
Mise en application des outils développés dans Caphéine : Site 4 site industriel en contexte alluvionnaire

CaPhéInE : CAractérisation des PHEnomènes de transfert en zone INsaturée des Eléments traces

Mars 2012

Ce guide a été rédigé dans le cadre du projet CaPhéInE financé par l'Ademe et réalisé en partenariat par le BRGM, l'INERIS, EDF et le CEA :



Coordinateur du projet : Valérie Guérin (BRGM)

Rédacteurs :

- Fabien Decung (EDF),
- Valérie Guérin (BRGM)
- Sébastien Kaskassian (BURGEAP)

Ont également collaboré à ce guide :

- Boris Chevrier (BRGM)
- Mohamed Krimissa et Cécile Doukouré (EDF)



Sommaire

1	<i>Introduction.....</i>	<i>1-13</i>
1.1	Problématique contexte	1-13
1.2	Objectifs et livrables du projet CAPHEINE.....	1-14
1.3	Objectifs du présent guide et place dans la méthodologie	1-14
1.4	Limites du guide	1-15
2	<i>Contexte et problématique</i>	<i>2-17</i>
2.1	Contexte	2-17
2.1.1	Contexte géologique	2-17
2.1.2	Contexte hydrogéologique	2-17
2.1.3	Conductivité hydraulique, porosité efficace, dispersivité	2-18
2.2	Problématique	2-18
3	<i>Caractérisation hydrique : Acquisition des paramètres hydrodynamiques (comparaisons de méthodes).....</i>	<i>3-21</i>
3.1	Contexte et problématique	3-21
3.2	Choix des parcelles et des méthodes de mesure.....	3-21
3.2.1	Profils pédologiques.....	3-22
3.2.2	Choix des méthodes mises en œuvre pour l'acquisition des paramètres hydrodynamiques (Ks, lois $h(\theta)$ et $k(\theta)$).....	3-23
3.3	Mise en œuvre.....	3-26
3.3.1	Classification des échantillons (USDA) pour l'estimation des paramètres hydrodynamiques via ROSETTA (BDD UNSODA).....	3-26
3.3.2	Mise en œuvre des méthodes d'acquisition de Ks par infiltration in situ	3-27
3.3.3	Mise en œuvre des méthodes d'acquisition des lois $h(\theta)$ et $k(\theta)$ en laboratoire	3-27



3.4	Résultats obtenus pour la comparaison des Ks	3-31
3.4.1	Comparaison des Ks acquis sur la zone TN.....	3-31
3.4.2	Comparaison des Ks acquis sur la zone RD.....	3-32
3.5	Estimation des lois de rétention $h(\theta)$ et $k(\theta)$	3-34
3.5.1	Estimation du paramètre de normalisation en pression Hg.....	3-34
3.5.2	Comparaison des courbes de rétention capillaire et de conductivité relative établies à partir des méthodes BEST et ROSETTA.....	3-37
3.5.3	Conclusion sur l'estimation/mesures des lois de rétention	3-44
3.6	Critiques et retour d'expériences.....	3-44
4	<i>Détermination des temps de transfert par essai d'infiltration et de traçage avec grand infiltromètre</i>	4-47
4.1	Principes de mise en œuvre	4-47
4.1.1	Principes.....	4-47
4.1.2	Mise en œuvre.....	4-47
4.1.3	Essais préliminaires	4-49
4.1.4	Métrologie de l'essai.....	4-49
4.2	Interprétation des essais préliminaires.....	4-50
4.3	Restitutions de l'essai d'infiltration et de traçage	4-50
4.3.1	Suivi des lames d'eau infiltrées, des vitesses d'infiltration et des niveaux piézométriques	4-50
4.3.2	Suivi des concentrations en traceur dans l'infiltromètre et dans les piézomètres.....	4-52
4.4	Critiques et retour d'expériences.....	4-55
4.4.1	Mise en œuvre.....	4-55
4.4.2	Résultats attendus et valorisation.....	4-56
5	<i>Interprétation analytique et modélisation mécanistique de l'essai d'infiltration et de traçage</i>	5-57



5.1	Méthodes d'interprétation proposées.....	5-57
5.2	Distribution des temps de séjour (DTS) et fonctions de transfert (modélisation de niveau	
1)	5-58	
5.3	Modélisation de l'essai d'infiltration et de traçage	5-61
5.3.1	Conceptualisation du modèle hydrodynamique	5-61
5.3.2	Ecoulements locaux	5-62
5.3.3	Modèle de capillarité pour la ZNS et paramètres hydrodynamiques	5-63
5.3.4	Schématisation, maillage et mécanismes	5-64
5.3.5	Processus de calage du modèle et critères de calage du modèle.....	5-65
5.3.6	Etapas de validation du modèle hydrodynamique	5-67
5.3.7	Etapas de validation du modèle de transfert	5-74
5.3.8	Tableau synthétique des paramètres du modèle homogène	5-82
5.4	Influence des paramètres d'entrée - Analyse de sensibilité.....	5-82
5.5	Critiques et Retours d'expériences.....	5-85
5.5.1	Construction et validation du modèle numérique	5-85
5.5.1	Valorisation et extrapolation du modèle	5-86
6	Conclusion.....	6-87
6.1	Investigations menées sur le site N°4 et résultats / interprétations.....	6-87
6.2	Enseignements opérationnels / méthodologiques	6-88
7	Références	7-91
8	Annexe 1 : Caractérisation hydrique : Acquisition des paramètres hydrodynamiques	
	(comparaisons de méthodes) et Estimation des temps de transferts (mise en œuvre du grand	
	infiltromètre).....	8-93
8.1	Classification des échantillons (USDA) pour l'estimation des paramètres	
	hydrodynamiques via ROSETTA (BDD UNSODA)	8-93
8.1.1	Méthodologie	8-93

8.1.2	Résultats / Classification.....	8-94
8.2	Correspondance entre mesures d’humidité pondérale et mesures d’humidité volumique	8-97
8.2.1	Mesure d’humidité des matériaux prélevés sur le terrain	8-97
8.2.2	Correspondance entre mesures d’humidité pondérale et mesures d’humidité volumique.	8-97
8.2.3	Mesure d’humidité des matériaux prélevés sur le terrain	8-99
8.2.4	Correspondance entre mesures d’humidité pondérale et mesures d’humidité volumique.	8-99
9	<i>Annexe 2 : Détermination des temps de transfert par essai d’infiltration et de traçage avec grand infiltromètre.....</i>	<i>9-103</i>
9.1	Distribution des temps de séjour (DTS) et fonctions de transfert.....	9-103
10	<i>Annexe 3 : Influence des paramètres d’entrée - Analyse de sensibilité.....</i>	<i>10-107</i>
10.1.1	Sensibilité des paramètres hydrodynamiques.....	10-107
10.1.2	Sensibilité des paramètres hydrodispersifs.....	10-110

Illustrations

Liste des figures

Figure 1 - Lien entre les différents guides CAPHEINE	1-15
Figure 1 : Profils de sol de la parcelle TN distants de 5m (Fosse P3 à gauche et P2 à droite).....	3-22
Figure 2 : Profil de sol de la parcelle RD.....	3-23
Figure 3 : Méthodes d'investigations mises en œuvre sur le site N°4 selon les différents niveaux de la méthodologie proposée et l'objectif visé pour l'étude des transferts en ZNS	3-24
Figure 4 : Classification des échantillons de sols sur les parcelles RD, NR et TN [carrés : NR, cercles : RD, triangles : TN].....	3-26
Figure 5 : Equipement pour la mesure conjointe de l'humidité et de la succion (Terrain naturel TN).....	3-28
Figure 6 : Courbe d'humidité - succion et modèle ajusté manuellement selon la loi de van Genuchten avec les conditions de Mualem (Terrain naturel TN)	3-30
Figure 8 : Comparaison des estimations de Ks (TN, [m/s]) par FPTs ROSETTA, la procédure BEST (mesures 2010), les méthodes Porchet ou microforage/mini-Porchet et les FPTs Rosetta (moyenne, 5 ^{ème} et 95 ^{ème} percentiles).....	3-31
Figure 9 : Comparaison des estimations de Ks sur le Site N°4 (RD, [m/s]) par la méthode BEST (mesures 2005 et 2010), les méthodes micro-forage/mini-Porchet (surface/50cm) ou Porchet (1m), FPTs Rosetta (moyenne, 5 ^{ème} et 95 ^{ème} percentiles) et essais Darcy laboratoire	3-33
Figure 10 : Estimation de la frange capillaire Hg sur la parcelle RD : méthodes BEST 2005, 2010 et FPTs	3-35
Figure 11 : Estimation de la frange capillaire Hg sur la parcelle NR : méthodes BEST 2005, 2010 et FPTs	3-35
Figure 12 : Estimation de la frange capillaire Hg sur la parcelle TN : méthodes BEST 2010, FPTs et {TDR ; Tensiomètres} en laboratoire.....	3-36
Figure 13 : Courbes normalisées k(Se) tracées à partir des paramètres estimés sur la parcelle RD par la procédure BEST (essais 2005 & 2010) et interprétées via FPTs (ROSETTA)	3-40
Figure 14 : Courbes h(θ) (haut) et k(θ) (bas) tracées à partir des paramètres estimés en surface de la parcelle TN par la procédure BEST (essais 2005 & 2010), interprétées via FPTs (Rosetta) et acquis expérimentalement en laboratoire via {TDR ;Tensiomètre}	3-41
Figure 15 : Courbes h(θ) (haut) et k(θ) (bas) tracées à partir des paramètres estimés en surface de la parcelle NR par la procédure BEST (essais 2005 & 2010) et interprétées via FPTs (Rosetta)	3-43



Figure 16 : Estimation de la durée des essais nécessaire à l'obtention d'une lame infiltrée cumulée I_{1D} (colonne de sol) comprise entre 3 et 6 cm en fonction de la gamme de perméabilité attendue	3-45
Figure 17 : Méthodes d'investigations mises en œuvre selon les différents niveaux de la méthodologie proposée et l'objectif visé pour l'étude des transferts en ZNS	4-47
Figure 19 : Suivi de la vitesse d'infiltration (QINF en m/h) et de la lame d'eau cumulée infiltrée (m) pendant l'essai au droit de l'infiltromètre.....	4-51
Figure 20 : Suivi des niveaux piézométriques dans les ouvrages Sc41, Sc40 et PzN04 (m NGF) et des débits d'infiltration au droit de l'infiltromètre et de pompage dans Sc41 (L/h) pendant l'essai.....	4-51
Figure 21 : Comparaison des estimations de Ks sur le Site N°4 (RD, [m/s]) par la méthode BEST (mesures 2005 et 2010), les méthodes micro-forage/mini-Porchet (surface/50cm) ou Porchet (1m), FPTs Rosetta (moyenne, 5ème et 95ème percentiles), essais Darcy laboratoire et « grand infiltromètre».....	4-52
Figure 22 – Suivi de la concentration en Rhodamine (ppb) et du débit d'infiltration (L/h) dans l'infiltromètre entre T=0h et T=25h.....	4-53
Figure 23 – Suivi de la concentration en Rhodamine (ppb) dans les piézomètres (Sc41, Sc40 et PzN04) pendant l'essai	4-54
Figure 24 : Méthodes d'investigations mises en œuvre sur le site N°4 selon les différents niveaux de la méthodologie proposée par Caphéine et l'objectif visé pour l'étude des transferts en ZNS	5-58
Figure 25 – Test de reconvolution des fonctions de transfert issues de la déconvolution des courbes de concentrations pour une distance de parcours de 3,75 m - calage avec 1 fonction Piston-Dispersion (figure du haut) et avec 2 fonctions Piston-Dispersion (figure du bas)	5-60
Figure 26 – Coupe lithologique du piézomètre Sc40.....	5-62
Figure 27 – Maillage surfacique au voisinage de l'infiltromètre (gauche), projection du maillage (non structuré) au droit de l'infiltromètre en coupe verticale (droite).	5-65
Figure 28 : Modélisation du débit d'infiltration (Bas : zoom sur la période T=[0 :45h]). Sensibilité à Ks en ZNS (modèle homogène). Phase avec maintien de charge : $H_{inf} = 20\text{cm}$; Phase avec défaut de maintien de charge : $H_{inf} = 35\text{cm}$ (débordement non pris en compte). Cercles : Mesures, Traits : Modèle	5-68
Figure 29 : Modélisation de la réponse dynamique des piézomètres Sc41, Sc40, N04. Sensibilité à la valeur de Ks en nappe (modèle homogène). Phase avec maintien de charge : $H_{inf} = 20\text{cm}$; Phase avec défaut de maintien de charge : $H_{inf} = 35\text{cm}$ (débordement non pris en compte). Cercles : Mesures, Traits : Modèle.....	5-69
Figure 30 : Modélisation de la réponse dynamique des piézomètres Sc41, Sc40, N04 avec prise en compte du flux de débordement. $H_{inf} = 20\text{cm}$ (conditions normales) ; $H_{inf} = 35\text{cm}$ (+ flux de débordement). Cercles : Mesures, Traits : Modèle.....	5-71
Figure 31 : Modèle hydrodynamique ZNS/ZS : propagation du bulbe d'humidité au droit de l'infiltromètre avec formation d'un dôme.....	5-72
Figure 32 : Profil de teneur en eau au droit de l'infiltromètre au cours de l'essai d'infiltration	5-74



- Figure 33 : Modélisation de l'infiltration du traceur. Sensibilité à la valeur de Ks en ZNS (modèle homogène). Flux massique = 6.6 g/h. Cercles : données mesurées in-situ, Traits : Modèle. 5-75
- Figure 34 : Modélisation des restitutions du traceur dans l'infiltromètre (haut) et en Sc41, Sc40, N04 (bas). Phase avec maintien de charge : $H_{inf} = 20\text{cm}$; Phase avec défaut de maintien de charge : $H_{inf} = 35\text{cm}$ (avec prise en compte du débordement). Cercles : Mesures, Traits : Modèle..... 5-78
- Figure 36 : Modélisation des restitutions du traceur en Sc41, Sc40, N04. $H_{inf} = 20\text{cm}$ (conditions normales) ; Phase avec maintien de charge : $H_{inf} = 20\text{cm}$; Phase avec défaut de maintien de charge : $H_{inf} = 35\text{cm}$ (avec prise en compte du débordement). Cercles : Mesures, Traits : Modèle..... 5-80
- Figure 37 : Modèle de transfert en ZNS/ZS : lessivage du traceur au droit de l'infiltromètre 5-81
- Figure 38 : Triangle textural de l'USDA..... 8-94
- Figure 39 : Classification des échantillons de sols sur les parcelles NR et RD [carrés :NR, cercles :RD, triangles : TN]..... 8-96
- Figure 40 : Evolution humidité pondérale (mesurée au laboratoire) humidité volumique (mesure sonde TDR) avec la profondeur : Terrain naturel TN 8-98
- Figure 41 : Evolution humidité pondérale (mesurée au laboratoire) humidité volumique (mesure sonde TDR) avec la profondeur : Tranche 4-5 : Remblai décompacté RD (haut : compaction 3 kg ; bas : compaction 1 kg)8-101
- Figure 42 – Fonctions de transfert composées de 2 fonctions Piston-Dispersion entre l'infiltromètre et SC41 issues de la déconvolution des courbes de concentrations et de flux massiques pour les 2 distances de parcours retenues..... 9-105
- Figure 43 – Test de reconvolution des fonctions de transfert issues de la déconvolution des courbes de concentrations pour une distance de parcours de 3,75 m - calage avec 1 fonction Piston-Dispersion (figure du haut) et avec 2 fonctions Piston-Dispersion (figure du bas) 9-106
- Figure 44 : Sensibilité à la valeur de Ks en ZNS (modèle homogène). Modélisation des restitutions du traceur en Sc41, Sc40, N04. $H_{inf} = 20\text{cm}$ (conditions normales) ; $H_{inf} = 35\text{cm}$ (sans flux de débordement). Cercles : Mesures, Traits : Modèle..... 10-108
- Figure 45 : Sensibilité à la valeur de Ks en nappe (modèle homogène). Modélisation de la réponse dynamique des piézomètres Sc41, Sc40, N04. $H_{inf} = 20\text{cm}$ (conditions normales) ; $H_{inf} = 35\text{cm}$ (sans flux de débordement). Cercles : Mesures, Traits : Modèle..... 10-109
- Figure 46 : Sensibilité à la valeur de Ks en nappe (modèle homogène). Modélisation des restitutions du traceur en Sc41, Sc40, N04. $H_{inf} = 20\text{cm}$ (conditions normales) ; $H_{inf} = 35\text{cm}$ (sans flux de débordement). Cercles : Mesures, Traits : Modèle..... 10-110
- Figure 47 : Sensibilité aux coefficients de dispersion en ZNS/ZS (modèle homogène). Modélisation des restitutions du traceur en Sc41, Sc40, N04. $H_{inf} = 20\text{cm}$ (conditions normales) ; $H_{inf} = 35\text{cm}$ (sans flux de débordement). Cercles : Mesures, Traits : Modèle..... 10-112
- Figure 48 : (haut) Modifications de mise en œuvre de l'essai grand infiltromètre : a) Suivi de la concentration dans l'infiltromètre ; (bas) Restitutions du modèle en Sc41 , soumis à des modifications du scénario de rejet dans l'infiltromètre (H_{INF} , T_{INF} , pompage) 10-114



Liste des tableaux

Tableau 1 : Suivi temporel de l'humidité et des succions lors d'un cycle de séchage (Terrain naturel TN).....	3-29
Tableau 2 : Choix du modèle de rétention capillaire pour la ZNS.....	5-63
Tableau 3 : Synthèse des paramètres hydrodynamiques relatifs aux essais de caractérisations préliminaires .	5-63
Tableau 4 : Tableau synthétique des données d'intérêts, des paramètres numériques et critères de validation utilisés pour le calage manuel du modèle.....	5-65
Tableau 5 : Synthèse des différences entre les restitutions du modèle et les observations. Explications avancées et proposition d'axes d'améliorations.....	5-71
Tableau 6 : Synthèse des différences entre les restitutions du modèle de transfert et les observations. Explications avancées et proposition d'axes d'améliorations	5-77
Tableau 7 : Paramètres du modèle de référence	5-82
Tableau 8 : Tableau synthétique des tests de sensibilité des restitutions du modèle (PZ et BTCs) aux paramètres du modèle (Paramètre sensible : ● ; peu sensible : ○ ; nc. non connu / finalisé).....	5-84
Tableau 9 : Coupures granulométriques considérées.....	8-93
Tableau 10 : Caractéristiques des sols de la zone TN d'après leurs courbes granulométriques.....	8-95
Tableau 11 : Caractéristiques des sols de la zone RD d'après la courbe granulométrique	8-95
Tableau 12 : Humidité pondérale des sols en place (Terrain naturel TN).....	8-97
Tableau 13 : Masses volumiques apparentes des essais laboratoire zone TN	8-98
Tableau 14 : Humidité pondérale des sols en place zone Tranche 4-5 : Remblai décompacté RD	8-99
Tableau 15 : Masses volumiques apparentes des essais en laboratoire zone TN	8-100
Tableau 16 : Paramètres de calage des fonctions de transfert globales « ZNS+NAPPE » (type Piston-Dispersion 1D) pour l'essai d'infiltration avec traçage entre l'infiltromètre et Sc41	9-104
Tableau 17 : Tableau synthétique des tests de sensibilité aux conditions de mise en œuvre de l'essai	10-115

Acronymes

BEST : Beerkan Estimation of Soils Transfer parameters

BDD : Bases De Données

BTCs : Courbes de percée (BreakThrough Curves)

d10 : diamètre laissant passer 10% des grains en masse (mm)

d50 : diamètre laissant passer 50% des grains en masse (mm)

ETM : Eléments Traces Minéraux

FPTs : Fonction de PédoTransfert (PedoTransfer Function)

TDR : Time Domain Reflectometrie

USDA : United States Department of Agriculture

VER : Volume Elémentaire Représentatif

ZNS : Zone Non Saturée

ZS :Zone Saturée

Symboles

Paramètres (Equation de Richards)	Symboles	Unités
teneur en eau volumique	θ	[-]
tenseur de perméabilité hydraulique du milieu poreux	$\overline{\mathbf{K}}$	[LT ⁻¹]
charge hydraulique (avec l'axe z orienté vers le haut)	H=h+z	[L]
altitude	z	[L]
charge de pression	h=pc/($\rho_w g$)	[L]
masse volumique de l'eau	ρ_w	[ML ⁻³]
accélération gravitationnelle	g	[LT ⁻²]
pression capillaire	pc=pa-pw	[MT ⁻² L ⁻¹]

Paramètres (Lois de sols)	Symboles	Unités
perméabilité hydraulique à saturation du milieu poreux	K _s	[LT ⁻¹]
perméabilité hydraulique non saturée du milieu poreux (paramètre de calage estimé par Rosetta, Schaap et al., 2001)	K ₀	[LT ⁻¹]
perméabilité hydraulique relative du milieu poreux	K _r	[LT ⁻¹]
degré de saturation (S _s à 100%, S _r à 0%)	S _e	[-]
degré de saturation (à 100 % de saturation)	S _s	[-]
degré de saturation (à saturation résiduelle)	S _r	[-]
porosité	ε	[-]

1 Introduction

1.1 Problématique contexte

En France, la décision d'intervenir sur un site pollué et le choix des moyens à mettre en œuvre sont fonction du contexte environnemental, de la nature de la pollution et des risques résultants pour l'Homme et les ressources en eau. Actuellement la majorité des études évaluant les risques de contamination des eaux souterraines ne prennent pas en compte la spécificité de la zone non saturée.

Dans le cas des éléments traces minéraux (ETM), les mécanismes qui contrôlent leur mobilité sont variables dans le temps et dans l'espace : ils sont fortement liés aux conditions physico-chimiques du milieu et donc à ses changements. Selon les conditions, le transfert des polluants vers les couches plus profondes et les nappes souterraines peut être facilité ou inhibé. De même, une éventuelle immobilisation des polluants dans les couches superficielles peut être réversible. Si ces mécanismes sont mal compris, le potentiel de risque d'un site peut être mésestimé.

Dans ces conditions, dans les études d'impact, on considère que la totalité des éléments lixiviables parvient à la nappe, ignorant alors le rôle potentiellement « protecteur » de la ZNS vis-à-vis des eaux souterraines, ce qui peut engendrer des travaux de réhabilitation coûteux et disproportionnés.

La compréhension des phénomènes chimiques et hydriques qui caractérisent la zone non saturée (ZNS) présente donc un grand intérêt pour appréhender plus finement le risque à plus ou moins long terme pour les eaux souterraines. L'incidence des usages actuels du site sur la capacité d'émission de contaminants de la source doit être caractérisée et complétée par une étude prenant en compte les possibles changements d'usage, et/ou les modifications physico-chimiques éventuelles ultérieures du site d'étude, qui peuvent influencer sur la mobilité des polluants. Cette anticipation requiert très généralement l'établissement de modèles de fonctionnement.

Cependant, les processus qui gouvernent le devenir des ETM en zone non saturée sont complexes et nombreux. Par conséquent, la modélisation de ces phénomènes qui permettrait d'anticiper les effets d'un changement d'usage sur la mobilité des ETM, demande l'acquisition d'un nombre suffisant de données hydriques et chimiques. Compte tenu des coûts financiers importants de leur acquisition et de leur exploitation, il convient d'être particulièrement pertinent lors de la définition des caractérisations à mettre en œuvre.



1.2 Objectifs et livrables du projet CAPHEINE

Le projet **CAPHEINE** vise à **mettre à disposition une méthodologie permettant de préciser les contextes (typologie des sites, polluants, géologie et hydrologie) dans lesquels il est utile de prendre en compte la zone non-saturée du site dans l'évaluation des risques pour la ressource en eau.**

Le projet a permis d'élaborer trois guides techniques qui proposent plusieurs méthodes permettant d'améliorer la connaissance du fonctionnement du système. Ainsi, les paramètres à acquérir du point de vue hydrologique et chimique et les méthodes disponibles pour acquérir ces paramètres sont détaillés dans deux guides :

- la caractérisation de la mobilité des ETM est abordée dans le guide « Caractérisation de la mobilité des ETM dans la zone non saturée du sol » (Bataillard *et al.*, 2012) ;
- pour les paramètres hydriques, on se reportera au guide « Caractérisation hydrique de la zone non saturée » (Guérin *et al.*, 2012b).

L'intégration des données obtenues dans les modèles numériques et le choix du type de modèle à privilégier pour obtenir une modélisation réaliste du fonctionnement du site sont quant à eux détaillés dans un troisième guide :

- la modélisation du transfert d'ETM est abordée dans le guide « Modélisation des écoulements et du transport des éléments traces en zone non saturée » (Boissard *et al.*, 2012).

Le programme **CAPHEINE** s'est également appuyé sur l'étude de 5 sites. Les actions mises en œuvre sur chacun des sites en rapport avec les différents guides techniques développés dans le cadre de **CAPHEINE** sont appelés « guides sites ».

La méthodologie développée s'adresse aux principaux acteurs responsables du diagnostic et de la surveillance de sites et sols pollués.

1.3 Objectifs du présent guide et place dans la méthodologie

Ce guide a pour but de détailler les investigations réalisées sur le site 5 en les replaçant dans le contexte et la problématique du site.

Le lien entre ce guide et les guides techniques est explicité sur la Figure 1.



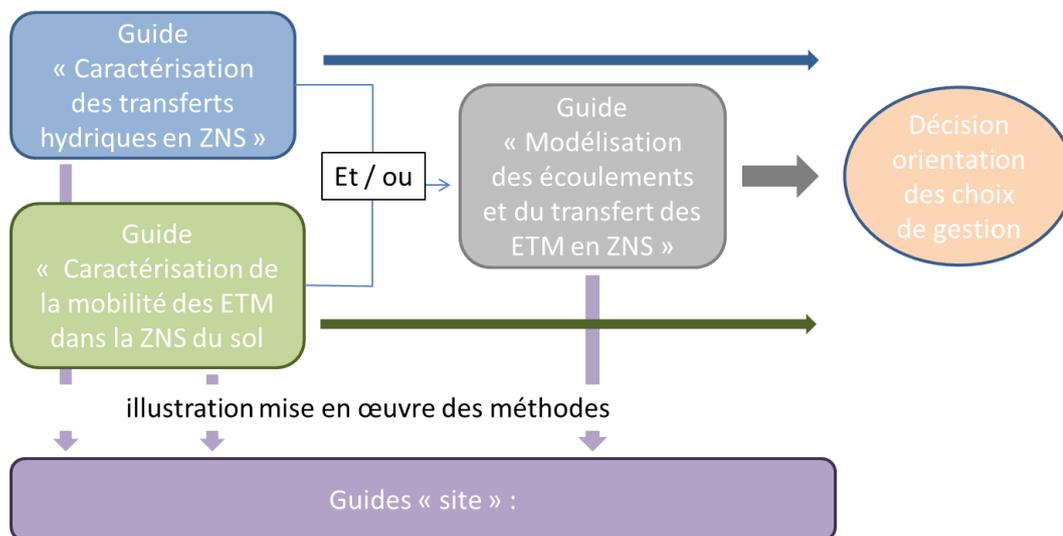


Figure 1 - Lien entre les différents guides CAPHEINE

1.4 Limites du guide

Les guides sites n'ont pas objet de décrire en détails toutes les actions mises en œuvre pour la gestion de ceux-ci. Ils ont pour objet d'explicitier pour le champ d'action de **CAPHEINE**, les méthodes qui ont été mises en œuvre pour répondre à la problématique, les résultats obtenus et le retour d'expérience i.e. facilité de mise en œuvre, coût et qualité de la réponse obtenue par rapport aux attentes.



