures printanières et la reprise de l'ETP. Cette analyse souligne l'importance des conditions météorologiques dans la dynamique du drainage et de la recharge de la nappe superficielle, et rappelle la nécessité d'un suivi pluriannuel pour mieux comprendre les mécanismes d'infiltration.

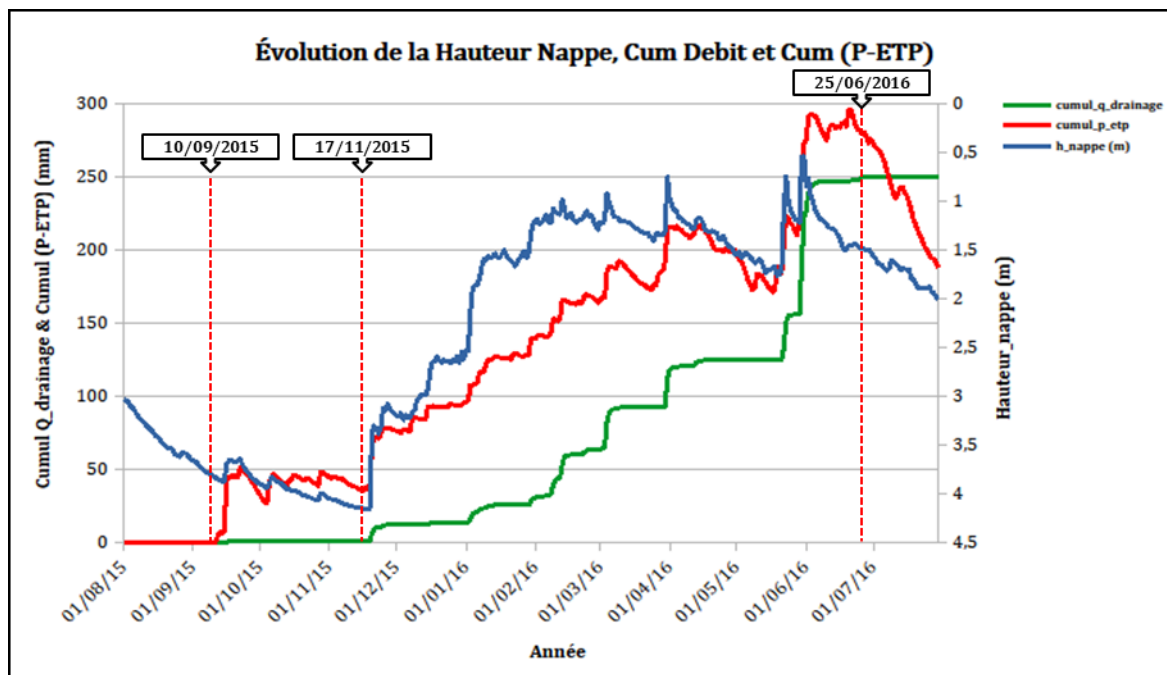


Figure 3. Courbes des cumuls des données hydrologiques et du niveau piézométrique de 2015-2016

3. Approche de modélisation numérique

Dans le cadre de cette étude, une approche complémentaire aux mesures de terrain est mise en œuvre : la simulation numérique du comportement hydrodynamique de la parcelle drainée. L'objectif principal de cette modélisation est de quantifier le flux de recharge de la nappe de Brie et d'en analyser la variabilité temporelle. Elle vise également à reproduire les dynamiques hydrologiques observées *in situ* et à anticiper les résultats d'une future campagne de traçage.

Le logiciel HYDRUS-2D est utilisé pour réaliser une simulation bidimensionnelle de l'écoulement de l'eau et du transport de solutés dans des milieux poreux.

La parcelle est représentée par un domaine bidimensionnel de 12 mètres de longueur, correspondant à une distance de 6 mètres entre deux drains, et une profondeur de 2 mètres (figure 9). Le sol est structuré en deux horizons superposés : un horizon supérieur composé d'une couche limoneuse de 76 cm d'épaisseur, présentant une bonne perméabilité, et un horizon inférieur constitué d'une couche argileuse peu perméable de 124 cm, limitant fortement la conductivité hydraulique à saturation. Les données d'entrée du système sont la pluie et l'évapotranspiration. Cette dernière est introduite sous forme d'un terme de transpiration, afin de représenter l'extraction racinaire dans les 30 premiers centimètres du sol. Ce processus permet un rééquilibre dynamique des pressions, notamment durant les périodes de forte évapotranspiration, grâce à la succion exercée par les plantes dans la zone racinaire. Ainsi, le sol s'assèche progressivement et ne réagit plus aux précipitations par un drainage actif pendant ces périodes sèches. Le maillage constitue une étape déterminante dans la modélisation, car il doit être conçu de manière à garantir un temps de simulation court et à éviter les

divergences lors du calcul numérique.