2 Contexte et problématique

2.1 Contexte

Le site d'investigation N°4 - propriété d'EDF- est un site industriel, investissant une large superficie (plusieurs dizaines d'hectares). Dès l'implantation du site, des investigations ont été mises en œuvre, améliorant la connaissance du contexte géologique, hydrogéologique et hydrologique du site.

2.1.1 Contexte géologique

La série stratigraphique présente se compose principalement de haut en bas :

- des alluvions sablo-graveleuses du Rhône (quaternaires récents) sur une épaisseur de 6 à 10 m,
- des argiles silteuses et poudingues à liant argilo-sableux d'origine fluvio-glacio-lacustre liées au glacier du Rhône (Riss, Wurm) sur une épaisseur de 0 à 30 m,
- la molasse de Saint-Fons, faciès local de la molasse miocène périalpine sur une épaisseur de 80 à 100 m.

Au droit du site, les formations d'argiles sont absentes et la molasse forme un dôme émergeant, directement en contact avec la base des alluvions sur lesquels les ouvrages ont été implantés. Auparavant ont eu lieu des travaux importants de terrassement (sols décaissés puis remis en place par compactage en couches), les sols recréés sont ainsi constitués dans leur grande majorité d'alluvions remaniés et compactés. La zone non-saturée du site, d'une épaisseur moyenne d'environ 5 m, est ainsi composée de remblais anthropiques surmontant les alluvions sablo-graveleuses de la rivière.

Si du fait des remaniements successifs et du compactage, ces formations sont considérées comme relativement plus homogènes et moins perméables que les formations en place, il existe en revanche des zones où il est difficile de compacter correctement (voisinage immédiat des murs extérieurs des bâtiments, des canalisations ou galeries). Ces zones de plus faible densité apparente et de moins grande compacité ont constitué au cours du temps des voies d'écoulement privilégiées.

2.1.2 Contexte hydrogéologique

L'étude hydrogéologique du site a mis en évidence deux nappes superposées :

- la nappe superficielle des alluvions sablo-graveleux,
- la nappe profonde dans la molasse, en charge par rapport à la nappe superficielle.

Caphéine



A l'origine la nappe superficielle s'écoulait globalement du Nord-Ouest vers le Sud-est en direction du Rhône avec un gradient hydraulique moyen de l'ordre de 5 à 8 ‰ et localement plus élevé (jusqu'à 17 ‰). Toutefois, la présence d'ouvrages géotechniques complique l'estimation des gradients locaux, notamment en période de hautes et basses eaux.

2.1.3 Conductivité hydraulique, porosité efficace, dispersivité

De nombreux essais ont été effectués sur le site pour déterminer la perméabilité des deux aquifères (alluvions et molasse). Les valeurs de conductivité hydraulique à saturation obtenues pour la nappe des alluvions sont très variables selon la méthode mise en œuvre. L'intervalle retenu par les différents auteurs privilégiant les essais de pompage à grande échelle est :

$$3 \times 10^{-3} \text{ m/s} < K_{sat} (\text{alluvions}) < 3 \times 10^{-2} \text{ m/s}$$

Concernant les remblais, bien que la conductivité des alluvions correctement remblayés et compactés soit supposée inférieure à celle des alluvions en place ($K_{sat} \sim 10^{-4}$ à 5×10^{-3} m/s) avec une incertitude supplémentaire quant à la perméabilité des zones mal compactées.

La porosité efficace estimée pour la nappe des alluvions est en moyenne de 20 %. Une indication sur les valeurs de dispersivité longitudinale et transversale est fournie par des traçages effectués sur des systèmes voisins, soient $\{D_L = 2,8 \text{ m} ; D_T = 0,66 \text{ m}\}$.

2.2 Problématique

Les connaissances actuelles sur le sous-sol du site s'appuient sur un inventaire assez exhaustif de la géologie et de l'hydrogéologie du site ainsi que des travaux de génie civil. Les travaux relatifs à la caractérisation hydrique de la zone non saturée du site ont été entamés ces dernières années, visant notamment à améliorer les aspects méthodologiques (projets ANR-TRANSAT, ADEME-Caphéine, GGP-Environnement, programmes de recherche EDF R&D).

L'objectif de l'étude est d'améliorer la prévision du transfert de polluants dans la zone non saturée (ZNS) sur ce site industriel, dont la couche supérieure du sol est très largement constituée de remblais. L'enjeu est ainsi d'améliorer la prévision du devenir à cours ou long terme de polluants répandus accidentellement à la surface du sol, notamment dans les zones à forte vulnérabilité (proximité des lieux de stockage, zones décompactées). L'enjeu est aussi de se donner les moyens d'apporter rapidement les réponses aux questions relatives à l'enjeu environnemental dans le cas d'incidents/accidents de production.

Caphéine



L'existence d'un risque à plus ou moins long terme pour les eaux souterraines doit ainsi se faire en tenant compte :

- des usages actuels : définition des scénarios : déversement, typologie des polluants, contexte hydrogéologique (hautes/basses eaux),
- d'éventuelles modifications physico-chimiques ultérieures du site d'étude,
- mais aussi des possibles changements d'usage : réhabilitation, cession.

A l'échelle des problèmes abordés (zone non saturée d'épaisseur de l'ordre de la dizaine de mètres), cette hétérogénéité marquée de la ZNS se traduit par une large disparité des temps d'arrivée et des concentrations des polluants au toit de la nappe. Pour mieux apprécier les risques au regard de l'usage du site, il est nécessaire de disposer d'un nombre suffisant de données hydriques et chimiques qui peuvent nécessiter des essais de laboratoire.

D'un point de vue méthodologique, l'étude a également adressée les questions suivantes :

- quelles méthodes de mesures peut-on mettre en œuvre dans le cas particuliers de remblais et d'alluvions ?
- quelle validité accorder aux résultats obtenus (comparaison des résultats obtenus)?



3 Caractérisation hydrique : Acquisition des paramètres hydrodynamiques (comparaisons de méthodes)

3.1 Contexte et problématique

Dans le cadre de l'amélioration des connaissances des mécanismes de transfert dans la ZNS, le site a déjà fait l'objet d'essais de caractérisation hydrodynamique. La méthode BEST (Beerkan Estimation of Soil Transfert, Lassabatère *et al.*, 2006) a notamment été mise en œuvre en une trentaine d'emplacements.

L'objectif de cette étude est de mettre en œuvre conjointement - avec l'équipe Service Environnement industriel & Procédés Innovants (Unité BioGéochimie Environnementale) du BRGM - des méthodes de mesure de la perméabilité et de la rétention des sols, afin de comparer les résultats obtenus. Les résultats obtenus seront ensuite également comparés avec les données disponibles dans la bibliographie (USGS, ...) pour des matériaux semblables.

Ces données permettront en outre d'alimenter des modèles en vue d'évaluer les transferts dans la zone non saturée. En particulier, ces données seront mises à profit dans la modélisation de l'essai « grand infiltromètre » (cf. §5).

3.2 Choix des parcelles et des méthodes de mesure

Afin de mettre en perspective les données précédemment acquises avec celles issues d'autres méthodes, un premier choix de deux parcelles s'est porté sur les zones déjà investiguées. Sur ces parcelles, les remblais ont a priori été compactés différemment.

Trois parcelles ont finalement été retenues en raison de leur différence quant à la nature et la structure du sol :

- sol à « terrain naturel » (TN) : zones où le sol original n'a a priori pas été remanié. Cette parcelle n'avait pas jusqu'ici fait l'objet d'investigations,
- sol à remblais décompactés (RD) : zones où le sol n'a pas pu être tassé du fait des infrastructures à proximité,
- sol à remblais compactés (NR) : après remblayage, le sol est tassé mécaniquement.

Les travaux entrepris sur le site N°4 répondent directement aux questions et à la méthodologie mise en place dans Caphéine, à savoir :

Caphéine



- la mise en place de méthodes de caractérisation des transferts hydriques dans la zone non saturée et l'acquisition des paramètres hydrodynamiques d'intérêts (lois $h(\theta)$, $k(\theta)$ et K_s) par (i) comparaison de méthodes d'infiltrométrie in-situ, (ii) acquisition directe en laboratoire des propriétés de rétention et (iii) estimation directe des temps de transferts de la surface à la nappe par mise en œuvre du grand infiltromètre dans le cas d'un système à forte vulnérabilité,
- l'évaluation de la mobilité des ETM selon les scénarios d'écoulements/rejets, la typologie des sols rencontrés en regard de classes de composés chimiques,
- la modélisation des écoulements et du transfert des ETM par construction et calage d'un modèle numérique à l'échelle locale (représentatif d'une situation de déversement) et exploitation du modèle numérique afin d'estimer les flux et temps de transferts selon différents scénarios de rejets et de conditions de mise en œuvre de l'essai « grand infiltromètre ».

3.2.1 Profils pédologiques

Deux fosses de 1m ont été réalisées sur la zone TN. Ces parcelles montrent une hétérogénéité aussi bien verticale (sur les profils Figure 2 et Figure 3) qu'horizontale (sur l'ensemble du CNPE, d'une parcelle à l'autre).

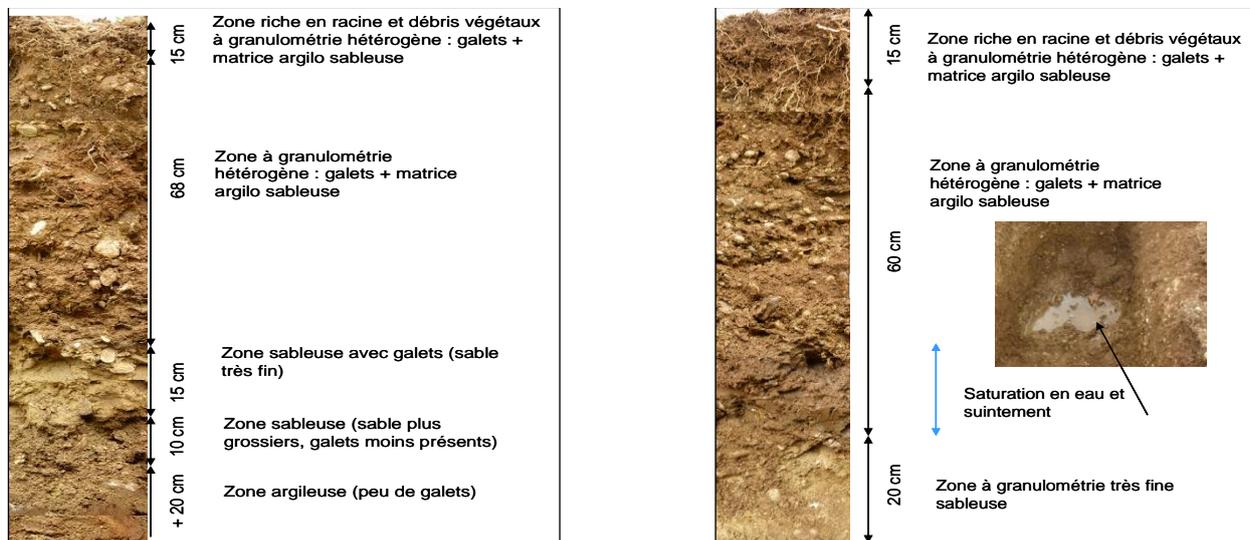


Figure 2 : Profils de sol de la parcelle TN distants de 5m (Fosse P3 à gauche et P2 à droite)

La fosse de gauche de la Figure 2 présente un ensemble de gros galets avec une matrice argilo-sableuse, constituant une formation indurée et compactée, reposant sur une succession de bancs sableux, et enfin un banc plus argileux, très compactée. La fosse de droite quant à elle présente le

même profil que précédemment, mais avec des zones sableuses à différents niveaux et sans la formation argileuse. Tous ces matériaux présentent un degré de compaction important. Une saturation du terrain au-dessus de la formation sable a entraîné une venue d'eau.

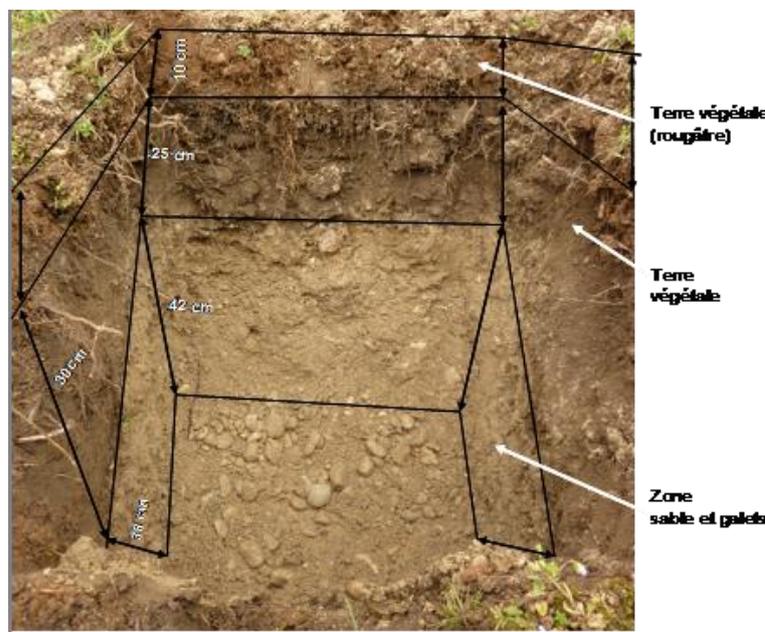


Figure 3 : Profil de sol de la parcelle RD

La Figure 3 présente beaucoup de matière organique et argileuse en surface, avec quelques galets, reposant sur une formation de sable et de galets grossiers de type alluvionnaire.

La parcelle TN est considérée comme étant un terrain non remanié, hypothèse remise en question par les discontinuités constatées entre les couches (niveau marneux et zone de rétention en eau à des profondeurs différentes).

Les analyses granulométriques réalisées sur les échantillons prélevés sur chaque parcelle sont présentées en annexe (cf. Annexe 8, « Classification des échantillons »). Les prélèvements de sols sur les parcelles RD, NR et TN ont été classés selon leur structure, les échantillons analysés sont respectivement de type sableux/sablo-limoneux sur RD et NR, limoneux/limoneux-sableux sur TN. A l'exception d'un échantillon en surface prélevé sur la zone NR, les échantillons montrent une bonne homogénéité des propriétés granulométriques à l'échelle des parcelles.

3.2.2 Choix des méthodes mises en œuvre pour l'acquisition des paramètres hydrodynamiques (K_s , lois $h(\theta)$ et $k(\theta)$)

En deux parcelles du site N°4, présentant une ZNS de nature différente, différentes méthodes d'obtention de la conductivité hydraulique à saturation ont été mises en œuvre. Les méthodes d'infiltration Porchet, micro-forage/Porchet n'ayant pas été mise en œuvre sur la parcelle NR, seuls les essais sur les parcelles RD et TN sont présentés dans la suite.

La Figure 4 replace les différentes méthodes mises en œuvre pour ce site dans le contexte de CaPhéinE en regard des niveaux méthodologiques développés dans le guide « Caractérisation hydrique de la zone non saturée » :

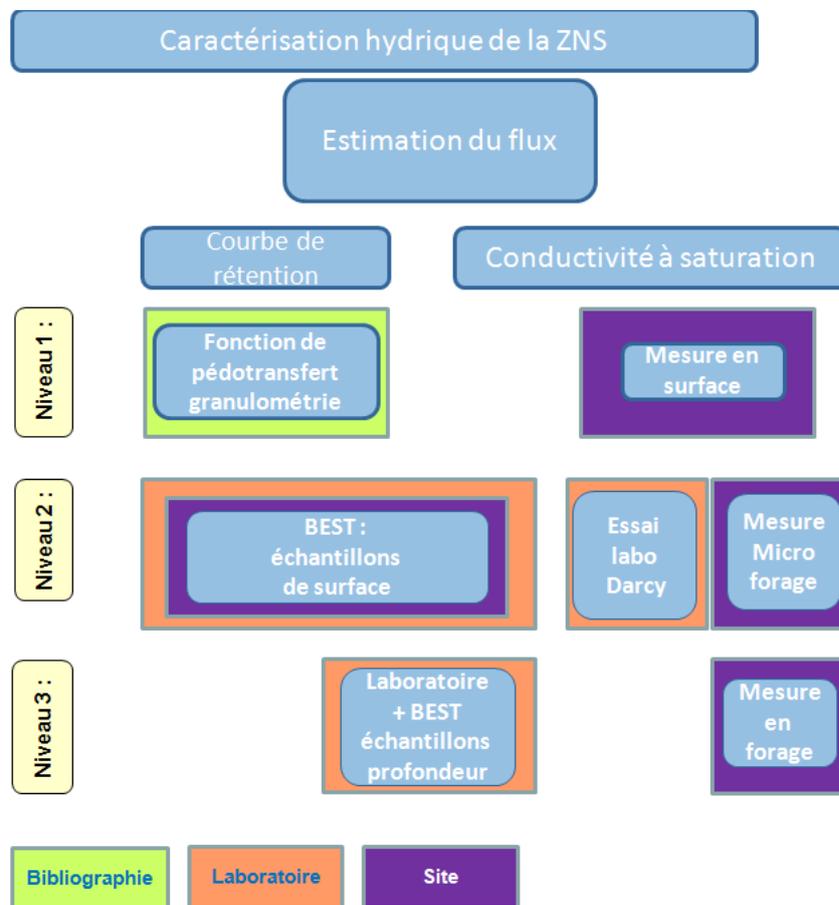


Figure 4 : Méthodes d'investigation mises en œuvre sur le site N°4 selon les différents niveaux de la méthodologie proposée et l'objectif visé pour l'étude des transferts en ZNS

Ainsi, sur TN et RD, les paramètres hydrodynamiques (K_s , lois $h(\theta)$ et $k(\theta)$) ont été évalués selon les méthodes suivantes :



- K_s , $h(\theta)$ et $k(\theta)$ estimés sur la base d'une **étude granulométrique en se reportant à aux FPTS ROSETTA** (Schaap et *al.*, 2001) basées sur la BDD UNSODA (Schaap et Leij, 1998) (niveau 1, cf. Guide « Caractérisation hydrique de la zone non saturée »),
- K_s , $h(\theta)$ et $k(\theta)$ estimés par mise en œuvre **de la procédure BEST en surface et en fond de tranchées à différentes profondeurs** (niveau 2 à 3, cf. fiche technique n° 1, Annexe D du Guide « Caractérisation hydrique de la zone non saturée »),
- K_s , $h(\theta)$ et $k(\theta)$ estimés par mise en œuvre **de la procédure BEST sur échantillons prélevés et recompactés en laboratoire (niveau 3, cf. fiche technique n° 7, Annexe D du Guide « Caractérisation hydrique de la zone non saturée »)**,
- K_s estimée par essais de Darcy sur échantillons carottés en surface et en fond de forage (niveau 2),
- **K_s acquis par essais d'infiltrométrie sous charge** : micro-forage, microPorchet et Porchet (niveau 2 à 3, cf. fiche technique n° 2, 3 et 4, Annexe D du Guide « Caractérisation hydrique de la zone non saturée »),
- **$h(\theta)$ et $k(\theta)$ estimés par mesures de la succion et d'humidité en laboratoire** sur des matériaux prélevés sur site puis recompactés afin d'obtenir la masse volumique apparente caractéristique de ces matériaux sur le site (niveau 3, cf. fiche technique n° 6, Annexe D du Guide « Caractérisation hydrique de la zone non saturée »).

Par rapport aux méthodes initialement envisagées, les méthodes suivantes n'ont pu être mises en œuvre :

- mesures de perméabilité à l'infiltromètre simple anneau fermé. Les perméabilités attendues sont trop élevées (hors de la gamme d'utilisation de cet outil dédié à la mesure des faibles perméabilités),
- mesures de la rétention par canne tensiométrique et sonde TDR. La forte induration du terrain et la présence de nombreux galets de taille pluricentimétrique à décimétrique ont rendu sa mise en œuvre impossible.

Les essais en zone RD ont été effectués après ou pendant des épisodes pluvieux entraînant certainement un biais sur la valeur de l'humidité initiale dans la procédure BEST et les mesures des courbes d'infiltration. Les résultats issus d'une campagne précédente d'essais BEST (2005) ont été utilisés ici afin de montrer l'influence de la saturation initiale sur l'essai d'infiltration BEST.

Ces travaux permettent également de fournir une comparaison des lois $h(\theta)$ et $k(\theta)$ estimées par la procédure BEST in-situ et en laboratoire, acquises expérimentalement par couple {succion ;TDR} ou évaluées analytiquement par Fonction PédoTransfert (FPTs) de ROSETTA.

Caphéine



L'objectif de la comparaison sera d'évaluer les méthodes en regard des résultats fournis mais aussi de leur représentativité, facilité de mise en œuvre. Les informations fournies seront valorisées lors de la construction d'un modèle numérique.

3.3 Mise en œuvre

3.3.1 Classification des échantillons (USDA) pour l'estimation des paramètres hydrodynamiques via ROSETTA (BDD UNSODA)

La méthodologie est présentée en annexe (cf. §8.1). La figure suivante présente l'ensemble des échantillons positionnés sur le triangle de texture USDA :

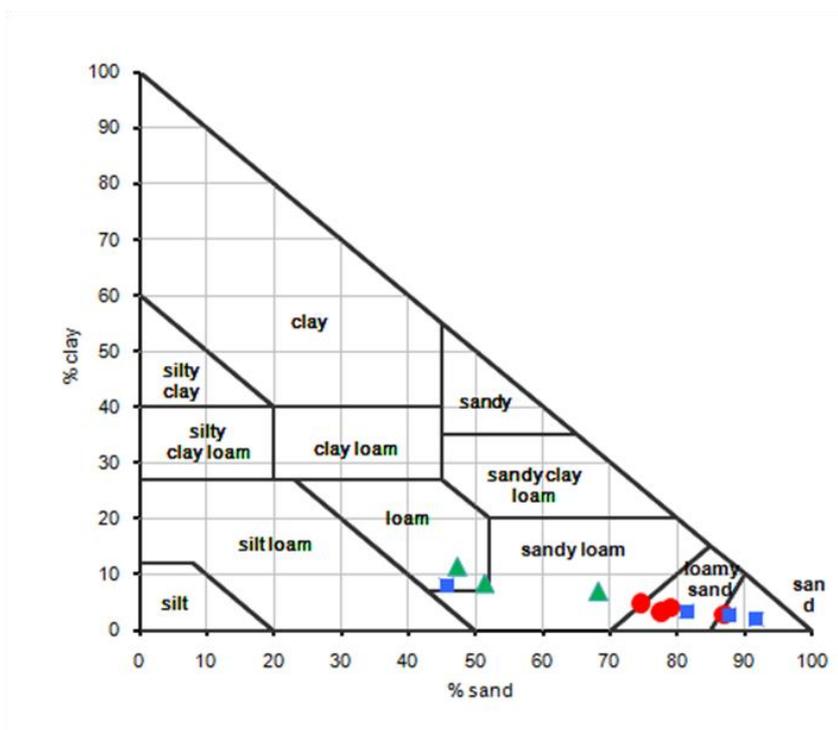


Figure 5 : Classification des échantillons de sols sur les parcelles RD, NR et TN [carrés : NR, cercles : RD, triangles : TN]

Les prélèvements de sols sur les parcelles RD, NR et TN ont été classés selon leur structure. Les échantillons analysés sont respectivement de type sableux/sablo-limoneux sur RD et NR, limoneux/limoneux-sableux sur TN. A l'exception d'un échantillon en surface prélevé sur la zone NR, les échantillons montrent une bonne homogénéité des propriétés granulométriques à l'échelle des parcelles. Les échantillons peuvent toutefois présenter une fraction importante de graviers/cailloux (~10% sur RD et NR, jusqu'à 30% sur TN).



Des bases de données existantes, UNSODA (Schaap et al., 2001), GRIZZLY (Haverkamp et al., 1998) ou HYPRES (Wösten et al., 1998) permettent de dériver des Fonction Pédotransfert (FPTs) sur la base d'une information limitée (classe texturale) ou étendue (texture, densité sèche, succion à 33kPa, matière organique). La plupart de ces méthodes ne s'appliquent toutefois qu'à des sols présentant une faible fraction d'éléments grossiers.

Le programme ROSETTA, basé sur la base de données UNSODA, propose des FPTs hiérarchiques permettant de coupler l'information de terrain (granulométrie, densité sèche, porosité, couples succion/humidité) à l'information a priori (compilation de données mesurées en laboratoire ou sur site). Le mode d'acquisition des données (laboratoire/in-situ, imbibition/drainage) n'est toutefois pas présenté.

3.3.2 Mise en œuvre des méthodes d'acquisition de Ks par infiltration in situ

Les méthodes d'acquisition de la perméabilité par essais d'infiltration in-situ offrent souvent l'avantage de la simplicité de mise en œuvre, tout en donnant des informations représentatives de la structure et la texture du sol. Les méthodes BEST, microForage, miniPorchet et Porchet diffèrent de par leur mise en œuvre (avec et sans charge), leur méthodes d'interprétation ainsi que leur volume représentatif.

La mise en œuvre de ces méthodes est détaillée dans les fiches techniques du Guide « Caractérisation hydrique de la zone non saturée », Annexe D.

3.3.3 Mise en œuvre des méthodes d'acquisition des lois $h(\theta)$ et $k(\theta)$ en laboratoire

Les méthodes d'acquisition des lois $h(\theta)$ et $k(\theta)$ mises en œuvre au laboratoire offrent l'intérêt de pouvoir maîtriser les conditions expérimentales (influence de la saturation initiale sur les restitutions des essais BEST in-situ) et de pouvoir ainsi balayer plus facilement une large gamme de saturation/succion que sur le terrain. Elles permettent également de travailler à partir d'échantillons provenant de différents horizons.

La mise en œuvre de ces méthodes est détaillée dans les fiches techniques du Guide « Caractérisation hydrique de la zone non saturée », Annexe D.

3.3.3.1 Profil instantané au laboratoire à l'aide de capteurs d'humidité et de succion

Deux expérimentations ont été menées successivement.



Une fois les sondes souples installées dans le seau utilisé (Figure 6), le matériau a été saturé et l'humidité et la succion ont été suivies, ainsi que le poids de l'ensemble du dispositif expérimental (seau, sol, équipement).

Les réponses de ces sondes se sont avérées insatisfaisantes, des bulles d'air se créent dans les capillaires perturbant la mesure.

Un sonde rigide qui avait déjà été utilisée sur le terrain (Picot *et al.*, 2010) a donc été ajoutée, la matériau a été ré-humidifié et un deuxième cycle de séchage a été entrepris.

La réponse des bougies souples a été meilleure (meilleure cohésion sonde-matrice avec 2 cycles humidification-séchage). Un travail sur l'étalonnage et la mise en place de ces bougies souples est encore à effectuer avant de statuer sur leur utilisation possible (cf. Correspondance entre mesures d'humidité pondérale et mesures d'humidité volumique, Annexe §8.2)

La réponse de la bougie rigide (Figure 6) est conforme à ce qui avait été observé lors de son utilisation sur site (Picot *et al.*, 2010) ; i.e. que ce type de bougie est capable de mesurer des succions au maximum autour de 7,2-8,3 m (valeurs équivalant à une pression capillaire de -700 à -800 mbar, correspondant à la pression de cavitation de l'eau à température ambiante).

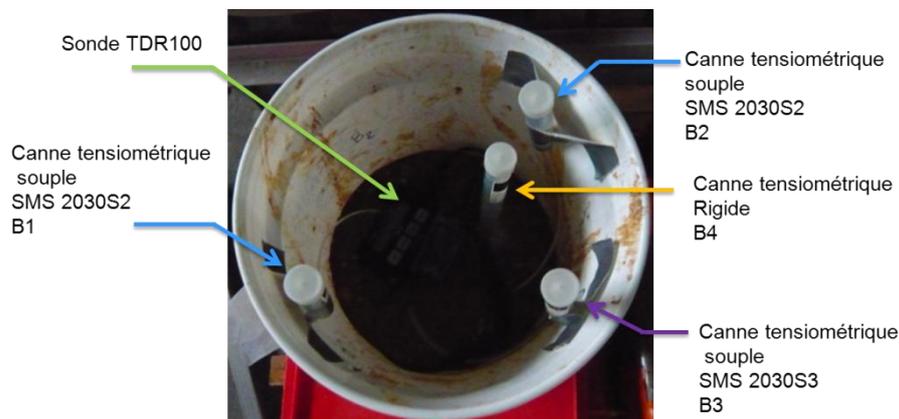


Figure 6 : Equipement pour la mesure conjointe de l'humidité et de la succion (Terrain naturel TN)

Les résultats obtenus lors du deuxième cycle de séchage sont répertoriés dans le Tableau 1.

Tableau 1 : Suivi temporel de l'humidité et des succions lors d'un cycle de séchage (Terrain naturel TN)

Jour	Mois	Heure	Mode standard	Mode argile	Périod	B1	B2	B3	B4	Poids (g)
1	7	12,5	38	27,1	2780	25	30	-20	-14	14108
1	7	15,5	39	27,5	2790	-13	33	-17	-16	14096
2	7	8,5	34,1	24,5	2700	-38	24	-35	-29	14029
2	7	14,16	33,6	24,2	2700	-41	34	-37	-32	14016
3	7	12,5	30,6	22,2	2630	-71	-8	-70	-61	13950
5	7	9	25,7	19,2	2540	-166	-11	-163	-173	13813
5	7	18,33	25,7	18,9	2540	-147	1	-166	-200	13787
6	7	8,5	24,3	17,9	2500	-167	-39	-220	-278	13739
7	7	8,5	22,8	16,9	2470	-156	-16	-258	-390	13669
8	7	9	21,8	15,9	2450	-132	-15	-271	-495	13606
12	7	9	18,9	14,2	2400	0	-10	-1	-720	13451
12	7	20	19,3	14,5	2400	-13	-53	-121	-695	13435
13	7	8,66	18,4	13,9	2380	-3	1	-167	-428	13412

A partir des résultats obtenus, un graphique d'humidité – succion peut être tracé, et un modèle de van Genuchten-Mualem calé sur les points obtenus pour un jeu de paramètres. Pour effectuer ce tracé, les valeurs d'humidité volumique mesurées à la sonde TDR en mode standard ont été corrigées de 6,7 % (cf. § «Correspondance entre mesures d'humidité pondérale et mesures d'humidité volumique »).

La

présente un essai d'ajustement manuel, et la Figure 8 un calage automatisé avec la méthode des moindres carrés.

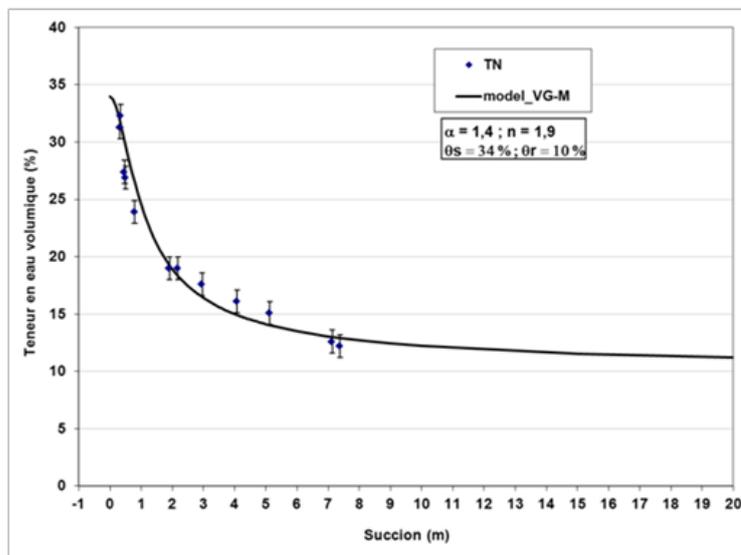


Figure 7 : Courbe d'humidité - succion et modèle ajusté manuellement selon la loi de van Genuchten avec les conditions de Mualem (Terrain naturel TN)

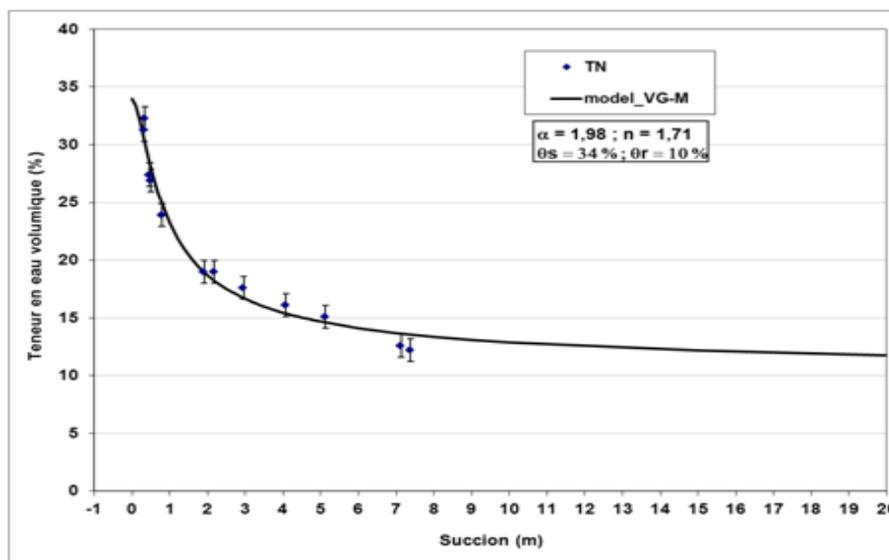


Figure 8 : Courbe d'humidité - succion et modèle ajusté avec la méthode des moindres carrés selon la loi de van Genuchten avec les conditions de Mualem (Terrain naturel TN)

L'écart observé sur les points de plus fortes succions sur la Figure 8 pourrait être dû à un défaut de mesure des cannes de succion qui sont aux limites de leur fonctionnement.

3.3.3.2 Méthode BEST (Beerkan Estimation of Soil Transfer parameters) en LABORATOIRE

Cette méthode a été mise au point afin de pouvoir appliquer la méthodologie BEST hors de son utilisation usuelle sur le terrain en sub-surface :

- Sur des sols situés en profondeur, les sols doivent préalablement avoir été collectés par sondage,
- Sur des sols très hétérogènes, on travaille alors sur la fraction < 2 cm qui est celle qui fixe les lois d'écoulement,
- Sur des sols dont on peut maîtriser la teneur en eau initiale.

3.4 Résultats obtenus pour la comparaison des Ks

Les essais d'infiltrométrie de type microforage, miniPorchet et Porchet n'ont pu être mis en œuvre sur la parcelle TN (problèmes d'accessibilité, approvisionnement en eau).

3.4.1 Comparaison des Ks acquis sur la zone TN

La Figure 9 présente les estimations de Ks selon les différentes méthodes sur la parcelle TN (zone non remblayée a priori, de nature plutôt limoneuse pouvant contenir des fractions importantes de graviers/cailloux).

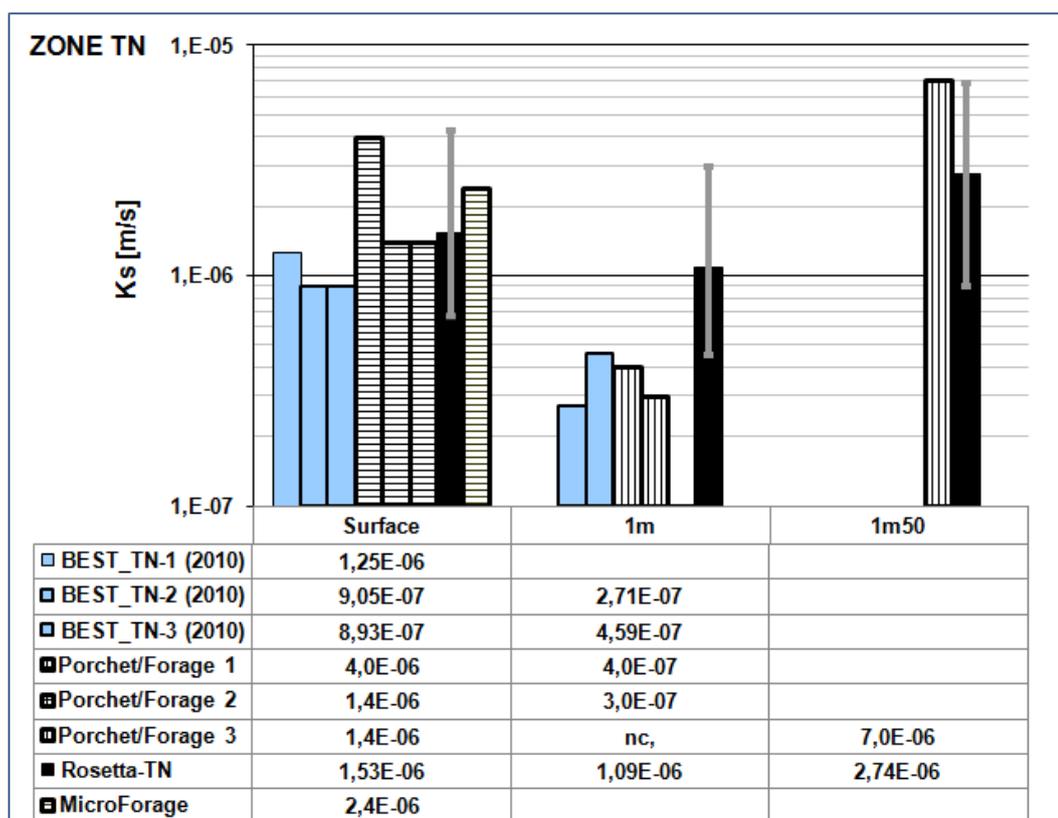


Figure 9 : Comparaison des estimations de Ks (TN, [m/s]) par FPTs ROSETTA, la procédure BEST (mesures 2010), les méthodes Porchet ou microforage/mini-Porchet et les FPTs Rosetta (moyenne, 5^{ème} et 95^{ème} percentiles)

En surface de la parcelle TN, les K_s estimés par les méthodes BEST, mini-Porchet/micro-forage et ROSETTA sont de l'ordre de 10⁻⁶ m/s (Figure 9). De plus, deux essais microforage et mini-Porchet

confortent ces valeurs. L'ordre de grandeur de 10^{-6} m/s semble alors être une mesure fiable et reproductible de la conductivité hydraulique en surface sur cette zone.

Les estimations de K_s réalisées à partir des méthodes BEST et Porchet à 1m de profondeur sur la parcelle TN sont également proches, de l'ordre de 10^{-7} m/s. Toutefois, l'essai Porchet à 1m50 montre un accroissement significatif de la perméabilité ($K_s=7.10^{-6}$ m/s) de la couche inférieure, soit plus d'un ordre de grandeur par rapport aux estimations de la couche immédiatement supérieure. L'essai a toutefois été réalisé dans une couche différente sur cette parcelle (couches sableuses à particules très fines contre une couche argilo-sableuse dans les couches supérieures).

3.4.2 Comparaison des K_s acquis sur la zone RD

La Figure 10 présente les estimations de K_s sur la parcelle RD (zone a priori décompactée, de nature plutôt sablo-limoneuse avec passées de galets) selon les différentes méthodes de caractérisation.



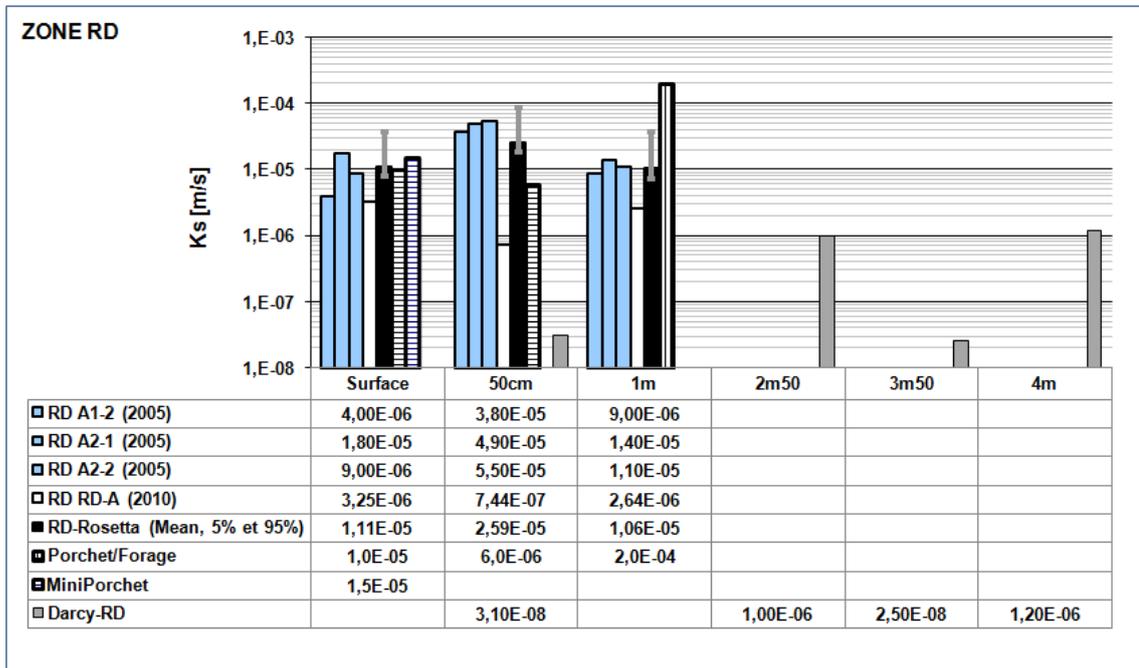


Figure 10 : Comparaison des estimations de Ks sur le Site N°4 (RD, [m/s]) par la méthode BEST (mesures 2005 et 2010), les méthodes micro-forage/mini-Porchet (surface/50cm) ou Porchet (1m), FPTs Rosetta (moyenne, 5ème et 95ème percentiles) et essais Darcy laboratoire

Les essais réalisés dans le cadre de la campagne 2010 ayant été perturbés par la pluie, les résultats issus des essais précédemment réalisés sur cette zone sont intégrés dans la figure à titre de comparaison. Ces résultats fournissent une comparaison intéressante des estimations de Ks par BEST selon l'état de saturation.

Sur la parcelle RD, les estimations de Ks sont plus différenciées selon les méthodes. En surface, les valeurs de Ks estimées lors des essais 2005 sont relativement groupées autour de 1.10^{-5} m/s.

A l'exception des mesures de surface (miniPorchet), les estimations Porchet s'éloignent fortement du groupe de valeur {BEST-2005 ; FPTs} par sous et surestimation de Ks. De la même manière que sur la zone NR malgré l'important volume de milieu poreux intéressé, on observe un accroissement significatif de Ks estimé par Porchet (un ordre de grandeur entre Ks à 50cm et 1m), les essais étant pourtant réalisés dans une couche sablo-graveleuse relativement similaire (proportion de galets plus importante toutefois à 1m).

Les estimations BEST de 2005 sont relativement proches de celles estimées par FPTs pour chaque couche testée. Toutefois, **les essais BEST 2010 (après épisode pluvieux) réalisés sur cette zone semblent fortement influencés par l'état de saturation** (15% à 20% d'humidité en surface en 2010 contre 5% en 2005).



3.5 Estimation des lois de rétention $h(\theta)$ et $k(\theta)$

Sur la base de seules informations texturales (limitées aux fractions fines), les FPTs (ROSETTA) permettent de dériver l'ensemble des paramètres nécessaires à l'établissement des lois $h(\theta)$ et $k(\theta)$. Des informations supplémentaires telles que la densité, humidité/porosité peuvent être prises en compte.

3.5.1 Estimation du paramètre de normalisation en pression H_g

La procédure BEST s'appuie sur un modèle mathématique dérivé de l'équation de Richards pour estimer les différents paramètres des lois $h(\theta)$ et $k(\theta)$ (cf. fiche technique n° 1, Annexe D du Guide « Caractérisation hydrique de la zone non saturée »). En particulier, le modèle utilise l'expression analytique suivante pour évaluer H_g [L] :

$$h_g = \frac{S^2}{c_p \theta_s - \theta_0 \left(1 - \frac{\theta_0}{\theta_s}\right)^\eta K_s}$$

Où : $\{\theta, \theta_s\}$ sont les humidités initiales et finales lors de l'essai BEST, S [L/T^{0.5}] la sorptivité du sol, K_s [L/T] la conductivité et C_p [-] et η C_p [-] des coefficients liés à la texture du sol (obtenus par valorisation des courbes granulométriques dans la procédure BEST).

Les figures suivantes présentent la comparaison des estimations BEST (2005 et 2010) d' H_g à celles évaluées par les FPTs pour les parcelles RD, NR et TN.

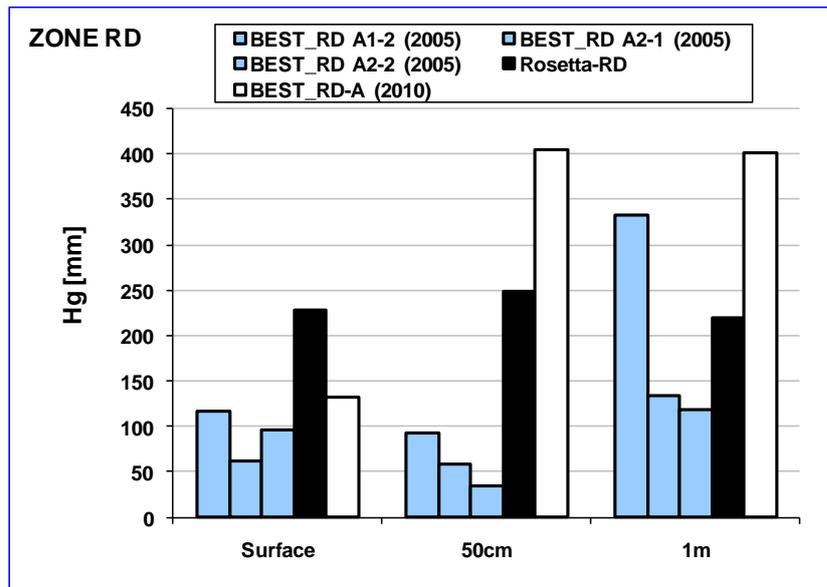


Figure 11 : Estimation de la frange capillaire Hg sur la parcelle RD : méthodes BEST 2005, 2010 et FPTs

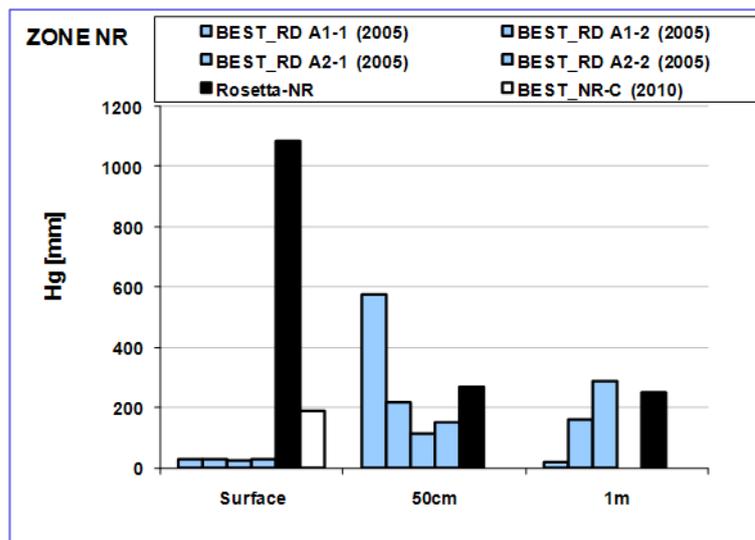


Figure 12 : Estimation de la frange capillaire Hg sur la parcelle NR : méthodes BEST 2005, 2010 et FPTs

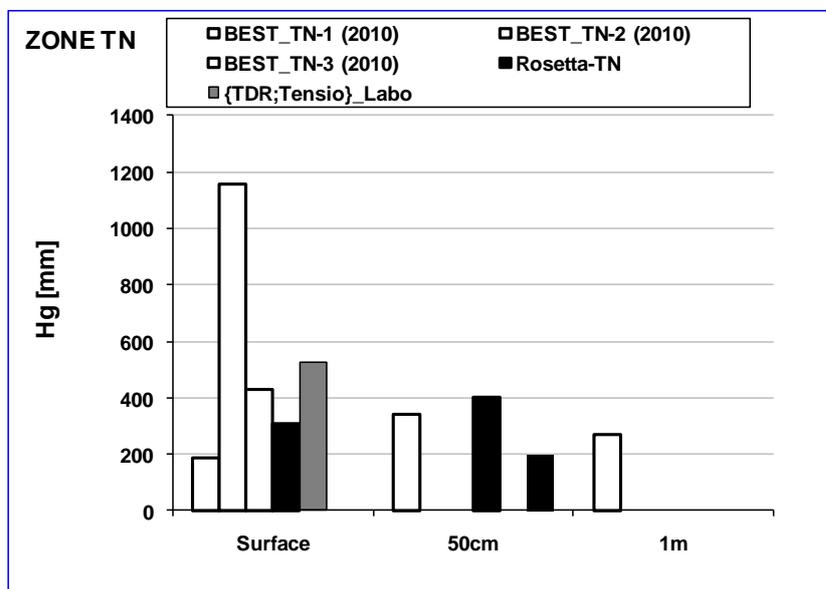


Figure 13 : Estimation de la frange capillaire Hg sur la parcelle TN : méthodes BEST 2010, FPTs et {TDR ; Tensiomètres} en laboratoire

Analyse des résultats :

- Sur la parcelle RD (Figure 11) :

Malgré une certaine hétérogénéité (min =40mm, max =330mm), les franges capillaires estimées par BEST (2005) sont en moyenne autour de 100mm. Les comparaisons avec Rosetta montrent qu'elles sont dans des ordres de grandeur attendus pour des sols sableux, sableux-limoneux. Les profils d'humidité mesurés in-situ à différentes profondeurs (sur échantillons carottés) permettent d'estimer de façon très large une frange capillaire comprise entre 0 et 300mm sur cette zone.

Toutefois, les estimations BEST de Ks en sols très humides (BEST 2010) renvoient des valeurs plus importantes pour ce paramètre (min = 120mm, max = 400mm). A noter que les valeurs de Ks pour ces mêmes essais étaient d'un ordre de grandeurs inférieures à celles obtenues par BEST en 2005 ou par d'autres méthodes.

- Sur la parcelle NR (

-) :

L'estimation de Hg en surface à partir des FPTs est sensiblement différente (Hg>1m). Cette valeur est en phase avec la classification de l'échantillon (limon) sur lequel cette estimation est basée (cf. Figure 40, cf. Annexe 8). Les estimations BEST et ROSETTA sur les autres échantillons de cette zone (de type sableux, sableux-limoneux) sont comparables, en moyenne autour de 200mm.

- Sur la parcelle TN (Figure 13) :

Les franges capillaires sont en moyenne plus élevées (~350mm), avec une frange capillaire très haute sur un essai en surface (max = 1180mm). La sorptivité estimée sur cet essai est deux fois supérieure à celles des autres essais, pour une conductivité similaire ($K_s \sim 10^{-6}$ m/s). L'acquisition de la courbe $h(\theta)$ en laboratoire via mesures directes du couple {TDR ; succion} aboutit à l'estimation d'une valeur plus élevée de Hg (526mm en calage automatique, voire 714mm en calage manuel).

Les estimations BEST sont marquées par une plus grande hétérogénéité que celles via FPTs, basées sur la seule information texturale. Toutefois, ces résultats semblent conforter la formulation de Hg donnée dans la procédure BEST pour des sols sableux, sableux limoneux (cf. fiche technique n° 1, Annexe D du Guide « Caractérisation hydrique de la zone non saturée »). Ces résultats mettent toutefois en évidence la sensibilité des FPTs à la question de la représentativité de la granulométrie de l'échantillon.