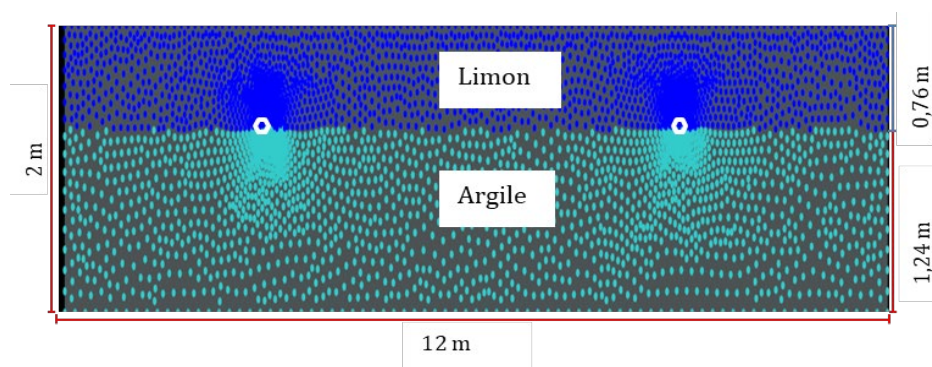


Figure 4. Géométrie et conditions aux limites du domaine modélisé

Deux configurations ont été simulées à l'aide du modèle HYDRUS 2D afin d'évaluer le comportement hydrodynamique du sol et de valider l'hypothèse d'infiltration profonde. Ces scénarios diffèrent par les conditions aux limites appliquées en fond de profil. Le Scénario 1 repose sur un système fermé. La surface est soumise à une pression atmosphérique ; un flux nul est imposé sur les côtés du domaine, situé à l'interdrain et considéré comme une limite de séparation des écoulements entre deux drains ; le fond du profil est également défini comme imperméable, excluant toute interaction avec la nappe phréatique. Le drain est représenté par la condition de suintement (Seepage Face) fonctionnant en deux régimes : condition de Neumann (flux nul) lorsque la pression est négative et condition de Dirichlet (pression nulle) en cas de pression positive. Le Scénario 2 introduit une condition de charge au niveau du fond du profil. Cette charge variable représente la contribution possible de la nappe de Brie, en simulant la différence entre les niveaux piézométriques mesurés et la profondeur du sol. Cette condition n'a été appliquée que pour la période de validation, les données piézométriques nécessaires n'étant pas disponibles pour la période de calage. Ce terme permet de prendre en compte les échanges verticaux avec le substratum argileux, notamment lors des épisodes de saturation. Les deux scénarios ont été comparés à l'aide du critère de Nash-Sutcliffe (NSE). Le calage est réalisé sur la saison de drainage 2014-2015, avec un NSE de 0.73, et la validation sur la période de drainage 2015–2016, avec un NSE de 0.84.

Le modèle calé dans le cadre du Scénario 2 a été utilisé pour simuler une expérience de traçage par injection ponctuelle de chlorure de calcium (CaCl_2). L'injection a été réalisée à raison de 50 g/L/h pendant 24 heures, débutant à $t = 24$ h. L'injection, initiée en amont de la phase de drainage active, a été appliquée sur une surface de $0,5 \times 0,2$ m. Les simulations ont permis de déterminer que le positionnement optimal de l'injection se situe à mi-distance entre les deux drains, limitant ainsi les écoulements préférentiels directs vers les drains.

La figure ci-dessous présente une synthèse des dynamiques hydrologiques observées durant la période de traçage sur la parcelle de Boissy, entre décembre 2015 et mai 2016.

Le premier pic de concentration apparaît environ 20 jours après l'injection (soit entre $t \approx 520$ h et 680 h), ce qui permet d'estimer le temps de résidence du traceur dans le sol. Ce retard s'explique par la percolation progressive du traceur à travers la zone non saturée, caractéristique d'un milieu poreux complexe. L'apparition de pics secondaires à des temps plus avancés suggère un transport diffus, marqué par la dispersion hydrodynamique et des écoulements préférentiels qui favorisent l'étalement temporel du traceur.

Ces pics coïncident avec des événements pluvieux intenses (figure 5.a) qui engendrent de hauts débits de drainage ($Q_{\text{obs}}/Q_{\text{sim}}$, figure 5.c). Cela indique que les recharges ponctuelles amplifient la mobilisation du traceur et accélèrent son transfert vers les drains, confirmant l'influence directe des pluies sur la dynamique de lessivage du sol.

Concernant l'infiltration sous drainage (courbe rouge, figure 5.b), celle-ci apparaît de manière plus marquée à

partir de $t \approx 1000$ h (soit environ 42 jours après l'injection), traduisant une propagation lente du traceur jusqu'à la nappe. Cela retarde sa migration par rapport au front d'eau, phénomène bien connu dans les sols argileux ou à forte capacité d'échange ionique.

Enfin, il est important de souligner que l'infiltration sous drain représente environ 50 % du débit total de drainage (224, Tableau 1). Ce ratio est cohérent avec les conditions de drainage intense observées durant la SDI. Une saison plus humide ou prolongée pourrait conduire à une part d'infiltration significativement plus importante.