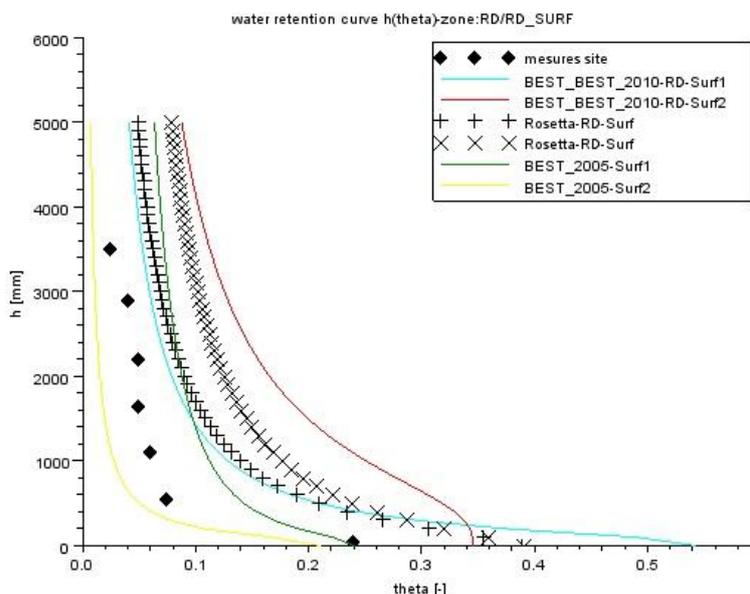
3.5.2 Comparaison des courbes de rétention capillaire et de conductivité relative établies à partir des méthodes BEST et ROSETTA

On présente dans ce qui suit les courbes caractéristiques $h(\theta)$ et $k=kr(\theta)$ tracées à l'aide de l'ensemble des paramètres déterminés par les essais BEST (2005 et 2010) ou interprétés par les FPTs du programme Rosetta sur les zones RD, NR et TN.

3.5.2.1 Comparaisons des courbes $h(\vartheta)$ et $k(\vartheta)$ sur la zone RD

Les figures suivantes présentent les courbes $h(\theta)$ (a : Surface, b : 50cm, b : 100cm) et $k=kr(\theta)$ (d : toutes) acquises à différentes profondeurs et par les différentes méthodes sur la zone RD, tracées pour des succions de 0 à 5m.

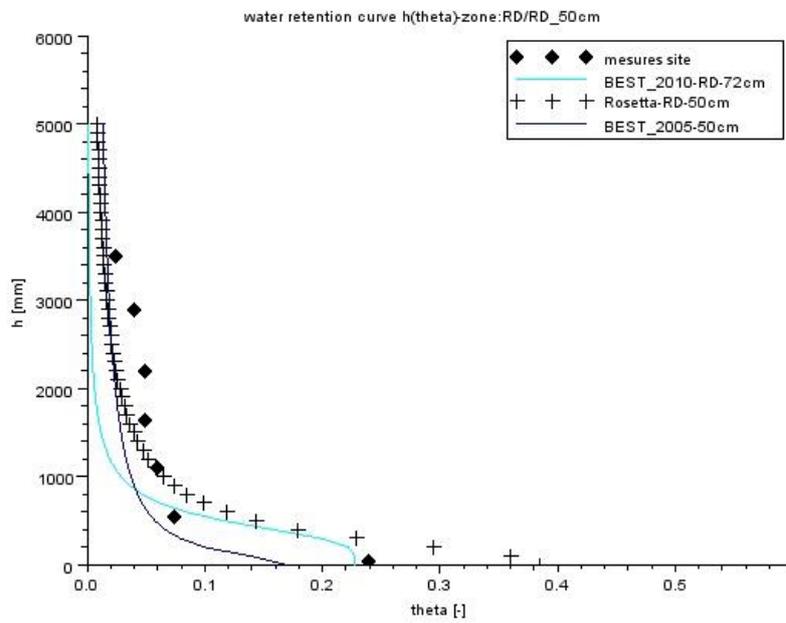
On trace également sur ces graphes le profil d'humidité mesuré in-situ à différentes profondeurs (échantillons carottés sous gaine). La loi de rétention capillaire $h(\theta)$ associée est recréée en faisant l'hypothèse d'une distribution hydrostatique des pressions (hypothèse recevable dans la mesure où les prélèvements ont été réalisés en saison estivale).



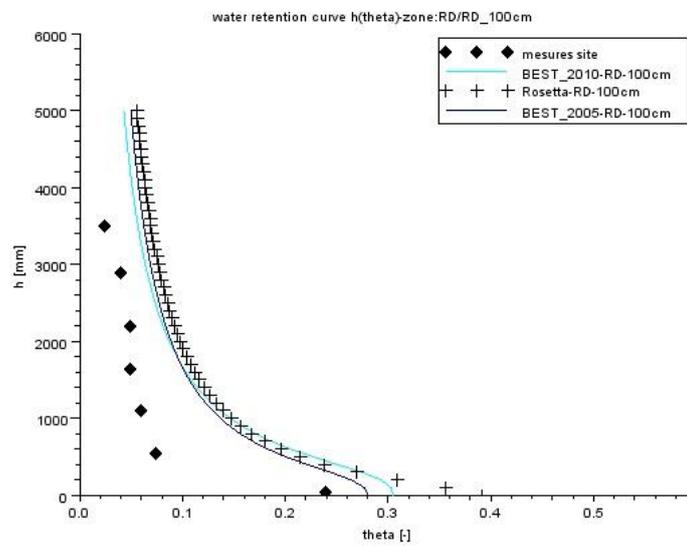
a)



Mise en application des outils développés dans Caphéine : Site 4



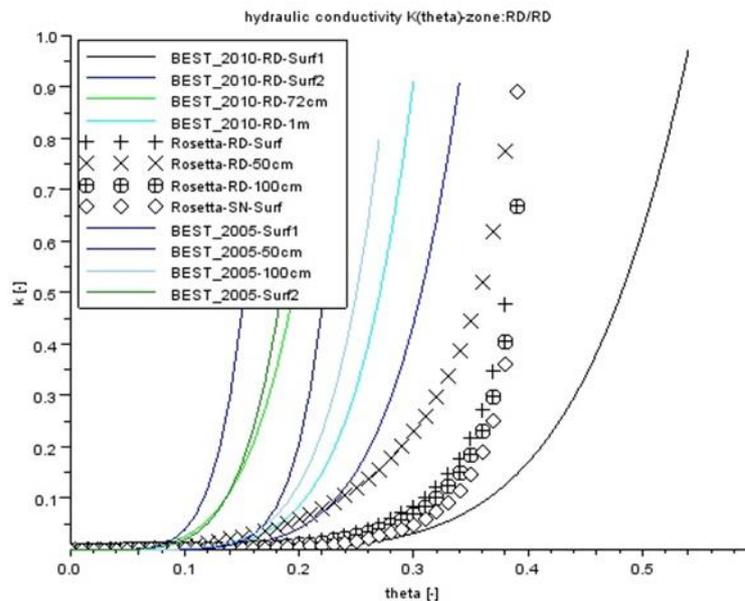
b)



c)

Caphéine





d)

Figure 39 : Courbes $h(\theta)$ estimées à différentes profondeurs (a : Surface, b : 50cm, c : 100cm) et $k(\theta)$ (d) estimées sur la parcelle RD : méthodes BEST 2005, 2010 et PTF

Sur la parcelle RD, les courbes $h(\theta)$ BEST estimées lors de la première phase (2005) apparaissent cohérentes pour des sols sableux (information a priori par référence aux FPTs). Les différences reposent essentiellement sur l'estimation/la mesure de la teneur en eau à saturation, BEST assumant l'échantillon saturé après essai. Les mesures de teneur en eau finale sont ainsi plus fortes en 2010 qu'en 2005 (épisode pluvieux en 2010) mais restent en deçà de celles estimées par ROSETTA. Les mesures réalisées sur le terrain et en laboratoire tendent à confirmer des valeurs de l'ordre de 21 à 28% d'humidité.

Les courbes $h(\theta)$ estimées par BEST en 2010 dans des sols humides (en surface) présentent de plus fortes propriétés de rétention (Hg plus élevé, non linéarité plus faible). On rappelle que dans ces conditions (milieu humide), les estimations de K_s par BEST étaient un ordre de grandeur inférieur à celles des autres méthodes.

La loi $h(\theta)$ estimée à partir des mesures d'humidité in-situ présente très peu de propriétés de rétention et la plupart des lois acquises en surface semblent surestimer celles-ci.



L'allure des courbes $k(\theta)$ est également marquée par l'influence des mesures de θ_s , mais aussi par le type de modèle utilisé. En effet, BEST utilise le modèle Brooks et Corey pour la conductivité relative contre van Genuchten-Mualem pour ROSETTA (avec utilisation du paramètre de forme L (Se^L) plutôt que la valeur par défaut de 1/2).

Afin de masquer l'effet de la teneur en eau finale, les courbes de conductivité relative sont normalisées en fonction de la saturation sur la figure suivante.

La courbure des courbes $k(\theta)$ estimées par FPTs est alors plus marquée près de la saturation, induisant une perméabilité effective ($K_s.kr(\theta)$) plus faible au-delà de 50% de saturation.

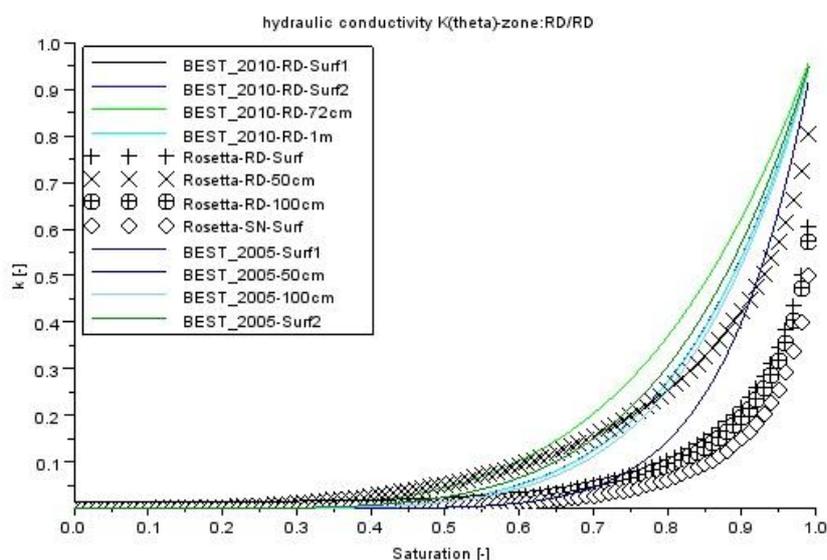


Figure 14 : Courbes normalisées $k(S_e)$ tracées à partir des paramètres estimés sur la parcelle RD par la procédure BEST (essais 2005 & 2010) et interprétées via FPTs (ROSETTA)

3.5.2.2 Comparaisons des courbes $h(\theta)$ et $k(\theta)$ sur la zone TN

Les figures suivantes présentent les courbes $h(\theta)$ et $k=kr(\theta)$ acquises par les différentes méthodes en surface de la zone TN, tracées pour des succions de 0 à 5m.

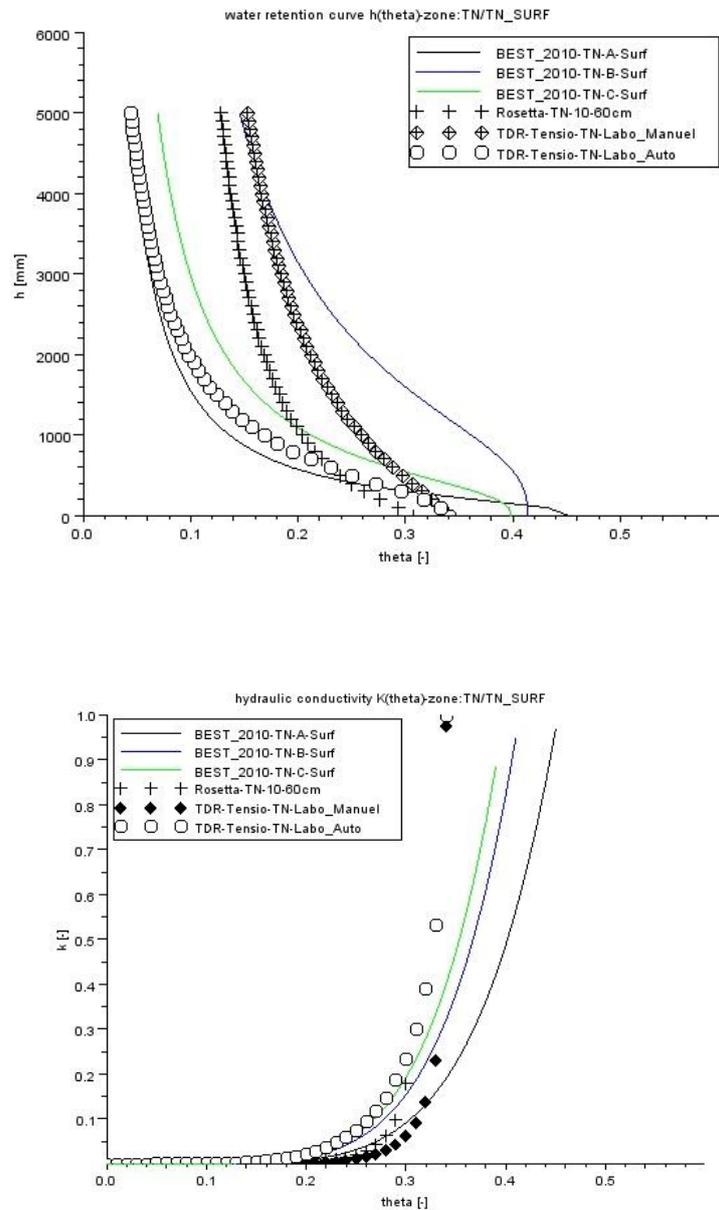


Figure 15 : Courbes $h(\theta)$ (haut) et $k(\theta)$ (bas) tracées à partir des paramètres estimés en surface de la parcelle TN par la procédure BEST (essais 2005 & 2010), interprétées via FPTs (Rosetta) et acquies expérimentalement en laboratoire via {TDR ;Tensiomètre}



Sur la parcelle TN, les courbes $h(\theta)$ sont estimées suivant trois méthodes différentes : BEST in-situ, FPTs (ROSETTA) et mesure couplée {TDR ; Succion} en laboratoire. La courbe $h(\theta)$ estimée par BEST sur l'essai TN-B-Surf rend compte des fortes propriétés de rétention (et notamment de la valeur élevée de $H_g=1180\text{mm}$) relatives à cet essai. Les courbes estimées en laboratoire présentent des propriétés en phase avec BEST, avec une sensibilité à la méthodologie d'ajustement et au-delà, une sensibilité au nombre de couples {TDR ; Succion} disponibles pour le calage.

3.5.2.3 Comparaisons des courbes $h(\theta)$ et $k(\theta)$ sur la zone NR

Les figures suivantes présentent les courbes $h(\theta)$ et $k=k_r(\theta)$ acquises par les différentes méthodes en surface de la zone NR, tracées pour des succions de 0 à 5m.

Une des courbes interprétées par ROSETTA (0-50cm) montre davantage de propriétés de rétention que celles établies par BEST et ROSETTA (Surface). Cette courbe est établie sur la seule information de la classe texturale de l'échantillon (type limon), échantillon hétérogène par rapport aux autres prélèvements sur cette zone (sableux-limoneux). Au voisinage de la saturation (i.e. $k(\theta)$ proche de 1), on peut observer les effets de la surestimation de la teneur en eau finale par les FPTs ($\theta_s = 40\%$ estimés par FPTs, $\theta_s = 20$ à 28% mesurés en fin d'essai BEST).



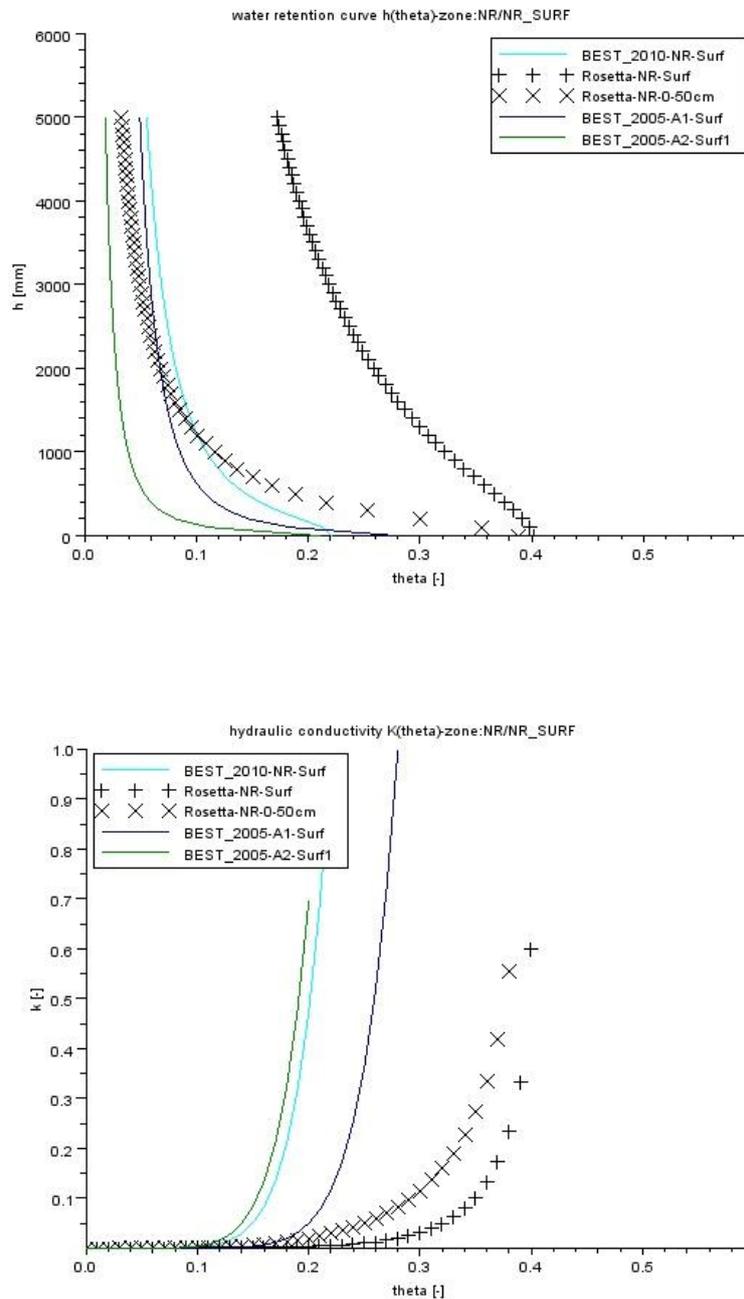


Figure 16 : Courbes $h(\theta)$ (haut) et $k(\theta)$ (bas) tracées à partir des paramètres estimés en surface de la parcelle NR par la procédure BEST (essais 2005 & 2010) et interprétées via FPTs (Rosetta)

3.5.3 Conclusion sur l'estimation/mesures des lois de rétention

En conclusion, les courbes $h(\theta)$ et $k(\theta)$ déterminées par la méthode BEST apparaissent cohérentes pour les typologies de sols étudiées ici (i.e. des sols plutôt sableux, sableux-limoneux). Au même titre que les FPTs, l'information pertinente pour l'établissement des lois $h(\theta)$ et $k(\theta)$ est pour une grande part basée sur les données texturales à l'échelle locale (essai / échantillon). Les restitutions de BEST sont marquées par plus d'hétérogénéités, liées d'une part à l'hétérogénéité intrinsèque du sol mais aussi à une sensibilité de la méthode quant à la mise en œuvre de l'essai (humidité initiale, atteinte du régime permanent).

L'estimation par la méthode BEST du paramètre Hg semble appropriée, les valeurs ayant pu être confortées par l'utilisation des FPTs (ROSETTA), donnant une information comparative théorique/a priori.

La procédure BEST fait l'hypothèse que l'échantillon est totalement saturé en fin d'essai ($\theta_{\text{Final}} = \theta_s$). Les mesures réalisées ont montrées que la teneur en eau finale était relativement en deçà de celle connue a priori (FPTs) ou même mesurée dans des conditions très humides (essais sur la zone RD après une pluie importante). Ce paramètre étant un des paramètres sensibles (après Ks) pour la modélisation des écoulements et transferts, une (ou plusieurs) mesure précise est préconisée.

Le choix des modèles théoriques pour les lois de sols (Burdine / Mualem pour $h(\theta)$, van Genuchten / Brooks et Corey pour $k(\theta)$) ne semble produire des différences significatives que pour les courbes $k(\theta)$.

On retient que les comparaisons BEST et FPTs (ROSETTA) se sont révélées pertinentes (notamment pour l'estimation du paramètre Hg) mais mettent aussi en évidence la sensibilité de ces méthodes à la question de la représentativité de l'échantillon (granulométrie, présence d'éléments grossiers), notamment dans les sols grossiers.

3.6 Critiques et retour d'expériences

De façon générale, dans un grand nombre de cas, la méthode BEST a permis de faire des estimations de Ks pertinentes pour l'ensemble des paramètres mais est toutefois apparue très sensible aux conditions de mise en œuvre in-situ (notamment l'humidité initiale). Les comparaisons BEST et FPTs (ROSETTA) se sont révélées pertinentes (notamment pour le paramètre Hg) et ont permis de confirmer l'estimation par la méthode BEST des lois $h(\theta)$ et $k(\theta)$.

Toutefois, à l'inverse du grand infiltromètre, les méthodes testées ici ne permettent pas vraiment d'acquérir une valeur de Ks à l'échelle de la ZNS (sauf à multiplier les essais dans chaque couche).



Les estimations BEST sont également marquées par de grands intervalles de variation, imputables aux hétérogénéités mais aussi au plus grand nombre d'essais réalisés. De la même manière, les estimations via la méthode Porchet (malgré un VER plus représentatif) ont également été marquées par les hétérogénéités verticales alors qu'un lissage des valeurs était plutôt attendu. Aucune information sur l'hétérogénéité horizontale par essais Porchet n'est disponible.

Des recommandations pour la mise en œuvre de chaque étape de la méthode BEST sont à prendre en considération notamment concernant la durée des essais (cf. fiche technique n° 1, Annexe D du Guide « Caractérisation hydrique de la zone non saturée »).

La figure suivante précise l'ordre de grandeur de la durée d'expérimentation d'un essai d'infiltration 1D de type BEST en fonction de la gamme de perméabilité attendue. Dans la pratique, les essais ne semblent ainsi réalisables que pour une gamme de perméabilités allant de 1.10^{-4} à 6.10^{-7} m.s⁻¹.

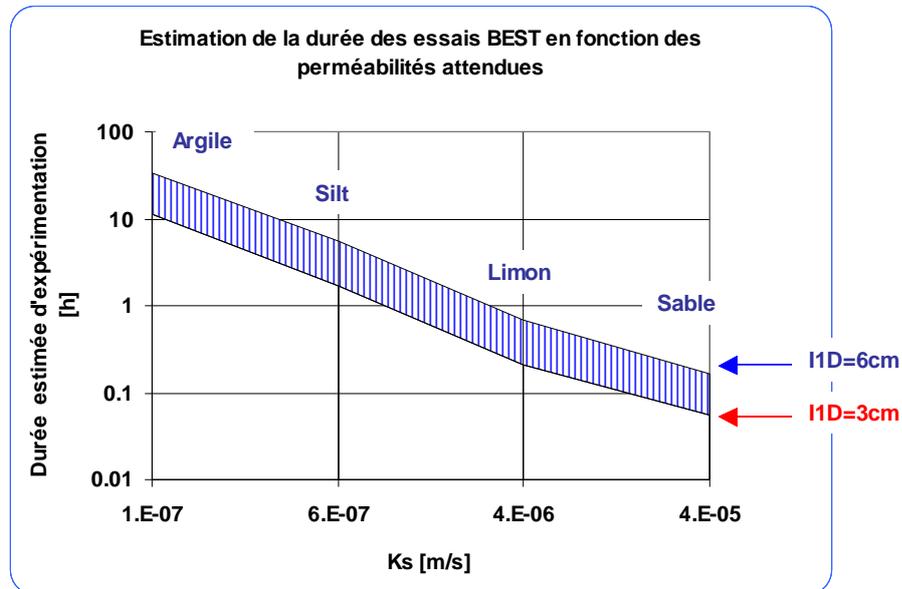


Figure 17 : Estimation de la durée des essais nécessaire à l'obtention d'une lame infiltrée cumulée I_{1D} (colonne de sol) comprise entre 3 et 6 cm en fonction de la gamme de perméabilité attendue

Le travail réalisé a permis de faire ressortir les avantages et inconvénients de chaque méthode et a montré l'intérêt de développer une approche qui combinerait les avantages de chacune des méthodes, à savoir :

- la possibilité de prendre en compte les éléments grossiers (graviers, $d > 2\text{mm}$),
- l'utilisation de l'ensemble de la courbe d'infiltration grâce au modèle théorique de BEST (les méthodes sous charge n'utilisant les données qu'à l'asymptote) ;
- la robustesse du modèle théorique de la méthode BEST (cohérence avec l'équation de Richards en non saturée) associé au panel de paramètres pouvant être déterminés (les autres méthodes assument une hypothèse de gradient hydraulique unitaire, ne garantissant pas de pouvoir modéliser les essais à partir des paramètres ainsi déterminés) ;
- une meilleure maîtrise des conditions expérimentales pour les méthodes de type micro-forage ou Porchet (la mise en œuvre de l'infiltromètre simple anneau présente plusieurs biais à ce niveau) ;
- un volume élémentaire plus représentatif dans la mise en œuvre de la méthode Porchet (ou grand infiltromètre) ;
- a priori, une meilleure estimation des conductivités grâce à la mise en charge via les méthodes micro-forage ou Porchet (régime d'écoulement plutôt par capillarité latérale dans le cas de BEST).

Néanmoins, il n'est pas à ce jour possible de disposer d'une telle méthode et une approche prenant en compte plusieurs niveaux d'incertitude apparaît complémentaire de la caractérisation via la méthode BEST. En effet, dans la mesure où les milieux sont intrinsèquement hétérogènes et qu'une incertitude existe sur la mise en œuvre des essais, de l'interprétation ou même sur la représentativité de la zone échantillonnée, il est nécessaire que l'incertitude qui découle des estimations de chaque paramètre soit évaluée et prise en compte dans les modèles (cf. Analyse d'incertitudes, Annexe C du Guide « Modélisation des écoulements et du transport des éléments traces en zone non saturée »).



4 Détermination des temps de transfert par essai d'infiltration et de traçage avec grand infiltromètre

4.1 Principes de mise en œuvre

L'essai « grand infiltromètre » a été mis en œuvre par la section Recherche & Développement de BURGEAP dans le cadre de Caphéine.

4.1.1 Principes

La zone d'essai RD du site N°4 présente une vulnérabilité forte au risque de pollutions dissoutes.

L'essai d'infiltration et traçage via grand infiltromètre, développé dans le cadre du projet ANR TRANSAT (Kaskassian et al, 2009, fiche technique n° 5, Annexe D du Guide « Caractérisation hydrique de la zone non saturée »), est représentatif d'un évènement de déversement de plusieurs m³ d'eaux polluées, investiguant ainsi toute l'épaisseur de la ZNS et ceci sur des volumes de plusieurs m³ de milieux poreux. Cet essai d'infiltration est couplé à un traçage non réactif afin d'estimer le temps de transfert et l'atténuation des concentrations du traceur entre la surface du sol en place et le toit de la nappe.