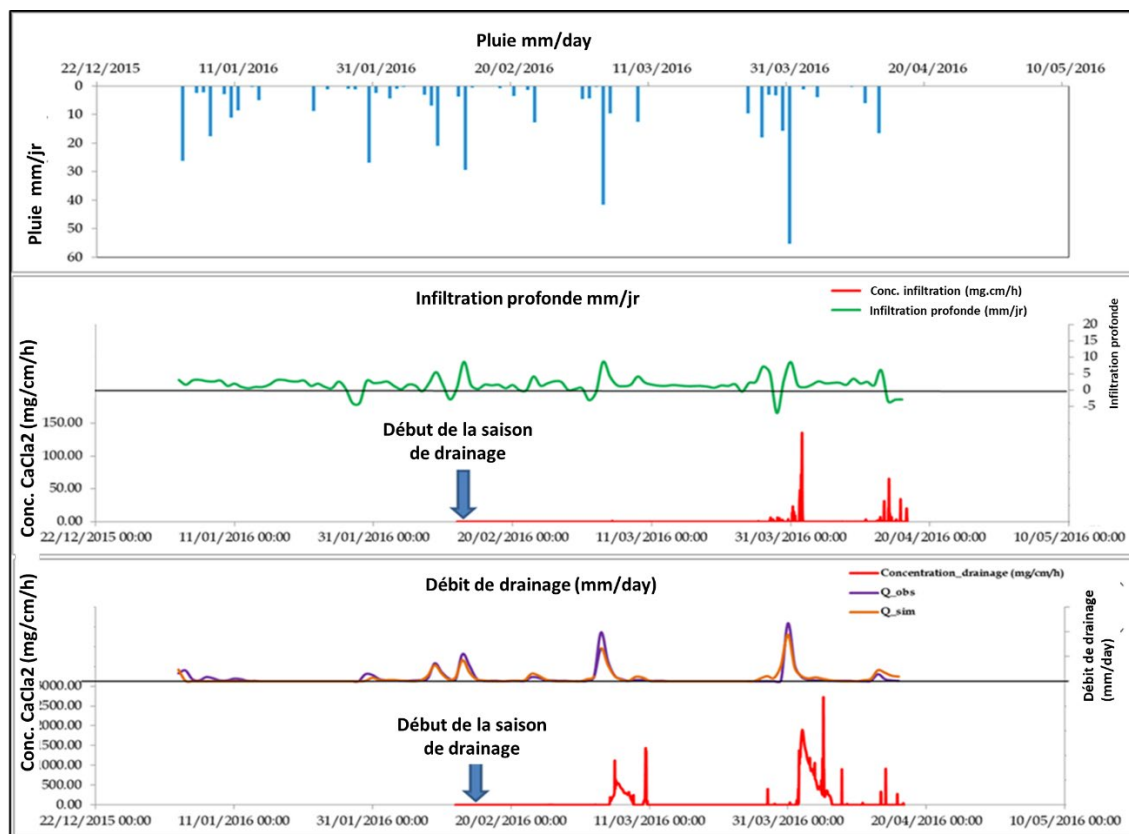


Figure 5. Simulation du débit de drainage et du transfert de traceur sur la parcelle de Boissy-le-Châtel. (a) Précipitations utilisées comme forçage du modèle. (b) Infiltration profonde simulée. (c) Concentration du traceur dans l'eau infiltrée. (d) Débit de drainage simulé et mesuré. (e) Concentration du traceur à la sortie des drains

Conclusion

Dans un contexte marqué par une forte demande en eau potable et en irrigation, la gestion optimale des ressources en eau s'avère complexe et nécessite une meilleure compréhension des processus de recharge des nappes phréatiques. L'étude du comportement de la nappe de Brie, à travers une analyse pluriannuelle, a permis 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 deux axes complémentaires. La première approche, hydrologique, s'appuie sur l'exploitation des données climatiques et hydrologiques sur la période du 01/08/2012 au 31/07/2018. Il en ressort une infiltration profonde moyenne de 97 mm/an contrôlée principalement par la variabilité climatique, la capacité de rétention du sol et la durée de la saison de drainage intense.

Le deuxième axe s'appuie sur la modélisation numérique avec HYDRUS 2D/3D, calibrée sur la saison 2014–2015 et validée sur 2015–2016. L'introduction d'une condition de charge au fond du profil améliore

significativement la performance du modèle (NSE passant de 73 % à 84 %) et met en évidence des flux verticaux sortants représentant jusqu'à 50 % du drainage total, confirmant une infiltration profonde active. La simulation de l'expérience de traçage réalisée sur la période de drainage (12/02/2016 au 16/04/2016), via une injection ponctuelle de 40 kg de CaCl₂ (50 g/L/h pendant 10 h), révèle une augmentation de la conductivité électrique apparente jusqu'à trois fois la valeur initiale (500–1000 µS/cm à 1000–1500 µS/cm), un temps de résidence moyen du traceur de 20 jours et une migration progressive vers la nappe, offrant un protocole optimisé pour les futurs suivis géophysiques. Ces résultats ont également permis de quantifier et de suivre la dynamique temporelle du flux profond à travers la couche imperméable.

Plusieurs perspectives s'ouvrent pour renforcer et étendre ces travaux. D'un point de vue géophysique, l'exploitation des panneaux de résistivité inversée récents obtenus via l'outil OHMPI lors des saisons de drainage récentes offrirait une comparaison précieuse avec les données historiques de 2011-2012 (Clément et al., 2014).

Sur le plan de la modélisation, il serait pertinent de réaliser l'expérience de traçage sur l'ensemble de la saison de drainage intense 2015-2016 (17 novembre 2015 – 25 juin 2016), afin d'évaluer la capacité à reproduire des flux verticaux sortants cette saison. La répétition de cette expérience sur d'autres années hydrologiques permettrait de valider la robustesse des conclusions.

Pour retrouver les outils et données

Les données sont publiées sous licence creative common [CC-BY-NC-SA v4.0](#), mises à disposition ici : [BDOH - Oracle](#)

Bibliographie

Aldanondo, J.-D. 1979. Etude du fonctionnement du drainage agricole. Ecole Nationale des Ingénieurs des Travaux ruraux et des Techniques Sanitaires, Etude du Cemagref

Arora, T., Ahmed, S., 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. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2010.11.003>

Augeard, B., Kao, C., Ledun, J., Chaumont, C., Nedelec, Y., 2005. Le ruissellement sur sols drainés : identification des mécanismes de genèse. *Ingénieries eau-agriculture-territoires* 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 (These de doctorat). Paris 6.

Chopin, O., 1988. Etude des infiltrations profondes. Ecole Nationale des Ingénieurs des Travaux Ruraux et des Techniques Sanitaires, Cemagref, Paris.