La Figure 18 replace les différentes méthodes employées ici dans le contexte de CaPhéinE et des niveaux méthodologiques développés dans le guide « Caractérisation hydrique de la zone non saturée » :

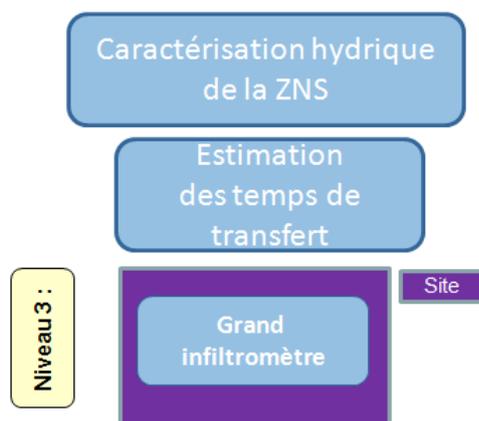


Figure 18 : Méthodes d'investigation mises en œuvre selon les différents niveaux de la méthodologie proposée et l'objectif visé pour l'étude des transferts en ZNS

4.1.2 Mise en œuvre

Caphéine



Mise en application des outils développés dans Caphéine : Site 4

La zone d'essai est implantée sur la parcelle RD, zone à proximité de sources éventuelles de pollution et précédemment utilisée lors des essais de caractérisation hydrique. L'implantation de l'anneau en regard des ouvrages piézométriques est donnée sur la figure 18 suivante.

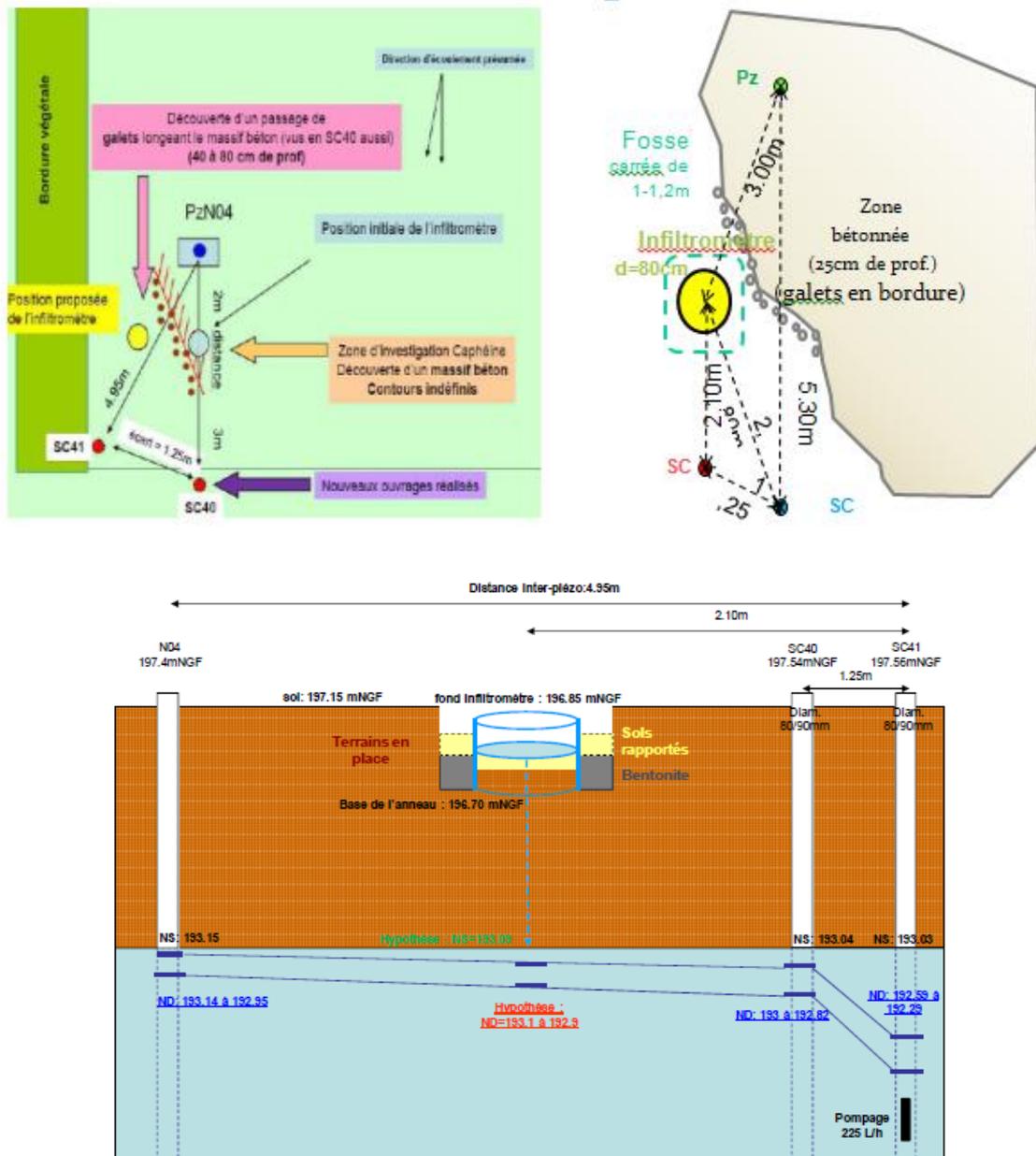


Figure 19 : Implantation de l'anneau et des piézomètres (haut) et disposition de l'anneau par rapport aux ouvrages et niveaux piézométriques mesurés lors de l'essai (bas)

Caphéine



En raison des incertitudes sur l'état de colmatage du piézomètre N04 et sur la perméabilité réelle de l'aquifère (et la lithologie associée) ainsi que la présence de MES dans l'eau pompée, deux nouveaux forages ont été réalisés (Sc40 et Sc41) afin de fiabiliser la restitution des traceurs.

4.1.3 Essais préliminaires

Avant la réalisation de l'essai d'infiltration, des essais préliminaires ont été menés afin de vérifier certaines caractéristiques de l'aquifère et de la zone non saturée (ZNS) et de mieux dimensionner l'essai de traçage proprement dit. Ces essais comprennent :

- essais d'infiltration en surface,
- essais de pompage dans les piézomètres voisins,
- coupe géologique et profil de teneur en eau à partir d'échantillons carottés,
- impact de la qualité de l'eau de nappe sur les mesures des traceurs fluorescents.

4.1.4 Métrologie de l'essai

Cet essai présente les caractéristiques suivantes :

- infiltration d'eau sous une charge de l'ordre de 20 cm (la charge a été de 30 cm pendant certaines périodes de l'essai) à l'aide d'un infiltromètre simple anneau de 80 cm de diamètre pendant 10 jours,
- injection de Rhodamine WT comme traceur dans l'infiltromètre pendant les 5 premières heures de l'essai à une concentration moyenne de l'ordre de 49 400 ppb,
- suivi des volumes et des concentrations en traceur infiltrés par l'infiltromètre,
- suivi des niveaux d'eau et des concentrations en traceur dans 3 ouvrages présents dans un rayon de moins de 3 m de l'infiltromètre (1 en amont hydraulique et 2 en aval hydraulique de l'infiltromètre), l'ouvrage le plus proche étant en pompage continu pendant l'essai,
- Pour les ouvrages Sc40 et Sc41, deux méthodes de détermination de la concentration sont utilisées : prélèvement d'eau par préleveur automatisé et analyse par fluorimètre de laboratoire (analyse BURGEAP) et mesure in-situ à l'aide de fluorimètres de terrain immergés dans les ouvrages.

Compte tenu des conditions de l'essai d'infiltration et des incertitudes liées à l'interprétation, il n'a pas été possible de déterminer tous les paramètres d'écoulement de la ZNS. Pour accéder aux paramètres complet des courbes d'écoulement en conditions non saturées, courbes $K(\theta)$ et $h(\theta)$, il conviendrait de mettre en œuvre un essai d'infiltration sous une charge quasi-nulle à l'aide d'un anneau de dimension métrique avec une interprétation des volumes infiltrés selon la méthode BEST

(Lassabatère *et al.*, 2006). Un tel essai doit cependant se dérouler en période sèche pour garantir une représentativité acceptable de la méthode.

4.2 Interprétation des essais préliminaires

On retient de l'essai d'infiltration en surface interprété selon [1] :

- vitesse d'infiltration en régime permanent, $q^\infty = 4.6 \cdot 10^{-2}$ mm/s et sorptivité, $Sh = 0.78$ mm/s^{0.5},
- soit, une conductivité hydraulique à saturation au champ $Kfs \sim 2.6 \cdot 10^{-5}$ m/s et un équivalent^t de la longueur capillaire, $Hg \sim -9$ mm (valeur faible pour ce type de sols).

La valeur de perméabilité ainsi estimée est cohérente avec la description lithologique des terrains sous l'infiltromètre (« sables fins et graviers dans une matrice limoneuse »). **Cette valeur de perméabilité est également cohérente avec celles déterminées par lors des essais de caractérisation hydrique sur la zone RD (cf. §3.4.2).**

En conclusion des essais de pompage, on retient que :

- compte tenu des caractéristiques des essais de pompage, nous retiendrons une valeur moyenne de perméabilité de l'ordre de $3 \cdot 10^{-5}$ m/s (gamme entre $8 \cdot 10^{-6}$ et $9 \cdot 10^{-5}$ m/s) à proximité de l'ouvrage PzN04, valeur cohérente avec la valeur de perméabilité retenue en Sc40, de l'ordre de $2 \cdot 10^{-5}$ m/s (gamme entre $5 \cdot 10^{-6}$ et $3 \cdot 10^{-5}$ m/s) pour un coefficient d'emménagement de l'ordre de 28 %,
- les valeurs de transmissivité sur les ouvrages N04 et Sc40 sont de l'ordre de 10^{-4} m²/s (soit $K \sim 3 \cdot 10^{-5}$ m/s) ce qui représente une valeur inférieure d'un facteur 3 à 60 à celles obtenues lors d'essais précédents pour les zones correctement remblayées et compactées (essais au micro-moulinet, essais Lefranc).

4.3 Restitutions de l'essai d'infiltration et de traçage

4.3.1 Suivi des lames d'eau infiltrées, des vitesses d'infiltration et des niveaux piézométriques

Malgré des problèmes de maintien de la charge dans l'infiltromètre induisant des débordements (dépassement de la charge max de 30cm), des plages d'injection stabilisées ont pu être atteintes avec des débits de l'ordre de 200 L/h pendant les 30 premières heures. Les niveaux piézométriques répondent de manière cohérente aux variations de débit d'infiltration mesurées avec un retard en temps de l'ordre de quelques heures (3 à 5 h en moyenne). Ce constat indique vraisemblablement que



dès les premières heures de l'essai un dôme piézométrique s'est formé au droit de l'anneau induisant des conditions quasi-saturées sous l'anneau. Ce constat semble être confirmé par les fortes teneurs en eau mesurées en fin d'essai jusqu'à 40 cm sous l'anneau. Cette hypothèse sera vérifiée lors de la modélisation de l'essai.

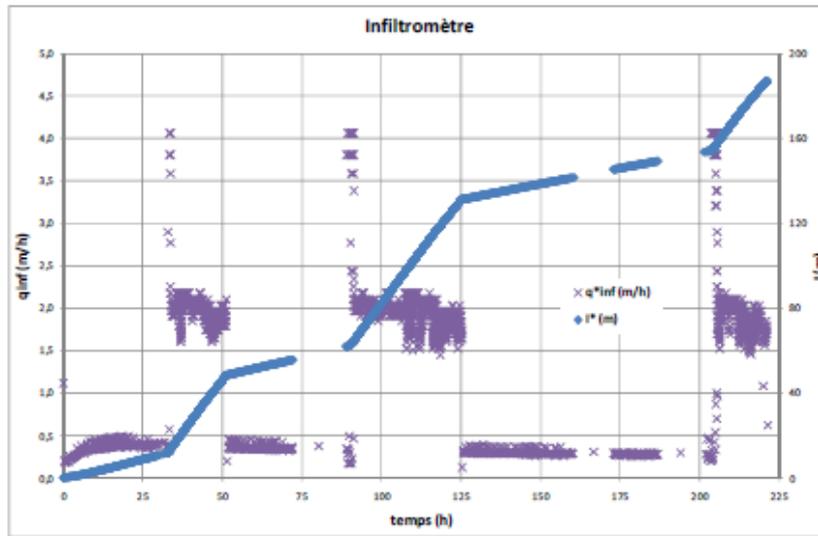


Figure 20 : Suivi de la vitesse d'infiltration (Q_{INF} en m/h) et de la lame d'eau cumulée infiltrée (m) pendant l'essai au droit de l'infiltromètre

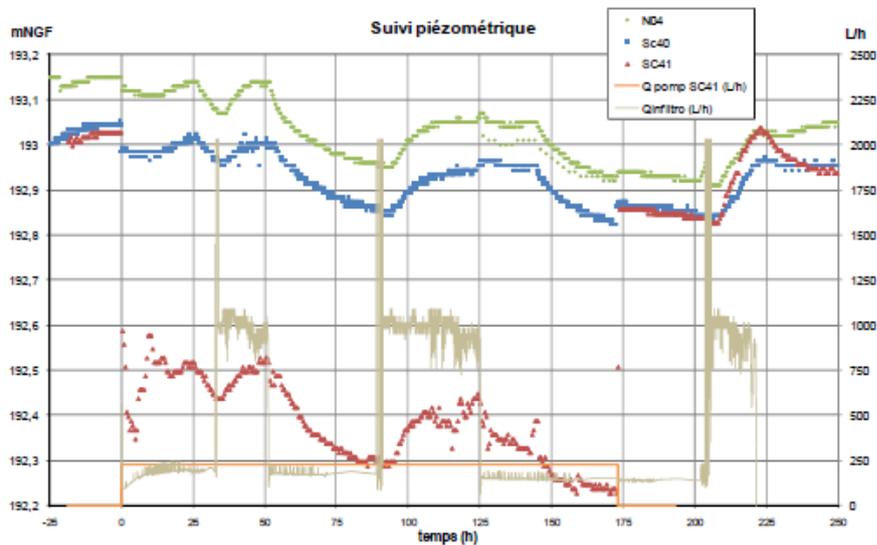


Figure 21 : Suivi des niveaux piézométriques dans les ouvrages Sc41, Sc40 et PzN04 (m NGF) et des débits d'infiltration au droit de l'infiltromètre et de pompage dans Sc41 (L/h) pendant l'essai



L'interprétation de l'essai d'infiltration d'eau sur les premières heures de l'essai renseigne sur les caractéristiques de l'horizon situé sous l'anneau (horizon d'une épaisseur d'au moins 40 cm), c'est-à-dire une conductivité hydraulique de l'ordre de $3,6 \cdot 10^{-5}$ m/s et un équivalent de la longueur capillaire de l'ordre de 4,6 mm. Ces valeurs sont en phase avec celles observées lors des essais d'infiltration préliminaires et de caractérisation hydrique sur la zone RD (cf. Figure 22).

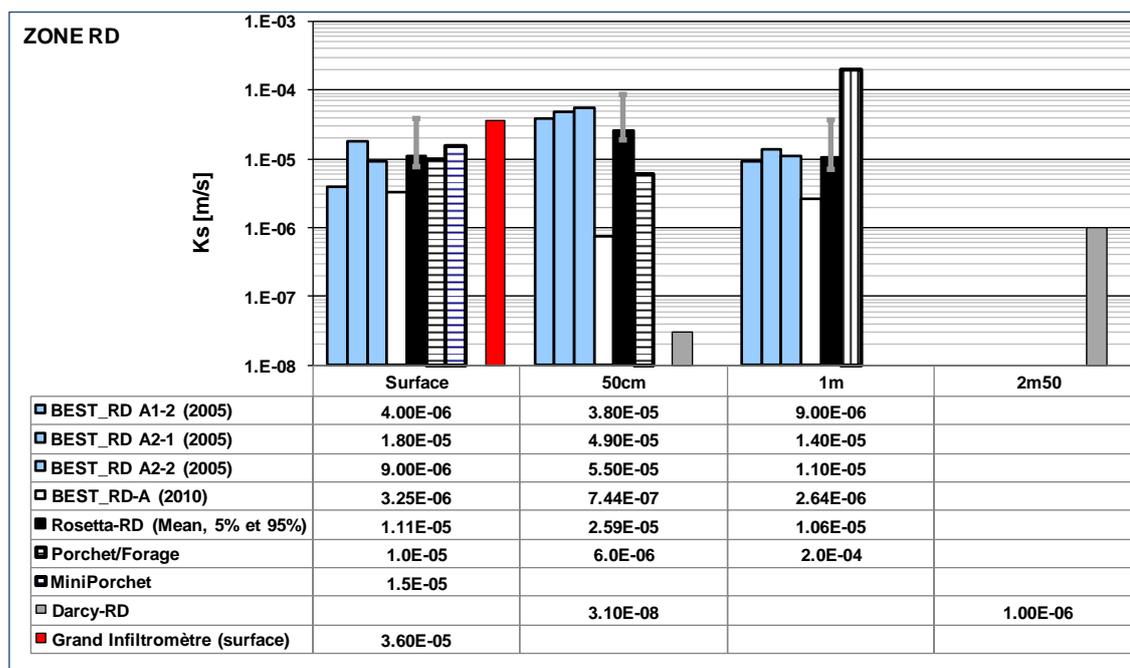


Figure 22 : Comparaison des estimations de Ks sur le Site N°4 (RD, [m/s]) par la méthode BEST (mesures 2005 et 2010), les méthodes micro-forage/mini-Porchet (surface/50cm) ou Porchet (1m), FPTs Rosetta (moyenne, 5ème et 95ème percentiles), essais Darcy laboratoire et « grand infiltromètre»

4.3.2 Suivi des concentrations en traceur dans l'infiltromètre et dans les piézomètres

La figure suivante illustre les concentrations en Rhodamine WT dans l'infiltromètre ainsi que les débits d'infiltration d'eau sur la période t = 0 à 25 h.

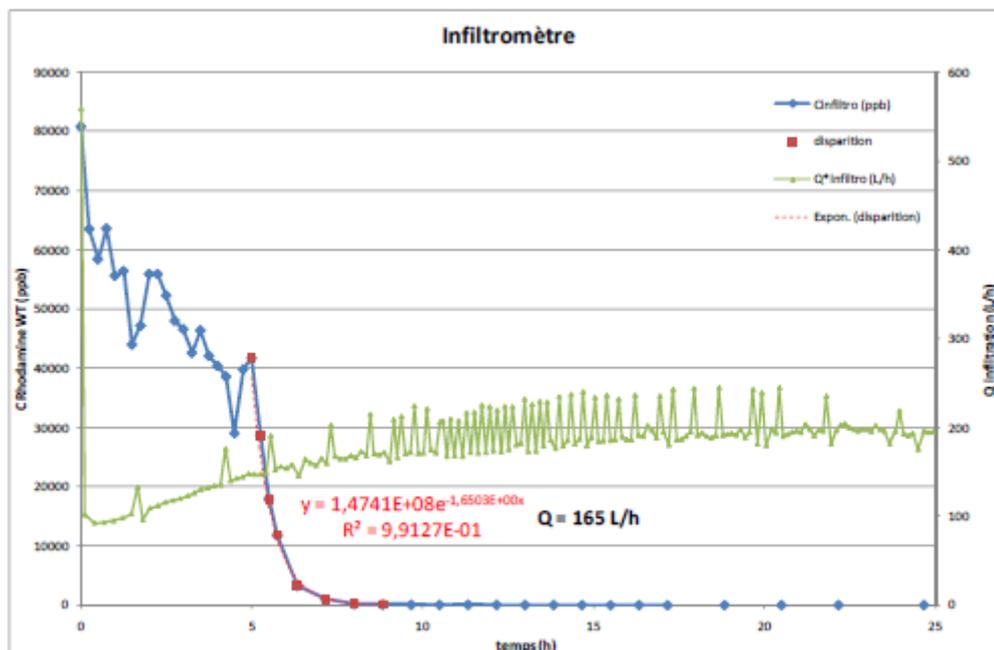


Figure 23 – Suivi de la concentration en Rhodamine (ppb) et du débit d'infiltration (L/h) dans l'infiltromètre entre T=0h et T=25h

Le traceur est apparu dans les 3 ouvrages de suivi et principalement dans le Sc41 (ouvrage en pompage, situé à 2,1 m en aval hydraulique de l'infiltromètre) **qui restitue environ 11% de la masse injectée dans l'infiltromètre et 3,5% de la concentration injectée** (ou 5,6% du flux massique injecté).

Notons que, les teneurs en eau mesurées entre 0 et 5 cm sous l'infiltromètre 4 semaines avant le début de l'essai (0,13 et 0,14) sont comparables à celles mesurées entre 10 et 40 cm sous l'infiltromètre immédiatement après la fin de l'essai (de 0,14 à 0,18). Conjointement, compte tenu des conditions d'infiltration retenus dans l'essai ($H_{INF} = 20$ cm) et de l'état relativement humide des terrains de surface avant l'essai, les transferts vers la nappe ont été relativement rapides.

Les deux méthodes de mesure (fluorimètre de laboratoire-points discontinus et fluorimètre de terrain- courbes continues) donnent des résultats assez proches (l'enregistrement des mesures de la sonde Cyclop dans le SC40 a été défectueux entre t=54 et 173 h).



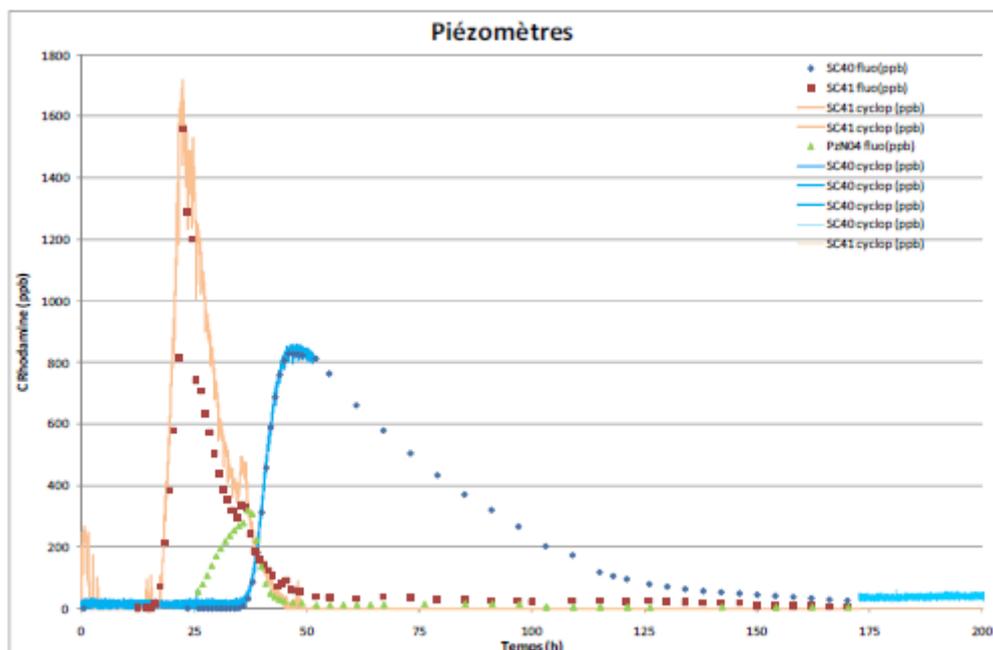


Figure 24 – Suivi de la concentration en Rhodamine (ppb) dans les piézomètres (Sc41, Sc40 et PzN04) pendant l’essai

Le traceur injecté dans les terrains par l’infiltromètre (de T=0 à T=9 h environ) est mesuré dans les 3 ouvrages de suivi avec :

- dans SC41 (en pompage, située à 2,10 m de l’infiltromètre en aval hydraulique), « apparition » du traceur à T = 17 h (C # 15 ppb) et « disparition » à T = 146 h (C # 18 ppb), avec un pic à T = 22,5 h (C # 1700 ppb),
- dans SC40 (située à 2,40 m de l’infiltromètre en aval hydraulique), apparition à T = 36 h (C # 9 ppb), pic à T = 47 h (C # 830 ppb) et une traîne à partir de T = 170 h (C # 25 ppb),
- dans PzN04 (située à 2,85 m de l’infiltromètre en amont hydraulique), apparition avant T = 26 h (C # 55 ppb), pic à T = 37 h (C # 320 ppb) et disparition à T = 103 h (C # 4 ppb).

Si la restitution en traceur en SC41 est conforme à nos attentes, les restitutions relatives dans les ouvrages sans pompage SC40 et PzN04 semblent indiquer à la fois un effet de confinement du pompage en SC41 (ce qui tend à retarder l’apparition du traceur en SC40 et à laisser perdurer une traîne plus longue après l’arrêt du pompage à T = 173 h) et un effet d’étalement radial du dôme d’infiltration en ZNS et de la mise en charge de la nappe au droit de l’infiltromètre (ce qui a pour effet de « pousser » le traceur dans un ouvrage situé en amont hydraulique en conditions naturelles).



4.4 Critiques et retour d'expériences

4.4.1 Mise en œuvre

L'échelle de mesure est ici pleinement adaptée à la problématique d'incident de pollution: déversement de quelques m³ sur un sol épais de plusieurs mètres. Cette méthode permet d'injecter en outre un traceur pour mesurer *a minima* l'effet de la dispersion (ZNS + ZS) dans le transfert des polluants dissous entre la surface d'infiltration et le piézomètre d'observation.

De plus, la réussite de l'essai est assujettie à un certain nombre de paramètres non maîtrisés (variation locale des écoulements, présence de lentilles d'argiles non identifiées, battements de nappe) ou mal connus (incertitude sur le temps de transfert notamment). Il y a ainsi un risque que le (ou les) traceur(s) injecté(s) via l'infiltromètre n'atteignent pas les ouvrages cibles. Les principaux facteurs de risques pouvant compromettre une restitution des traceurs sont :

- un positionnement de l'infiltromètre différent de l'amont hydraulique des piézomètres de suivi ;
- des variations temporelles de directions d'écoulement de la nappe pendant l'essai et notamment des directions non anticipées au vu des données collectées en amont ;
- un cheminement hydraulique complexe (lentilles, présence de lentilles d'argiles ou d'anciens ouvrages) ;
- un temps de transfert moyen du traceur entre la surface différent de celui attendu.

Différentes options dans la mise en œuvre de l'essai doivent être étudiées en amont :

- le bâchage de la zone d'essai : cette option peut être intéressante si l'on veut faciliter l'interprétation en simplifiant les bilans hydriques sur la zone d'intérêt ;
- la mise en pompage permanent des ouvrages d'intérêt permet a priori de fiabiliser l'essai et notamment la restitution du traceur. Toutefois, les conditions de l'essai s'éloignent alors des conditions attendues lors d'un évènement de pollution. Le pompage rabat ainsi une partie de la pollution mais augmente les flux d'eau vers l'ouvrage. Il est alors difficile d'évaluer quelle serait la véritable atténuation sans pompage. De plus, l'estimation des dispersivités via un modèle calé sur un ouvrage en pompage peut souffrir d'un biais,
- l'instrumentation de la zone en amont de l'essai avec des sondes d'humidité et de pression ;
- la définition de la charge : l'imposition d'une charge soutenue permet de fiabiliser l'essai. Toutefois, on peut ainsi s'éloigner des conditions d'un évènement où le rejet n'est pas toujours aussi soutenu dans le temps. Des modifications de mise en œuvre de l'essai seront étudiées par le modèle numérique.

4.4.2 Résultats attendus et valorisation

Si cette méthode permet d'estimer le temps de transfert pour des terrains perméables à peu perméables ($10^{-9} \text{ m.s}^{-1} < K_{\text{sat}} < 10^{-3} \text{ m.s}^{-1}$), elle ne permet pas d'acquérir l'ensemble des paramètres des courbes caractéristiques $h(\theta)/k(\theta)$. En effet, l'imposition d'une charge importante, soutenue dans le temps, sature relativement rapidement le milieu au droit de l'infiltromètre et masque quelque peu le processus d'infiltration par capillarité. Cet essai permet toutefois de générer des jeux de données pertinents pour la mise au point d'un modèle numérique à l'échelle locale et remonter ainsi aux paramètres (notamment K_s).

Pour obtenir des conditions d'essai représentatives d'un transfert de pollution par déversement d'une bache de stockage et évaluer l'impact des conditions sèches de la ZNS, il conviendrait de coupler l'infiltration d'eau à charge quasi-nulle en saison sèche avec un traçage non réactif et suivi dans les ouvrages présents sur site. Un tel essai devra être dimensionné au préalable (temps de transferts et ordre de grandeur des restitutions attendus) et précédé d'un essai de traçage en nappe pour estimer la fonction de transfert de la nappe seule. En effet, dans des conditions de charge nulle dans l'infiltromètre, le transfert dans la nappe peut s'avérer prépondérant (absence de dôme piézométrique du fait de la faible saturation des terrains sous l'infiltromètre).

L'essai d'infiltration et de traçage en ZNS via un grand infiltromètre permet de se placer directement à l'échelle de l'incident de pollution, de remonter aux vitesses d'écoulement d'eau à l'échelle de la ZNS et d'estimer l'effet retardateur/atténuateur de la ZNS dans les conditions d'un déversement important.

Les résultats de l'essai restent toutefois adhérents au scénario de rejet et aux conditions de mise en œuvre (lesquels doivent être définis en accord avec les objectifs de l'étude) et ne peuvent être extrapolés en tant que tels sans mise en œuvre d'un modèle numérique.

5 Interprétation analytique et modélisation mécanistique de l'essai d'infiltration et de traçage

5.1 Méthodes d'interprétation proposées

L'intérêt (et l'objectif) principal de l'essai *grand infiltromètre* est d'apporter des réponses précises et représentatives de conditions réelles à la problématique de pollution de nappe par des rejets de surface (quand, où, quelle proportion).

L'essai permet également d'estimer un certain nombre de paramètres caractéristiques à partir des données ainsi générées (restitutions du traceur dans les ouvrages). Deux méthodologies d'interprétation de l'essai *grand infiltromètre* (cf. Guide « Caractérisation hydrique de la zone non saturée », Annexe D, fiche technique n° 5) peuvent être mise en place :

- soit par déconvolution des courbes de restitution avec les fonctions d'entrée, ce qui permet d'accéder aux fonctions de transfert pour un traceur non réactif le plus souvent (vitesse d'infiltration moyenne et dispersivité) ;

Cette méthode ne reste valable que pour les conditions de l'essai (charge, profil hydrique).

- soit par modélisation numérique (méthode plus appropriée, notamment pour des traceurs réactifs), ce qui permet d'accéder par calage aux différents paramètres de l'écoulement (courbes caractéristiques $h(\theta)$ et $k(\theta)$) et des mécanismes de transport.

Bien que plus complexe, une fois réalisée, cette interprétation permet de simuler d'extrapoler les réponses du modèle calé en le soumettant à de nouvelles « excitations » (pompage, modifications de conditions initiales/limites).

La Figure 25 replace les méthodes employées ici dans le contexte de CaPhéInE et des niveaux méthodologiques développés dans le Guide « Modélisation des écoulements et du transport des éléments traces en zone non saturée ») :



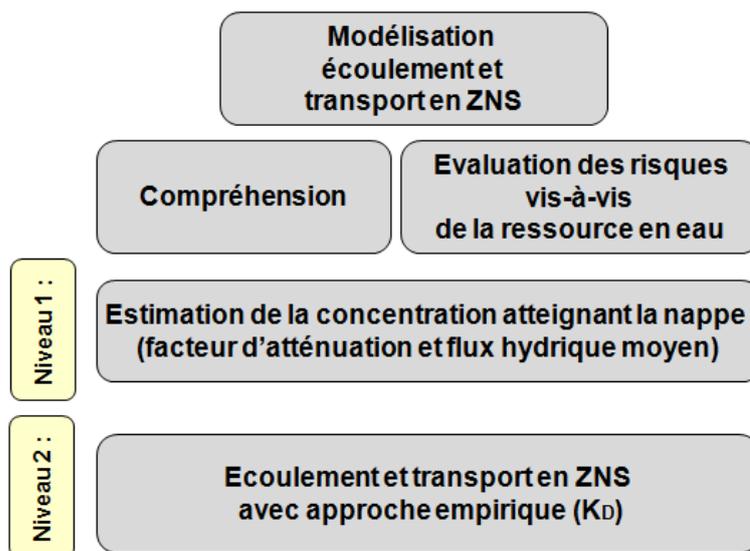


Figure 25 : Méthodes d'investigation mises en œuvre sur le site N°4 selon les différents niveaux de la méthodologie proposée par Caphéine et l'objectif visé pour l'étude des transferts en ZNS

Les modélisations de niveau 1 reviennent à ajuster un modèle de type convection-dispersion 1D en considérant homogènes les paramètres hydrodynamique / hydrodispersifs. Cette interprétation permet de donner une information en « équivalent ZNS » (vitesse, dispersion, atténuation). Cette interprétation nécessite toutefois des hypothèses fortes (homogénéités, 1D, non prise en compte des spécificités de l'essai) et est donc susceptible d'évoluer avec les résultats du modèle mécanistique.

L'interprétation analytique précédente est ici utilisée en amont de la modélisation car elle est limitée dans la compréhension des phénomènes et ne s'applique souvent qu'aux conditions de l'essai. Le niveau 2 correspond à une étude numérique mécanistique avec écoulements non saturés mais avec une géochimie simplifiée. L'intérêt réside dans la possibilité ensuite d'extrapoler les sorties du modèle à d'autres scénarios.

5.2 Distribution des temps de séjour (DTS) et fonctions de transfert (modélisation de niveau 1)

On peut accéder à la fonction de transfert (fonction Piston-Dispersion monodimensionnelle avec ajustement des paramètres hydrodispersifs) en déconvoluant la courbe de restitution du traceur en Sc41 par les fonctions d'entrée de l'essai. Cette interprétation analytique des équations de transferts 1D nécessite de simplifier les phénomènes :

- sélection d'une longueur de parcours 1D par schématisation des voies de transfert,

- « normalisation » de la fonction de transfert sur la masse de traceur restituée en Sc41,
- absence de prise en compte : du bulbe d'infiltration 3D, des variations de débits (vitesse homogène et constante sur toute la longueur du parcours/fonction de transfert) et du pompage en Sc41.

Le détail des calculs (scénarios, paramètres de calage) sont renseignés en annexe.

On retient donc une fonction de transfert composée de 2 fonctions Piston-Dispersion « ZNS + nappe » dont les paramètres moyens sont :

- Fonction 1 qui rend compte d'un transfert rapide (court-circuit probablement lié à l'état initial humide des terrains)

- un temps de séjour moyen de l'ordre de $20,1 \pm 0,24$ h,
- un coefficient de dispersion longitudinale moyen de l'ordre de $0,013 \pm 0,005$ m,
- représentant en moyenne 37 ± 4 % de la fonction de transfert globale dans les conditions d'infiltration de l'essai,

- Fonction 2 qui rend compte du transfert moyen :

- un temps de séjour moyen de l'ordre de $25,2 \pm 0,38$ h,
- un coefficient de dispersion longitudinale moyen de l'ordre de $0,11 \pm 0,02$ m,
- représentant en moyenne 63 ± 4 % de la fonction de transfert globale dans les conditions d'infiltration de l'essai.

On note par contre une très nette amélioration de la déconvolution dès lors que sont utilisées 2 fonctions Piston-Dispersion comme l'indique les écarts (r^2) et l'illustre la Figure 26: la courbe bleu ciel appelée « test de convolution » (résultat de la convolution de la fonction de transfert retenue avec les données d'entrée) suit beaucoup mieux la courbe de sortie mesurée dans la figure du bas (2 fonctions Piston-Dispersion) que celle du haut (1 fonction Piston-Dispersion).

Mise en application des outils développés dans Caphéine : Site 4

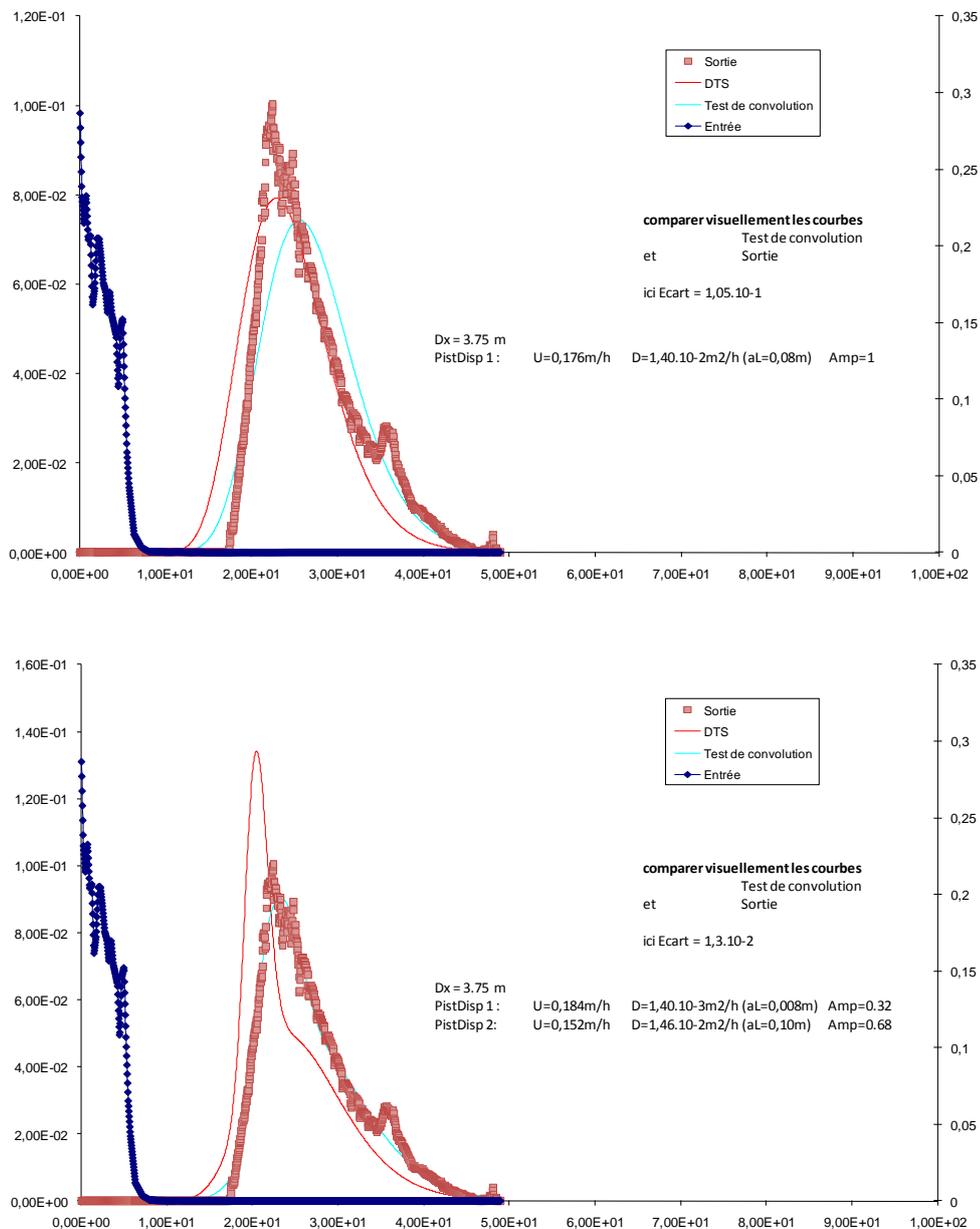


Figure 26 – Test de reconvolution des fonctions de transfert issues de la déconvolution des courbes de concentrations pour une distance de parcours de 3,75 m - calage avec 1 fonction Piston-Dispersion (figure du haut) et avec 2 fonctions Piston-Dispersion (figure du bas)



5.3 Modélisation de l'essai d'infiltration et de traçage

L'objectif des travaux de modélisation numérique est la restitution des charges et des concentrations en traceur observées sur différents piézomètres lors de l'essai de traçage à l'aide de l'infiltromètre grand diamètre. L'intérêt de la modélisation est de s'assurer de la bonne compréhension du sous-sol du site N°4 et de vérifier l'adéquation des paramètres hydrodynamiques estimés précédemment. Différentes schématisations, selon de nouvelles hypothèses (anisotropie, hétérogénéités) ou nouveaux scénarios (charge imposée, saisonnalité), pourront être testées afin de (i) caler au mieux les données de terrain, (ii) estimer la sensibilité du modèle et voire à (iii) proposer d'autres conditions de mise en œuvre.

Une fois le système bien décrit et après validation des résultats obtenus, le modèle peut devenir un puissant outil d'extrapolation permettant notamment de tester l'incidence d'une modification du milieu (saturation initiale par exemple) et/ou des conditions physico-chimiques sur le comportement des ETM (acidification du milieu).

5.3.1 Conceptualisation du modèle hydrodynamique

On reprend ici les hypothèses et choix réalisés lors de l'élaboration du modèle conceptuel.

Emprise du domaine

Les phénomènes d'intérêt ici s'appréhendent à une échelle locale (quelques m^3 de milieu poreux), sur toute l'épaisseur de la ZNS et de la ZS. On s'intéresse en effet essentiellement à l'infiltration radiale du bulbe d'eau et de soluté dans la ZNS avec transfert dans la nappe a minima jusqu'aux ouvrages voisins. L'étalement latéral attendu de ce bulbe impacte une zone de rayon 1 à 2 mètres autour de l'infiltromètre, les piézomètres d'intérêt se trouvant dans cette zone. Le domaine modélisé retenu à une emprise de $\{L_x ; L_y ; L_z\} = \{50m ; 50m ; 7m=(H_{ZNS}+H_{ZS})\}$ afin d'éloigner le positionnement des conditions aux limites, pour lesquelles nous disposons de peu d'informations.

Il est toutefois conseillé dans le guide « Modélisation des écoulements et du transport des éléments traces en zone non saturée » (Boissard *et al*, 2012) d'ancrer le domaine par des conditions aux limites naturelles (limites au niveau du fleuve ici). Toutefois, les phénomènes (infiltration radiale du bulbe : $\sim m^3$) et leurs temps de transfert (~ 20 à $50h$) ici étudiés permettent de ne considérer que l'échelle locale. L'utilisation de cette échelle permet de plus d'économiser sur les temps de calcul.

Caphéine



Définition des couches hydrogéologiques et schématisation

La coupe géologique moyenne (sondages par carottage/tarière) sur la zone est donnée sur la Figure 27 :

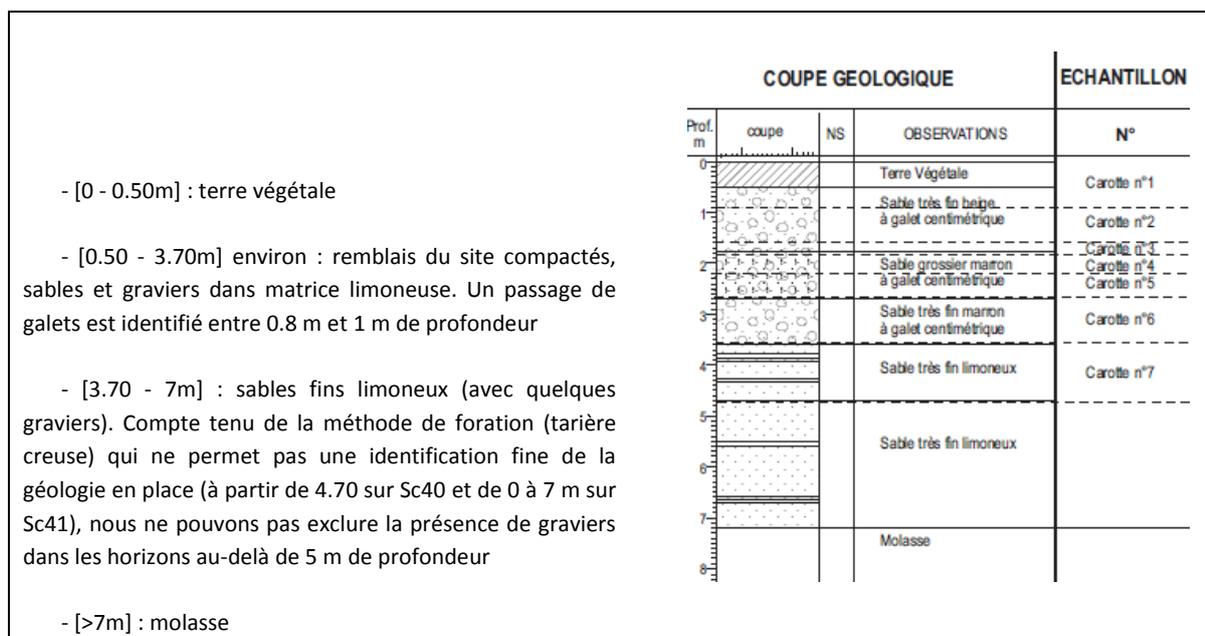


Figure 27 – Coupe lithologique du piézomètre Sc40

Au-dessous de la terre végétale, il apparaît deux lithologies différentes en zone non saturée (contrairement à ce qui avait pu être anticipé), la plus superficielle (0.5 à 3.7 m) présentant une fraction de galets nettement plus importante que la plus profonde (3.7 à 5 m au moins).

Les couches géologiques (molasse, argile), inférieures à la nappe superficielle des alluvions et de perméabilité inférieure de plusieurs ordres de grandeur, ne sont pas prises en compte ici. La nappe profonde, baignant la molasse, est légèrement en charge par rapport à la nappe superficielle et donc peu susceptible d’être le vecteur de pollution.

5.3.2 Écoulements locaux

Les écoulements locaux sont fortement perturbés par des ouvrages de génie civil se situant à proximité. Les piézomètres répondant de manière similaire à l’infiltration, le gradient local, ajusté entre N04 et Sc41, a alors été considéré : $I = 2.4\%$. A grande échelle, les éléments connus sur ce point font état d’un gradient hydraulique moyen de l’ordre de 0.2 à 4.5%. Toutefois, à proximité d’ouvrages, les possibles écoulements locaux sont difficiles à mettre en évidence.

5.3.3 Modèle de capillarité pour la ZNS et paramètres hydrodynamiques

Les essais BEST réalisés en 2005 et 2010 fournissent des paramètres permettant de renseigner les modèles de rétention de type van Genuchten (1980) avec condition de Burdine pour la saturation et de type Brooks et Corey (1964) pour la conductivité relative. De nouvelles lois de sols du type van Genuchten-Mualem ont également été estimées pour cette zone par FPTs lors de la phase de caractérisation hydrique. Des comparaisons entre BEST et FPTs sont disponibles pour Ks (voir §3.4.2) et pour les $h(\theta)/k(\theta)$ (voir §3.5).

Tableau 2 : Choix du modèle de rétention capillaire pour la ZNS

Modèle de rétention capillaire	Modèle de conductivité relative	Relation complémentaire
Modèle de van Genuchten	Modèle de Brooks et Corey	Relation de Burdine
$S_e(\theta, h) = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \begin{cases} [1 + \alpha h ^n]^{-m} & \text{si } h < 0 \\ 1 & \text{si } h \geq 0 \end{cases}$	$k_r(\theta, h) = \begin{cases} S_e^\eta & \text{si } h < 0 \\ 1 & \text{si } h \geq 0 \end{cases}$	$m = 1 - \frac{2}{n}$

Ces modèles sont sélectionnés pour les remblais en ZNS et prolongés jusqu'à la couche des alluvions pour modéliser les variations de nappe au niveau du pompage en Sc41. La conductivité hydraulique locale de la nappe apparaît bien connue, notamment grâce aux essais préliminaires de pompage en Sc40 et PzN04 (réponses similaires observées). De plus, la mise en pompage de Sc41 pendant l'essai *grand infiltromètre* montre un comportement hydraulique similaire. Compte tenu des caractéristiques des essais de pompage, des perméabilités de l'ordre de $3 \cdot 10^{-5}$ m/s sont retenues pour la nappe.

On rappelle dans le Tableau 3 les paramètres de forme (n et m) et d'échelle (h_g) acquis précédemment par la procédure BEST (cf. Ks : §3.4.2 ; cf. $h(\theta)/k(\theta)$: §3.5).

Tableau 3 : Synthèse des paramètres hydrodynamiques relatifs aux essais de caractérisations préliminaires

Module du modèle	Paramètres physiques	Paramètres d'entrée	Valeurs (min, moyenne, max) [unités]
Modèle hydrodynamique	Lois $h(\theta)$ et $k(\theta)$	n (Burdine) n (Mualem) h_g η θ_s θ_r	Burdine : 2.2 – 3.5 [-] (BEST) Mualem : 1.67 – 2.5[-] (FPTs) (50, 125, 325) [mm] (BEST) Ajusté [-] 0.22 [-] (BEST) 0.001 [-]
	Ks ZNS	Ks	$(5 \cdot 10^{-6} : 1 \cdot 10^{-5} : 1 \cdot 10^{-4})$ [m/s] (BEST, FPTs, Forage)
	Ks Nappe	Ks	$(5 \cdot 10^{-6} : 1 \cdot 10^{-5} : 1 \cdot 10^{-4})$ [m/s] (Essais de pompage)



Modèle de transfert	Dispersion	α_L α_T D_0	$(0.1, 1, 2)$ [m] $\alpha_L / 10$ [m] 1.10^{-9} [m ² /s]
---------------------	------------	-----------------------------------	---

5.3.4 Schématisation, maillage et mécanismes

A l'échelle locale, il apparaît pertinent - en première approche - de modéliser le domaine en un seul milieu homogène quitte à introduire, en fonction des résultats, une approche double-couche pour différencier la zone à galets (couche [0,50m - 3.70m]) de la couche de sables fins limoneux à partir de 3.70m.

Les processus d'infiltration et de transfert sont principalement radiaux dans la ZNS, une modélisation en 2D axisymétrique (axe de rotation vertical au droit de l'infiltromètre) pourrait être envisageable. Toutefois, la prise en compte de la nappe et du pompage nécessite de réaliser une vraie modélisation 3D.

Ainsi, le modèle 3D présente les caractéristiques suivantes :

- le domaine est voulu suffisamment grand pour éviter les effets de bords, au moins à l'échelle du transfert du traceur,
- les potentiels sont adaptés en amont/aval afin de reproduire les hauteurs mesurées en PzN04, Sc40 et Sc41 en début d'essai (soient 193.14m NGF, 193.05m NGF et 193.02m NGF), pour un gradient de 2.4%,
- le maillage est non-structuré (mailles tétraédriques) et est raffiné au droit de l'infiltromètre jusqu'à la nappe. Ceci permet de capter précisément l'infiltration en non saturé du bulbe d'eau et d'offrir un compromis entre la discrétisation et le temps de calcul. Les tailles de mailles au droit de l'infiltromètre sont de l'ordre de 5cm, permettant la sélection d'une dispersivité de 10cm si nécessaire. Le maillage est toutefois relâché lorsqu'on s'écarte de la zone d'intérêt (cf. Figure 28)

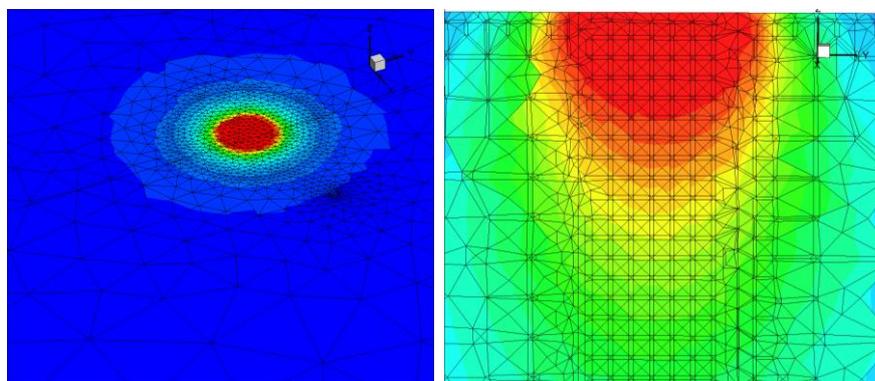


Figure 28 – Maillage surfacique au voisinage de l’infiltromètre (gauche), projection du maillage (non structuré) au droit de l’infiltromètre en coupe verticale (droite).

Le modèle ne prend toutefois pas en compte le massif de béton situé entre PzN04 et l’infiltromètre dont on ne connaît ni l’étendue verticale ni horizontale.

Le modèle mathématique sélectionné est basé sur la résolution de l’équation de Richards pour les écoulements insaturés et sur l’équation de convection/dispersion/diffusion pour la partie transfert (cf. Boissard et *al.*, 2012). Les lois de sols retenues sont les modèles de rétention de type van Genuchten avec condition de Burdine pour $h(\theta)$ et de type Brooks et Corey pour $k(\theta)$. Le pompage est pris en compte via un terme « puits » dans les différentes équations.