Clément, R., Moreau, S., Henine, H., Guérin, A., Chaumont, C., Tournebize, J., 2014. On the value of combining surface and cross-borehole ERT measurements to study artificial tile drainage processes. *Near Surface Geophysics* 12, 763–776. <https://doi.org/10.3997/1873-0604.2014034>

Grismer, M.E., 2013. Estimating agricultural deep drainage lag times to groundwater: application to Antelope Valley, California, USA. *Hydrological Processes* 27, 378–393. <https://doi.org/10.1002/hyp.9249>

- 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 (phdthesis). Doctorat Hydrologie Science de l'Eau, Université Paris VI. <https://doi.org/10/document>
- Henine, H., Bacha, F., Clément, R., Guérin, A., Chaumont, C., Tournebize, J., 2013. Caractérisation des infiltrations profondes sous système drainé : Application à la parcelle de Boissy le Chatel.
- Henine, H., Chaumont, C., Tournebize, J., Augéard, B., Kao, C., Nedelec, Y., 2012. Le rôle des réseaux de drainage agricole dans le ralentissement dynamique des crues : interprétation des données de l'observatoire « Orgeval ». *Sciences Eaux & Territoires* 16–23. <https://doi.org/10.3917/set.hs05.0004>
- Henine, H., Jeantet, A., Chaumont, C., Chelil, S., Lauvernet, C., Tournebize, J., 2022. Coupling of a subsurface drainage model with a soil reservoir model to simulate drainage discharge and drain flow start. *Agricultural Water Management* 262, 107318. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107318>
- Henine, H., Nédélec, Y., Ribstein, P., 2014. Coupled modelling of the effect of overpressure on water discharge in a tile drainage system. *Journal of Hydrology* 511, 39–48. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.12.016>
- Hopmans, J.W., 2011. Infiltration and Unsaturated Zone, in: *Treatise on Water Science*. Elsevier, pp. 103–114. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53199-5.00031-2>
- Kao, C., Nedelec, Y., Zimmer, D., 1998. Surface runoff mechanisms and modeling in subsurface drained fields, in: *7th International Drainage Symposium in the 21st Century: Food Production and the Environment*, Orlando, USA, 8-10 March 1998. Orlando, United States, pp. 258–266.
- King, K.W., Fausey, N.R., Williams, M.R., 2014. Effect of subsurface drainage on streamflow in an agricultural headwater watershed. *Journal of Hydrology* 519, 438–445. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.07.035>
- Lesaffre, B., 1989. Fonctionnement hydrologique et hydraulique du drainage souterrain des sols temporairement engorgés : débits de pointe et modèle SIDRA. Cemagref Editions.
- Nédélec, Y., 2005. Interactions en crue entre drainage souterrain et assainissement agricole (Thèse). Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et Forêts, Paris.
- Pütz, T., Kiese, R., Wollschläger, U., Groh, J., Rupp, H., Zacharias, S., Priesack, E., Gerke, H.H., Gasche, R., Bens, O., Borg, E., Baessler, C., Kaiser, K., Herbrich, M., Munch, J.-C., Sommer, M., Vogel, H.-J., Vanderborght, J., Vereecken, H., 2016. TERENO-SOILCan: a lysimeter-network in Germany observing soil processes and plant diversity influenced by climate change. *Environmental earth sciences* 75, 1242. <https://doi.org/10.1007/s12665-016-6031-5>
- Sobaga, A., Decharme, B., Habets, F., Delire, C., Enjelvin, N., Redon, P.-O., Faure-Catteloin, P., Le Moigne, P., 2023. Assessment of the interactions between soil–biosphere–atmosphere (ISBA) land surface model soil hydrology, using four closed-form soil water relationships and several lysimeters. *Hydrology and Earth System Sciences* 27, 2437–2461. <https://doi.org/10.5194/hess-27-2437-2023>
- Tabbagh, A., Guérin, R., Bendjoudi, H., Cheviron, B., Bechkit, M.-A., 2009. Pluri-annual recharge assessment using vertical soil temperature profiles: Example of the Seine river basin (1984–2001). *Comptes Rendus Geoscience, Hydrogéophysique* 341, 949–956. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2009.08.00>
- 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 Géomètre 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. Paris VI, Paris.

Zimmer, D., Bouzigues, R., Chossat, J.-C., Favrot, J.-C., Guiresse, A.M., 1991. Importance et déterminisme des infiltrations profondes en Luvisols-Redoxisols drainés. Incidence sur les modalités de drainage. Science du sol 29, 321.