5.3.5 Processus de calage du modèle et critères de calage du modèle

L’ajustement d’un modèle numérique de transferts d’eau et de polluants dans la ZNS reste un travail complexe, notamment en raison de l’absence d’unicité de solutions. En effet, plusieurs jeux de données différents peuvent modéliser de façon acceptable les réponses du système. Ainsi, l’ajustement d’un modèle de transfert, calé sur les courbes de percée, peut être construit sans pour autant que les niveaux piézométriques soient bien calés. Et inversement, le calage du modèle hydrodynamique ne s’accompagne pas pour autant du calage du modèle de transfert.

Le tableau suivant détaille les données expérimentales/phénomènes pris en compte lors des étapes de calage du modèle, les critères de validation et les paramètres numériques ajustés en conséquence.

Tableau 4 : Tableau synthétique des données d’intérêts, des paramètres numériques et critères de validation utilisés pour le calage manuel du modèle

Module du modèle	Données exp.	Utilisation de ces données dans le modèle	Paramètre(s) d’entrée	Critères considérés	Incertitudes	Si Prédictions différentes des Observations
Modèle hydro dynamique	Débit d’infiltration	Condition limite	Charge dans l’infiltromètre	Ajustement de K_s pour caler le débit mesuré expérimentalement	Incertitude sur les propriétés du sol	Revoir la valeur de K_s en surface
			Flux de débordement	Ajustement du flux suite au débordement dans l’infiltromètre (défaut de maintien de la charge)	Incertitude sur les données d’entrée	Revoir la condition limite en surface extérieure hors infiltromètre



	Relevés piézométriques N04, Sc40 et Sc41	Restitutions	{n, η, Ks}, Bilans hydriques (pluviométrie, flux de débordement, drainage / recharge en limite du domaine)	Ajustement des niveaux piézométriques et des variations d'amplitude en regard du débit d'infiltration	Incertitude sur le modèle conceptuel, les données d'entrée et les caractéristiques du sol	<u>Revoir hypothèses :</u> Modèle double couche, hétérogénéités ; études paramètres sensibles
Modèle de transfert	Débit d'infiltration du traceur dans l'infiltromètre	Condition limite	Débit massique	Ajustement sur le suivi de la concentration en Rhodamine dans l'infiltromètre	Incertitude sur les données d'entrée	Revoir débit d'infiltration
	Chronique de concentration en N04, Sc40 et Sc41	Restitutions	Dispersivités {α _L , α _T }	Ajustement sur les temps d'arrivée, ordre de grandeur et forme de la courbe de percée	Incertitude sur le modèle conceptuel, les données d'entrée et les caractéristiques hydro-dispersives du sol	<u>Revoir hypothèses :</u> modèle hydrodynamique

Le Tableau 4 fait apparaître des critères de calage dépendant de paramètres d'entrée mal maîtrisés :

- le débit de débordement (dû au défaut de maintien de charge) est connu mais la surface sur laquelle il est réparti ne l'est pas. De plus, l'anneau étant ancré avec de la bentonite dans la fosse, il est difficile d'évaluer où et comment s'est réellement infiltrée cette eau (non marquée). On observe toutefois que la restitution du traceur en Sc41 s'est faite majoritairement avant l'augmentation du débit. De plus, celle-ci n'a pas significativement modifié les courbes de percée du traceur en Sc41 et N04 à 40h, ni en Sc40 à 90h. En conséquence :
 - un premier calage du modèle sera effectué sur la période allant de T=0 à 33h,
 - des tests de sensibilité permettront d'évaluer l'influence de ce paramètre sur les réponses piézométriques et les restitutions dans les différents ouvrages.
- la variation de concentration du traceur dans l'infiltromètre. L'injection du traceur s'est faite en mélangeant dans l'infiltromètre une solution marquée à concentration connue avec une eau non marquée. Le suivi de la concentration en traceur dans l'infiltromètre a mis en évidence l'influence du débit d'infiltration sur la concentration. En conséquence, il sera vérifié que l'ajustement du débit d'infiltration modélise correctement les variations de concentration du traceur dans l'infiltromètre.



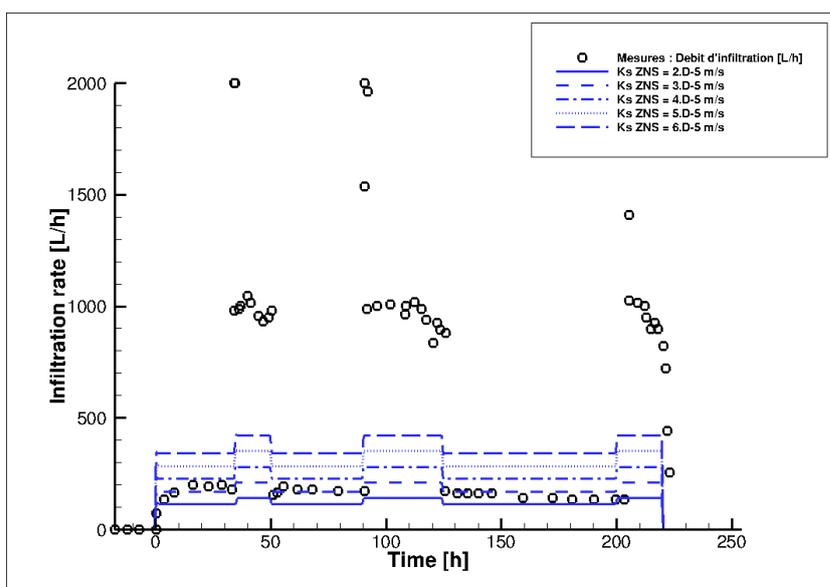
Les autres incertitudes identifiées sont relatives au modèle conceptuel (mécanismes, hétérogénéités, emprise/géométrie), aux paramètres hydrodispersifs retenus et aux modalités de restitutions (homogénéisation du traceur dans les ouvrages).

Le calage du modèle est réalisé manuellement par prédiction/correction. Le modèle hydrodynamique est d'abord calé puis le modèle de transfert, avec potentiellement des allers/retours entre les deux modèles selon la réponse du système.

5.3.6 Etapes de validation du modèle hydrodynamique

5.3.6.1 Etape 1 : Modélisation débit d'infiltration → Ajustement de K_s en surface

La Figure 29 présente le débit d'infiltration en fonction de la perméabilité équivalente de la ZNS définie dans le modèle homogène.



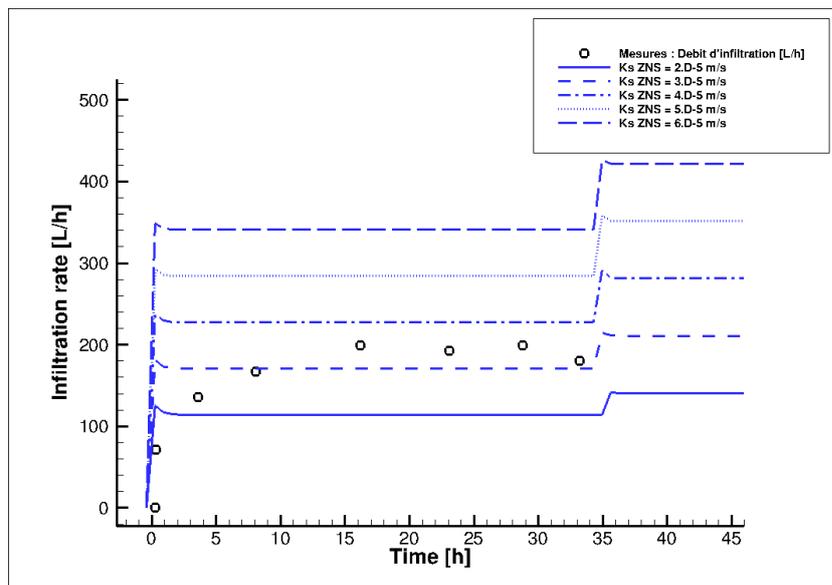


Figure 29 : Modélisation du débit d'infiltration (Bas : zoom sur la période $T=[0 : 45h]$). Sensibilité à K_s en ZNS (modèle homogène). Phase avec maintien de charge : $H_{inf} = 20cm$; Phase avec défaut de maintien de charge : $H_{inf} = 35cm$ (débordement non pris en compte). Cercles : Mesures, Traits : Modèle

On en déduit une valeur de K_s en ZNS (modèle homogène) de l'ordre de $3.5 \cdot 10^{-5}$ m/s. On admet ici que le débit est contrôlé par une couche de sol d'épaisseur proportionnelle à la taille de l'infiltromètre ($\phi=0.8m$), cette valeur de K_s n'est donc vraiment représentative que de cette couche. La vitesse d'infiltration est alors de 0.22 m/h (soit 5.44 m/j) en conditions normales, 0.26m/h lors des phases sans maintien de charge (soit 6.43 m/j). Pour une perméabilité de $6 \cdot 10^{-5}$, le modèle restitue une vitesse d'infiltration de 0.39 m/h (soit 9.33 m/j).

Pour cette valeur de K_s , le débit infiltré dans l'infiltromètre pendant les périodes sans maintien de charge représente 20% du débit total mesuré (soit 200L/h sur les 1000L/h mesurés). La définition du débit d'infiltration par débordement sera vue par la suite.

Cette valeur de conductivité est en phase avec celles estimées lors de la campagne de caractérisation (essais BEST, FPTs ROSETTA, micro-forage/Porchet, cf. Figure 10) ainsi que celle estimée lors de l'essai d'infiltration préliminaire (cf. Figure 22).

5.3.6.2 Etape 2 : Modélisation du pompage en Sc41 → Ajustement de K_s en nappe

La figure suivante présente les réponses dynamiques des piézomètres en fonction de la valeur de K_s pour le modèle homogène en nappe.



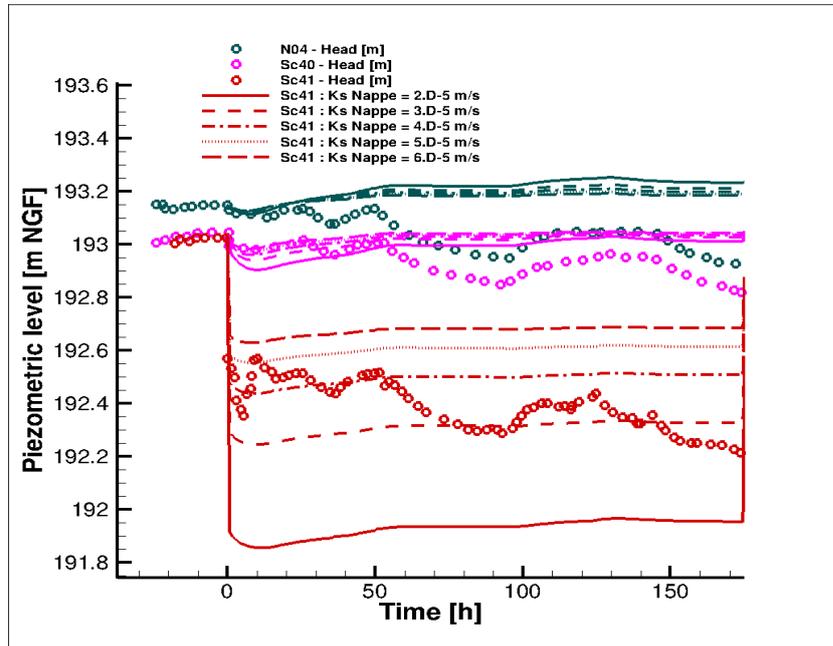


Figure 30 : Modélisation de la réponse dynamique des piézomètres Sc41, Sc40, N04. Sensibilité à la valeur de K_s en nappe (modèle homogène). Phase avec maintien de charge : $H_{inf} = 20\text{cm}$; Phase avec défaut de maintien de charge : $H_{inf} = 35\text{cm}$ (débordement non pris en compte). Cercles : Mesures, Traits : Modèle

Ces premiers résultats confirment les valeurs de K_s estimées lors des essais de pompage en Sc40 et PzN04, confirmant l'homogénéité des propriétés de cette zone. Une valeur de K_s similaire à celle de la ZNS ($\sim 3.5 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$) est retenue pour la nappe dans la suite, confirmant ainsi les propriétés d'homogénéité de ces remblais.

Les hauteurs en Sc40 et PzN40 ne semblent pas très affectées par K_s sur les ordres de grandeur de K_s testés. Les apports d'eau par l'infiltromètre (sans débordement) n'affectent pas non plus significativement les niveaux de nappe.

5.3.6.3 Etape 3: Modélisation des variations piézométriques → Bilan hydrique: pluviométrie, flux de débordement

La prise en compte des apports d'eau dans l'infiltromètre et dans la fosse, consécutifs aux problèmes de maintien de charge, permet d'améliorer l'estimation des variations de la nappe. Cette information fait partie des incertitudes sur les données d'entrée mais dont l'influence sur les réponses du modèle (piézométrie, restitutions des traceurs) n'est pas avérée (ou alors seulement sur la traîne des BTCs).

Le flux de débordement a été appliqué sous la forme d'une charge constante pendant les périodes de défaut de maintien de charge dans un rayon d'un mètre autour de l'infiltromètre (inclus). Les conditions aux limites ont fait l'objet d'un ajustement afin de rendre compte des phases fortement drainantes du système (T=50h à T=100h, puis T=140h à T=175h). Cet ajustement manuel constitue une forte sensibilité/limitation du modèle hydrodynamique. Toutefois, aux échelles de temps et d'espace considérés pour les transferts (T=0h à T=50h au pic, T= 100h pour la traînée), la sensibilité des BTCs aux conditions limites n'est pas avérée.

La Figure 30 présente les chroniques piézométriques restituées par le modèle aux ouvrages à proximité de l'infiltromètre. Si le comportement général est bien reproduit, les remontées de nappe prédites sont supérieures à celles observées dans les trois ouvrages (+20cm à T=120h, +25cm après arrêt du pompage).

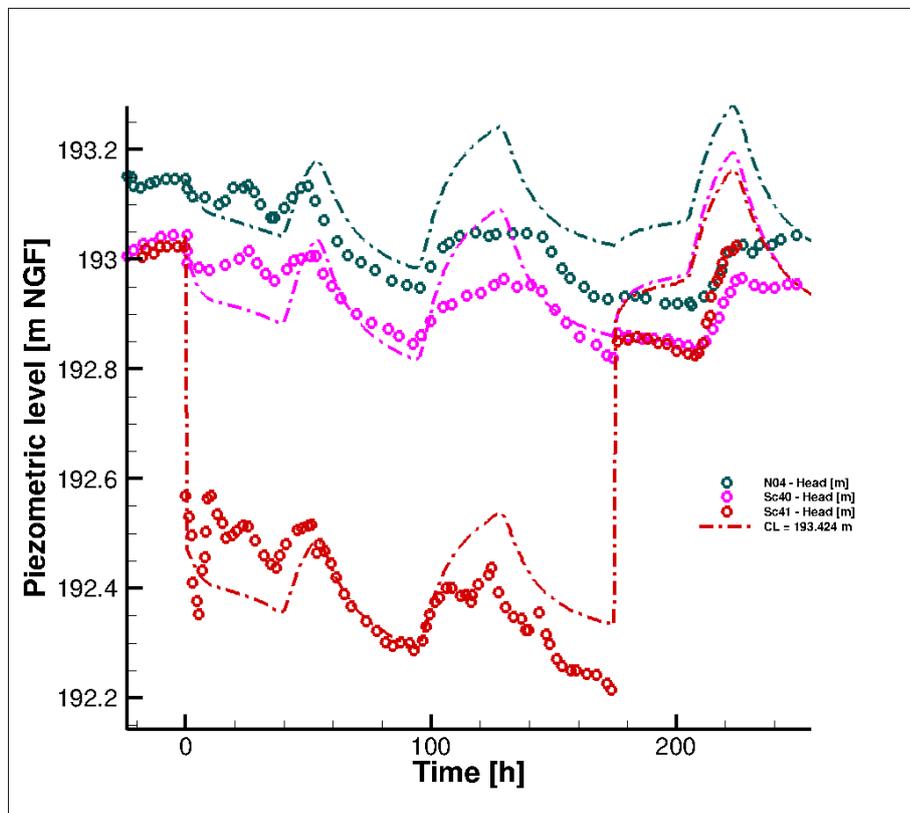


Figure 31 : Modélisation de la réponse dynamique des piézomètres Sc41, Sc40, N04 avec prise en compte du flux de débordement. $H_{inf} = 20\text{cm}$ (conditions normales) ; $H_{inf} = 35\text{cm}$ (+ flux de débordement). Cercles : Mesures, Traits : Modèle.

De plus, les variations en Sc41 en début d'essai (T=5h à T=10h) ne sont pas reproduites ici. Les prévisions du modèle pourraient être améliorées en prenant en compte les apports hydriques extérieurs (notamment pluie des jours précédents), mobilisés plus facilement en Sc41 par la mise en pompage.

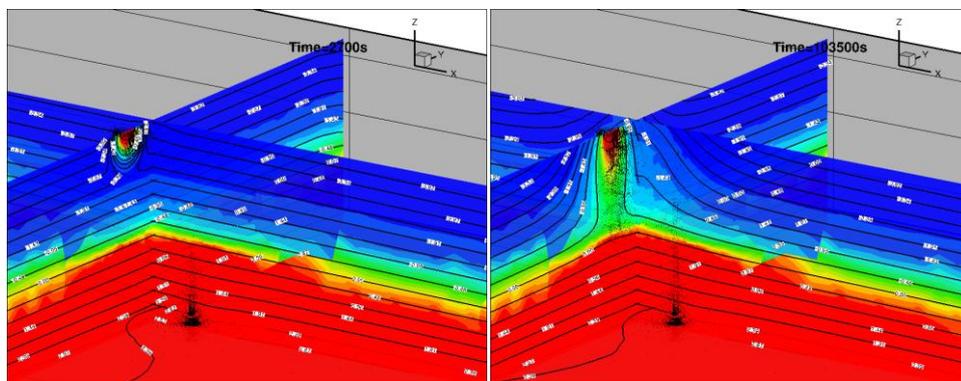
Tableau 5 : Synthèse des différences entre les restitutions du modèle et les observations. Explications avancées et proposition d'axes d'améliorations

Différences observées sur les restitutions du modèle hydrodynamique	Explications avancées	Proposition d'axes d'amélioration (modèle, données complémentaires)
Variation d'amplitude lors du défaut de maintien de charge	Drainage insuffisant des apports hydriques par la nappe dans le modèle	Définition du flux de débordement (intensité, localisation)
Influence des conditions aux limites	Dimensionnement de l'emprise du modèle	

5.3.6.4 Interprétation : Hypothèse de la formation d'un dôme au droit de l'infiltromètre et création d'un continuum hydrique

La modélisation hydrodynamique permet d'étudier l'hypothèse de la formation d'un dôme sous l'infiltromètre ainsi que celle de la présence d'un continuum hydrique entre la surface et la nappe.

Les figures suivantes présentent les profils d'humidité en coupe au droit de l'infiltromètre à T=1h, 29h et 105h. La formation d'un dôme n'apparaît pas ici confirmée pour les premières heures d'infiltration. Le dôme ne semble se former que lors des phases où le maintien de charge dans l'infiltromètre est mis en défaut.



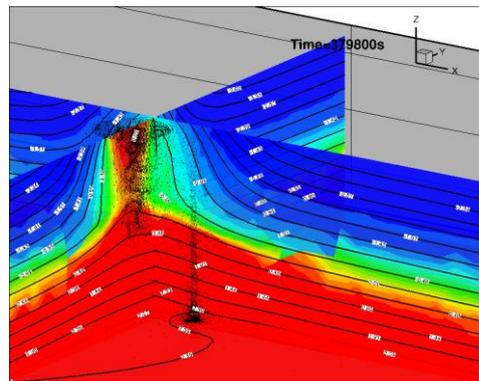
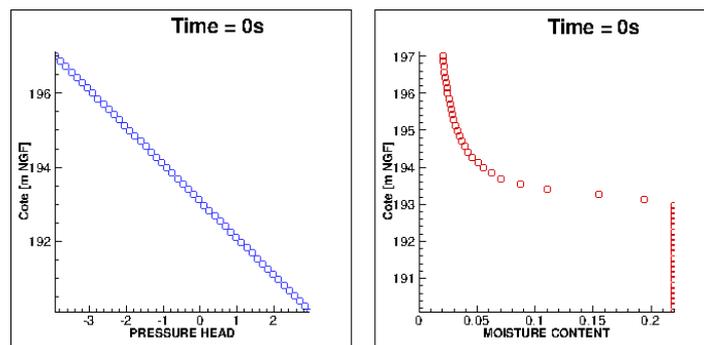
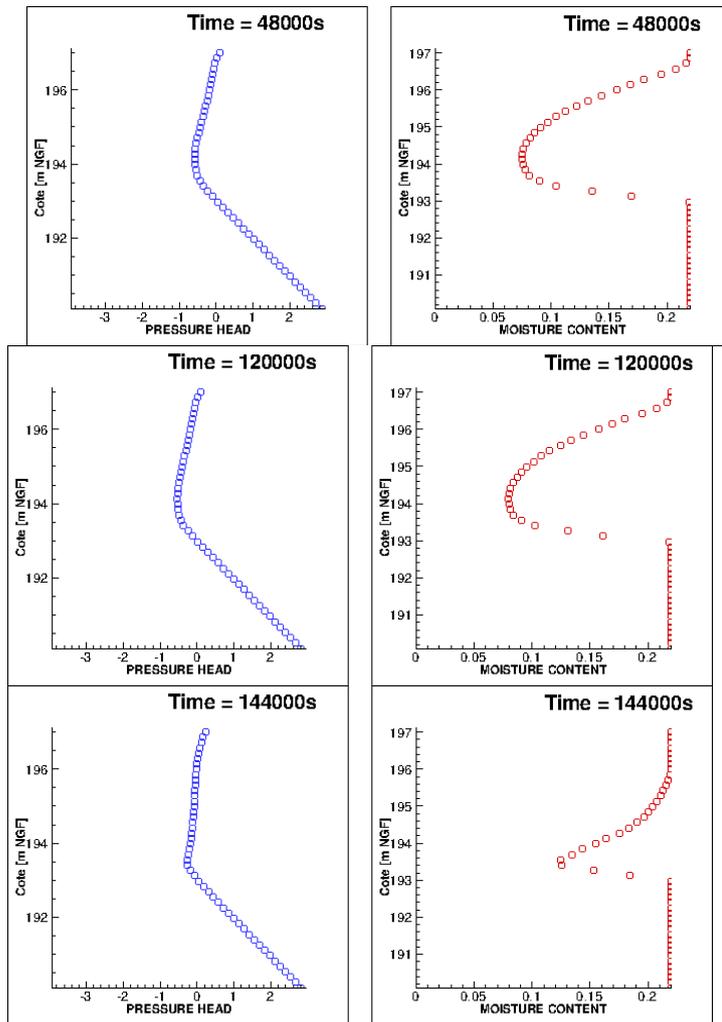


Figure 32 : Modèle hydrodynamique ZNS/ZS : propagation du bulbe d'humidité au droit de l'infiltromètre avec formation d'un dôme

Les profils d'humidité modélisés sous l'infiltromètre (cf. Figure 33) confirment cette analyse, le continuum hydraulique entre la surface et la nappe ne semble se mettre vraiment en place que lors de l'absence de maintien de charge.





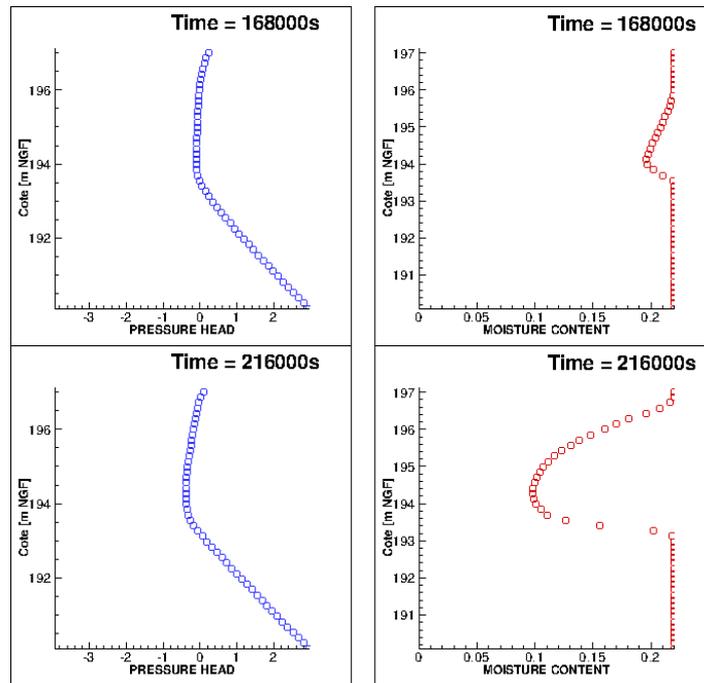


Figure 33 : Profil de teneur en eau au droit de l'infiltromètre au cours de l'essai d'infiltration

En effet, au vu des profils d'humidité à T=13 et 33h, la ZNS au droit de l'infiltromètre semble suffisamment drainer les apports d'eau par l'infiltromètre. Le profil de saturation commence à être modifié suite à l'augmentation de débit (T=40h) pour atteindre un profil quasi saturé à T=46h. La charge est rétablie à T=50h et à T=60h, le milieu a à nouveau été drainé.

Le drainage de l'eau dans la ZNS peut également être observé à partir des variations dynamiques des niveaux piézométriques (cf. Figure 21), lesquels répondent assez faiblement à l'augmentation de débit dans l'infiltromètre.

Ce modèle hydrodynamique, construit à l'échelle locale, met en évidence des transferts d'intérêt plutôt verticaux avec un étalement du bulbe d'infiltration dans un rayon d'un à deux mètres par rapport au centre de l'infiltromètre, avec formation d'un dôme et d'un continuum hydraulique dans les phases de défaut de maintien de charge.

5.3.7 Etapes de validation du modèle de transfert

5.3.7.1 Etape 1 : Modélisation de l'injection de traceur → Ajustement du débit massique

Le mode d'injection du traceur (mélange solution marquée avec solution non marquée dans l'infiltromètre) implique une dépendance de la concentration en traceur dans l'infiltromètre au débit d'infiltration.

Dans la mesure où le débit infiltré est plus rapidement stabilisé dans le modèle (cf. Figure 29), un effet de pente est ajouté à la définition du flux massique. Le flux expérimental initial était de 4.4g/h. La masse de traceur infiltrée estimée est comprise entre 30 et 38g (selon la méthode de bilan de masse) et correspondrait à un flux massique réel de 6.8g/h en moyenne pendant 5h. Cette valeur a été retenue dans le modèle.

La Figure 34 présente la courbe d'infiltration du traceur sous l'infiltromètre, comparée aux mesures in-situ. La sensibilité de cette restitution au débit est illustrée pour différentes valeurs de K_s en ZNS.

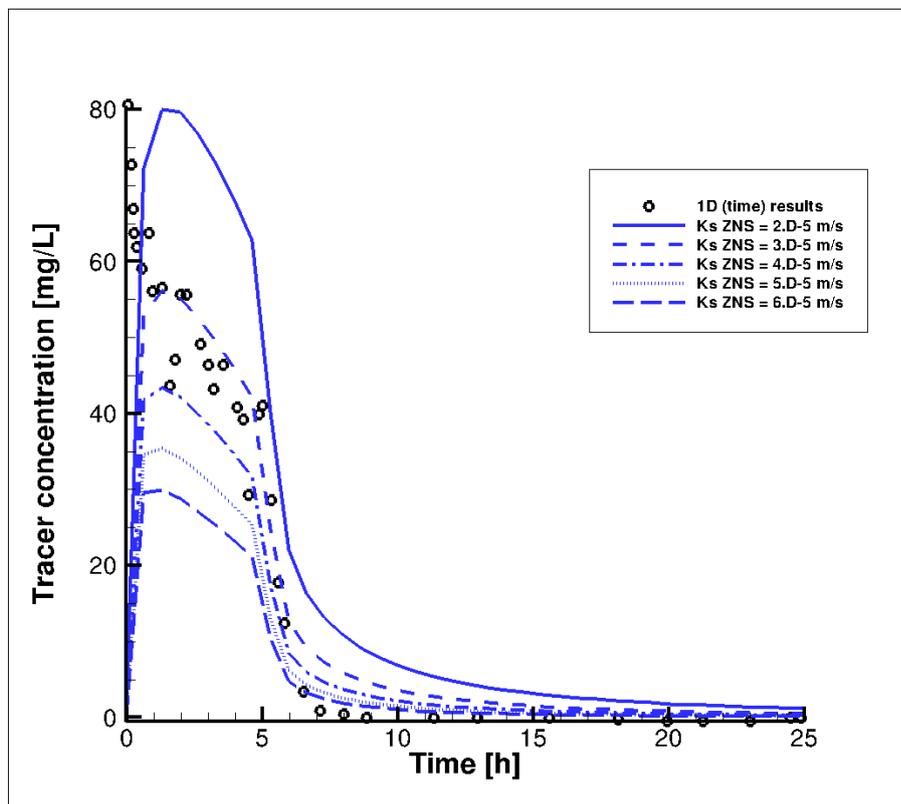


Figure 34 : Modélisation de l'infiltration du traceur. Sensibilité à la valeur de K_s en ZNS (modèle homogène). Flux massique = 6.6 g/h. Cercles : données mesurées in-situ, Traits : Modèle.

L'augmentation du débit d'infiltration entraîne une dilution du signal. Le modèle s'accorde de façon acceptable aux données observées et confirme le bon ordre de grandeur des débits modélisés pour $K_s \sim 3.5 \cdot 10^{-5}$ m/s.

5.3.7.2 Etape 2 : Modélisation des courbes de percée du traceur dans les différents ouvrages → Ajustement des paramètres hydrodispersifs

Les restitutions du traceur dans les différents ouvrages sont calculées par homogénéisation des concentrations dans la colonne d'eau (pompe de mélange, crépines de 3m, volume 5L).

Une valeur de dispersivité longitudinale de 1m a été initialement retenue pour la ZNS/ZS ($\alpha_T=1/10$ α_L). L'interprétation analytique estime une dispersivité de 10cm mais ne prend pas en compte les effets du pompage.

Le retour d'expérience sur les valeurs de dispersivités en ZNS dans ces conditions est faible. Les deux modélisations des essais « grand infiltromètre » dans le cadre du projet TRANSAT aboutissaient à des dispersions de 1m (matrice sablo-limoneuse) et 0.1m (sols présentant de fortes hétérogénéités). La sensibilité du modèle à ce paramètre sera considérée par la suite.

Les figures suivantes présentent les restitutions du modèle (traits), comparées aux suivis de concentration réalisés lors de l'essai (cercles).

Le modèle restitue ainsi :

- *En Sc41 :*
une courbe de percée très étalée, avec une apparition du traceur plus rapide ($T=10h$ contre 17h exp.) et très lente dans la disparition du traceur. Le pic modélisé est légèrement retardé ($T=34h$, $C \# 2$ mg/L contre $T=22.5h$, $C \# 1,7$ mg/L exp.). Les inflexions des BTCs modélisées sont imputables aux modifications de conditions limites dans l'infiltromètre (défaut de maintien de charge),
- *En Sc40 :*
le signal de façon acceptable, malgré une apparition rapide du traceur, peu après le signal relevé en Sc41, ($T=14h$ contre 40h exp.). L'axisymétrie du signal (traînée) est bien reproduite par le modèle, même s'il marque plus le point d'inflexion. La disparition du traceur est en phase avec les données expérimentales (étalement vers $\sim 170h$). Le pic modélisé est légèrement en avance/surestimé ($T=44h$, $C \# 1,29mg/L$ contre $T=47h$, $C \# 0.83mg/L$),



- *En PzN04 :*

une courbe de percée très étalée, avec une apparition plus rapide du traceur dans le modèle (T=22h contre 26h exp.). La brève apparition du signal n'est pas ici reproduite, le signal reste très étalé dans le modèle pendant toute la simulation, tandis que les mesures montrent un signal très faible dès T=45h. Le pic modélisé est légèrement retardé/surestimé (T=54h, C # 0.44mg/L contre T=37h, C # 0. 32mg/L).

Ainsi, le modèle permet de restituer les bons ordres de grandeur des courbes de percée du traceur dans les différents ouvrages (atténuation de 5% en Sc41 par rapport à l'injection contre 3,5% exp.). Toutefois, le modèle actuel ne rend pas compte des ordres d'arrivée dans les ouvrages Sc40 et PzN04. Le modèle surestime également largement les traînées du traceur, (particulièrement en PzN04).

Le tableau suivant récapitule les différences significatives entre les restitutions du modèle et les observations et propose des axes d'amélioration du modèle ou de la mise en œuvre de l'essai :

Tableau 6 : Synthèse des différences entre les restitutions du modèle de transfert et les observations. Explications avancées et proposition d'axes d'améliorations

Différences observées sur les restitutions du modèle de transfert	Explications avancées	Proposition d'axes d'amélioration (modèle, données complémentaires)
Large traînée des BTCs	Valeur de dispersivité longitudinale (1m) L'interprétation analytique par DTS aboutit à l'ajustement d'une dispersivité de 10cm	Tests de sensibilité sur la dispersivité. A noter que les travaux de modélisation des essais <i>grand infiltromètre</i> dans le cadre du projet TRANSAT ont estimé des dispersivités de 1m et 0.1m dans des conditions similaires
Large traînée des BTCs (notamment en PzN04)	<u>Homogénéisation effectuée</u> par le modèle pour la restitution du traceur dans les ouvrages. Les résultats montrent un effet de stratification du traceur dans la colonne, avec des temps d'arrivée très différents selon la profondeur. Les larges traînées s'expliquent alors par la lente pénétration du traceur en fond de colonne d'eau.	Absence d'information sur la pénétration en nappe (utilisation de packers dans les ouvrages) Affiner les écoulements dans la nappe
Ordre d'arrivée des signaux dans les ouvrages	<u>Influence du pompage en Sc41</u> (trop locale ici) qui pourrait retarder l'arrivée du signal en Sc40 Écoulements locaux Dispersivité transversale	Information manquante sur le massif en béton. Tests de sensibilité sur le débit de pompage / perméabilité en nappe.
Décalage en temps du pic	<u>Perméabilité équivalente</u> de la nappe plus faible dans le modèle	Construction d'un modèle double et tests de sensibilité à la perméabilité des sous-couches.
Décalage en temps du point d'inflexion des BTCs	<u>Perméabilité équivalente</u> de la nappe plus faible dans le modèle et / ou définition du flux de débordement	Construction d'un modèle double/triple couche. Définition du flux de débordement (intensité, localisation)
« Bilan massique » en Sc41 et PzN04	Écoulements locaux et gradient hydraulique (PzN04 et Sc41 ont été placés en amont/aval hydraulique direct, ce qui n'est pas forcément avéré)	Affiner les écoulements locaux
Pas de bilan massique en Sc41	Revoir le terme de « pompage » dans les équations de transfert	Amélioration des mécanismes physiques/numériques :



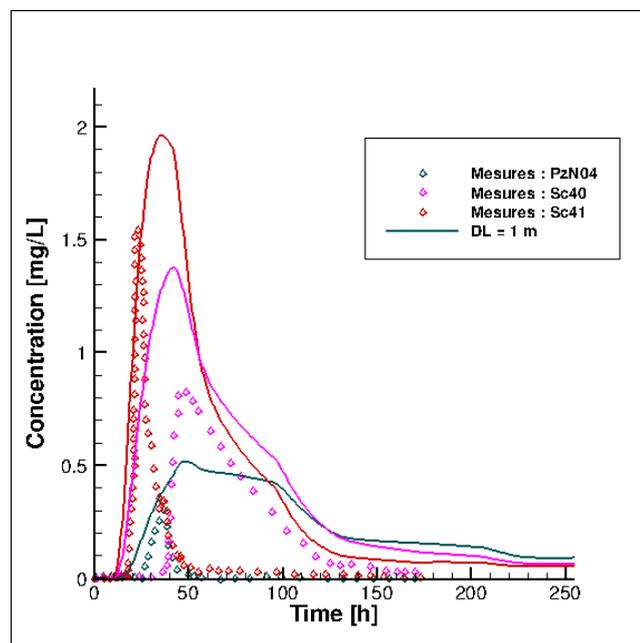
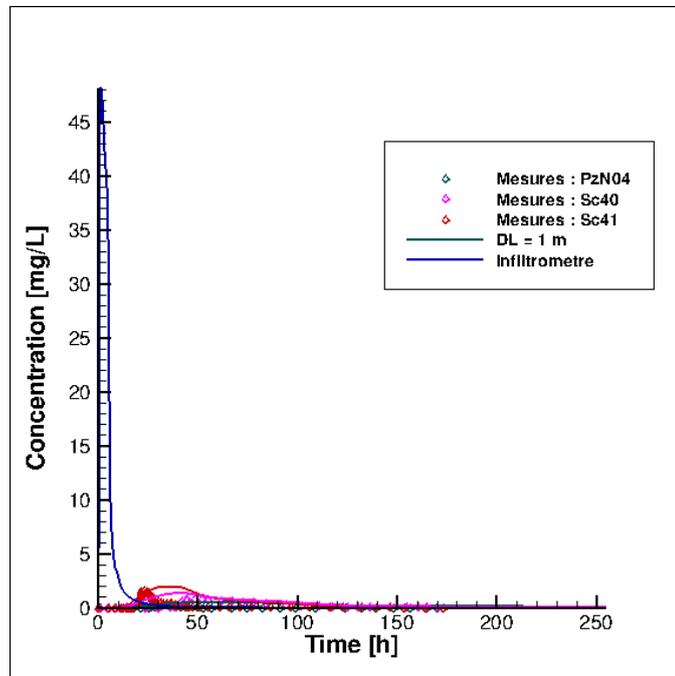


Figure 35 : Modélisation des restitutions du traceur dans l'infiltromètre (haut) et en Sc41, Sc40, N04 (bas). Phase avec maintien de charge : $H_{inf} = 20\text{cm}$; Phase avec défaut de maintien de charge : $H_{inf} = 35\text{cm}$ (avec prise en compte du débordement). Cercles : Mesures, Traits : Modèle



A titre d'illustration des effets de pénétration du traceur dans la nappe, la Figure 36 présente les restitutions du modèle en PzN04 (tous les 50 cm, depuis 193.5m NGF). On manque alors d'information quant à la pénétration du traceur dans la nappe, il pourrait être intéressant d'isoler les contributions par la mise en place de packers dans les ouvrages.

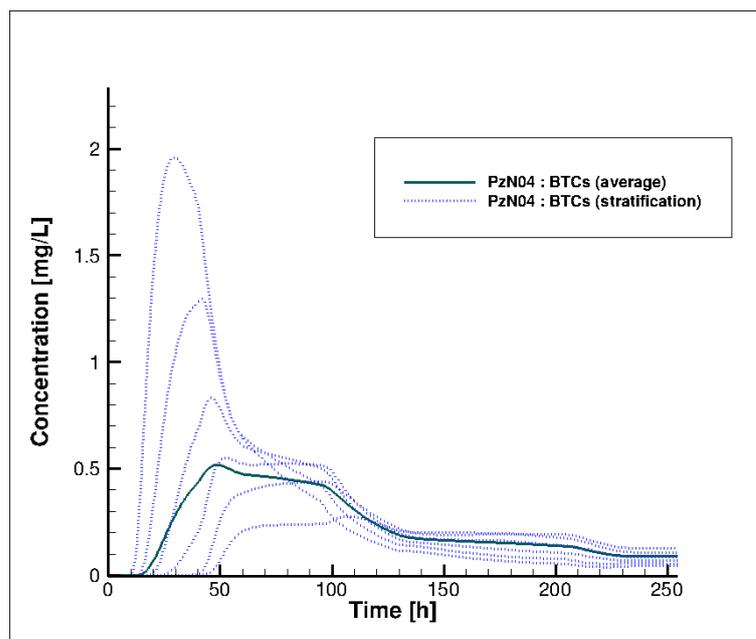


Figure 36 : Restitutions du traceur en PzN04 à différentes profondeurs dans la nappe. Points : Restitutions brutes, Traits : Moyenne.

5.3.7.3 Interprétation : Hypothèse d'une voie de transfert principale en ZNS, avec très faible contribution de la voie de transfert nappe

La Figure 37 présente la sensibilité du modèle à la valeur de Ks en nappe.

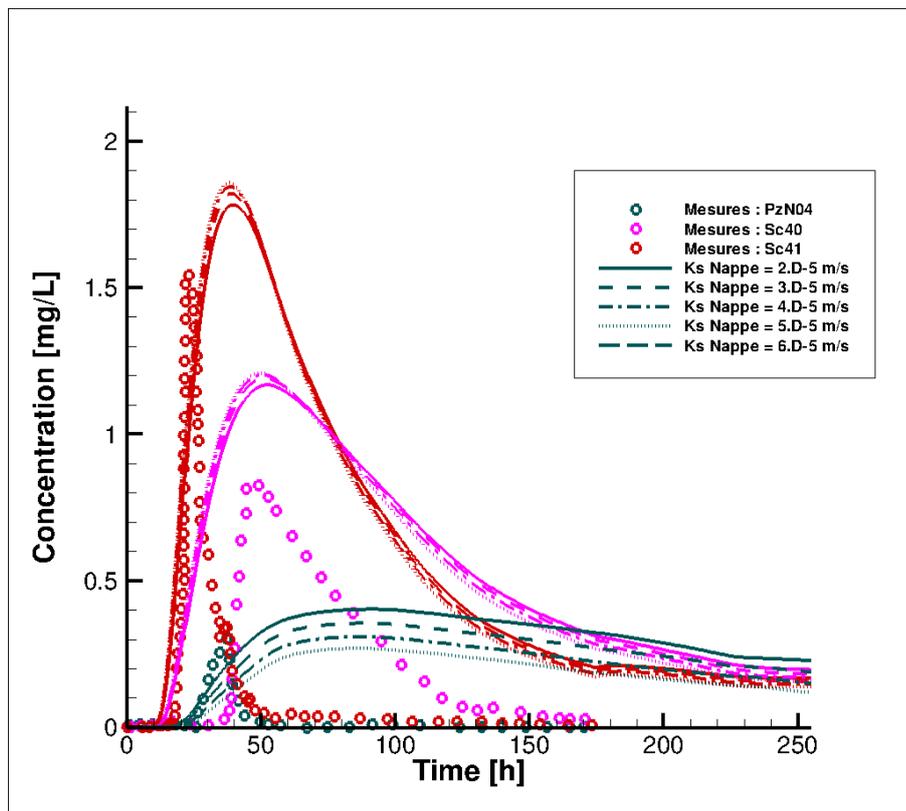


Figure 37 : Modélisation des restitutions du traceur en Sc41, Sc40, N04. $H_{inf} = 20\text{cm}$ (conditions normales) ; Phase avec maintien de charge : $H_{inf} = 20\text{cm}$; Phase avec défaut de maintien de charge : $H_{inf} = 35\text{cm}$ (avec prise en compte du débordement). Cercles : Mesures, Traits : Modèle

L'hypothèse d'une contribution mineure de la nappe semble confirmée ici (faible sensibilité à la valeur de K_s en nappe), le transfert semble en effet davantage contrôlé par la ZNS. La figure suivante présente les BTCs estimées suivant différentes valeurs de K_s en nappe. A noter que le flux de débordement n'est pas pris en compte ici, ce qui explique les larges traînées restituées par le modèle.

5.3.7.4 Interprétation : Apparition du traceur en PzN04

Les figures suivantes confirment que le traceur est poussé vers un piézomètre en amont hydraulique (infiltration radiale), tandis qu'il est progressivement lessivé au droit de l'infiltromètre (cf. Figure 38). Le traceur est chassé sur les bords latéraux par le bulbe d'eau claire qui s'infiltré après $T=5\text{h}$. Une partie du panache est ensuite piégée dans la couche supérieure de la ZNS.



Mise en application des outils développés dans Caphéine : Site 4

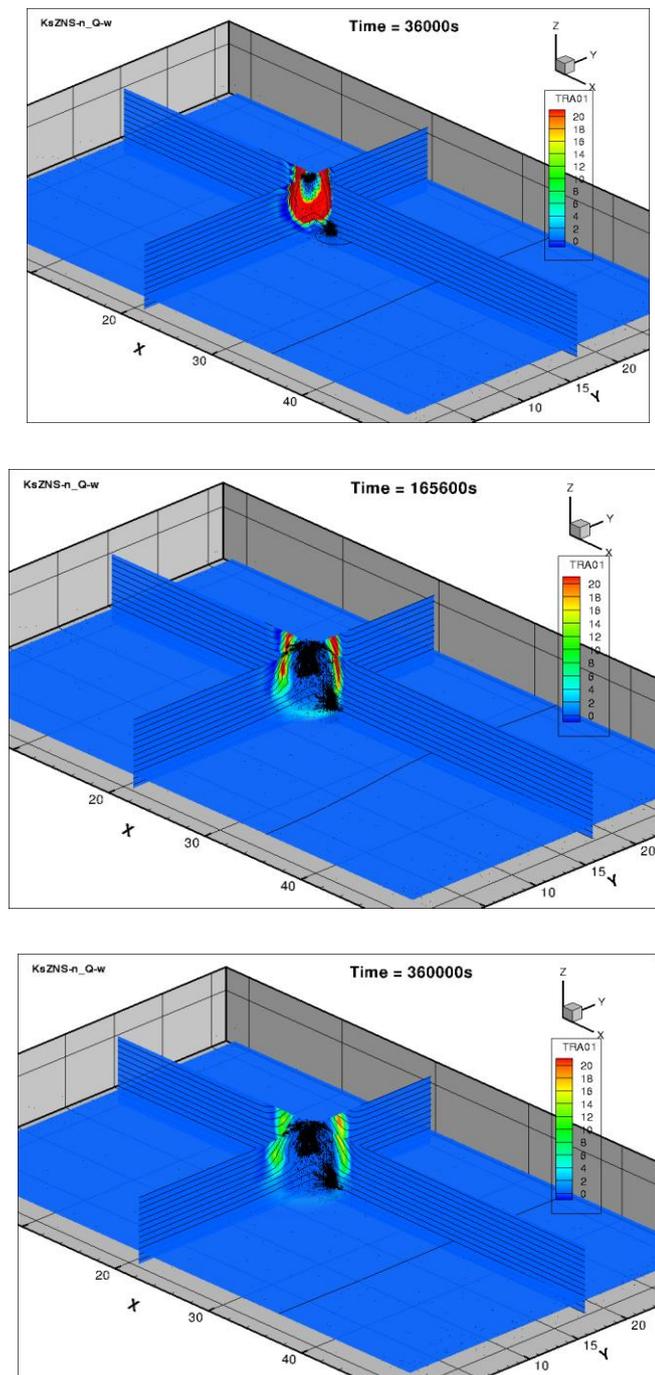


Figure 38 : Modèle de transfert en ZNS/ZS : lessivage du traceur au droit de l'infiltromètre

5.3.8 Tableau synthétique des paramètres du modèle homogène

Le tableau suivant synthétise les paramètres principaux finalement retenus.

Tableau 7 : Paramètres du modèle de référence

Module du modèle	Paramètres physiques	Paramètres numérique ajusté	Valeurs (min, moyenne, max) [unités]
Modèle hydrodynamique (ZNS et ZS homogène)	Lois $h(\theta)$ et $k(\theta)$	n, m hg η θ_s θ_r	2.5 ; 0.2 [-] (Burdine) 125 [mm] 2 [-] 0.22 [-] 0.001 [-]
	Conductivité hydraulique à saturation en ZNS	K_s	$3.5 \cdot 10^{-5}$ [m/s]
	Conductivité hydraulique à saturation en nappe	K_s	$3.5 \cdot 10^{-5}$ [m/s]
Modèle de transfert (ZNS et ZS homogènes)	Dispersion	α_L α_T D_0	1 [m] $\alpha_L / 10$ [m] 1.10^{-9} [m ² /s]
Bilans hydriques	Gradient hydraulique	I	2,4%
	Saturation	S_e	Hydrostatique en ZNS avec saturation de 0 (ou 10% sur 50cm en surface)
	Conditions limites sur les bords du domaine	« Gradient hydraulique »	Hydraulique (légèrement) en drainage en aval et sur les bords latéraux
	Apports d'eau en surface	Charge	Infiltromètre et Débordement sur une surface de rayon 1m autour de l'infiltromètre (compris). Pas de prise en compte de la pluviométrie

5.4 Influence des paramètres d'entrée - Analyse de sensibilité

La sensibilité des paramètres hydrodynamiques et hydrodispersifs en ZNS n'est pas encore bien connue. Les non linéarités de l'équation de Richards et les degrés de corrélation entre paramètres rendent a priori difficilement quantifiable la sensibilité du modèle. De plus, l'influence des paramètres sur les restitutions du modèle est à mettre en regard des conditions de l'essai (mise en œuvre, positionnement des restitutions, régime hydraulique, état initial / conditions limites).

Le tableau suivant synthétise les différents tests de sensibilité effectués, tests ayant trait à la sensibilité des paramètres de sols mais aussi aux conditions de mise en œuvre de l'essai, ainsi que les effets observés sur les restitutions des niveaux piézométriques et des courbes de percée du traceur. Les principaux calculs sont présentés en annexe 10.

Il ne s'agit pas d'une étude de sensibilité au sens propre (pas de tirage Monte-Carlo, ni de définition de corrélations entre paramètres), l'objectif est seulement d'essayer de donner des tendances de réponses, ceci dans le domaine d'incertitudes des paramètres du modèle (i.e. utilisation de valeurs réalistes en regard des essais de caractérisation, de la mise en œuvre).

Les tests de sensibilité du modèle montrent :

- peu de sensibilités des restitutions du modèle de manière générale, notamment en raison du régime hydraulique induit par la mise en charge continue,
- le modèle apparaît principalement piloté par la valeur de K_s en ZNS (dans ces conditions), laquelle dimensionne les vitesses d'infiltration, les volumes d'eau injectés ainsi que la concentration du traceur en entrée. La mise en œuvre d'un modèle double-couche permettrait de considérer l'effet de la perméabilité en surface seule sur les restitutions,
- les paramètres sensibles de second ordre sont les paramètres caractéristiques du sol (teneur en eau à saturation, frange capillaire) et surtout du traceur (dispersivité),
- la diminution de la charge dans l'infiltromètre ($H_{INF}=5\text{cm}$ au lieu de $H_{INF}=20\text{cm}$) n'entraîne pas de modification significatives des BTCs (passage d'une vitesse d'infiltration de 0.22m/h à 0.18m/h) Les effets n'apparaissent notables que lorsque le temps d'infiltration est inférieur au temps de traversée de la ZNS (25h ici).
- La mise en pompage en Sc41 affecte principalement la forme de la traînée de la BTCs en cet ouvrage.
- les variations de charge dans l'infiltromètre affectent la traînée des BTCs.

Ces tendances ne sont toutefois valables que dans le contexte de l'essai et notamment du régime hydraulique principalement gravitaire. Il est souhaitable d'étudier dans la suite de ce travail la sensibilité du modèle aux paramètres caractéristiques du sol mais aussi au contexte hydrique (conditions aux limites, pluviométrie). Ceci nécessite toutefois la réalisation d'un grand nombre de calculs et donc la mise en place d'une vraie méthodologie pour l'estimation des incertitudes en non saturé.



Tableau 8 : Tableau synthétique des tests de sensibilité des restitutions du modèle (PZ et BTCs) aux paramètres du modèle (Paramètre sensible : ● ; peu sensible : ○ ; nc. non connu / finalisé)

Module du modèle	Paramètres	Plage de valeurs	Influence sur les restitutions (PZ & BTCs)	Commentaires	Investigations supplémentaires (si nécessaire)
Modèle hydro dynamique	Ks ZNS	$2 \cdot 10^{-5}$ à $6 \cdot 10^{-5}$ [m/s]	Hydro : ●● Transport : ●●	Effets sur le débit d'infiltration et sur la concentration en traceur dans l'infiltromètre Peu d'effet sur les niveaux dynamiques Effets sur les BTCs : Temps arrivée accéléré et légère modification de la valeur du pic	
	Ks Nappe	$2 \cdot 10^{-5}$ à $6 \cdot 10^{-5}$ [m/s]	Hydro : ● Transport : ○	Forte variation du niveau piézométrique en Sc41. Peu d'effets sur les BTCs dans les gammes testées	
	Lois de sols	Burdine : 2.2 – 3.5 Mualem : 1.67 – 2.5	Hydro : nc. Transport : nc.	<u>Convergence lente du modèle</u> <u>Calculs non finalisés</u>	Etude de sensibilité en associant d'autres scénarios / régimes hydrauliques
	Teneur en eau à saturation	15 - 40% [-]	Hydro : ● Transport : +++	Effets sur les BTCs : Temps arrivée accéléré pour humidité plus faible (conservation des flux) Légère modification de la valeur du pic	Affiner les mesures d'humidité (monitoring via TDR). Si nécessaire, estimation la porosité efficace (essais colonne, lysimètre)
	Frange capillaire	Hg = 5 à 50 [cm]	Hydro : ● Transport : ●●●	Effets sur les BTCs : Temps arrivée accéléré. <u>Diminution du pic pour augmentation de la frange capillaire.</u> Ecoulements horizontaux en surface de nappe (positionnement des crépines)	Mise en place de packers dans les ouvrages pour isoler la contribution en surface de nappe
	Flux ZNS de débordement	250 à 1000 [L/h]	Hydro : ●● Transport : ○	Forte influence sur les fluctuations des niveaux piézométriques Peu d'effet sur les BTCs car appliqué après/pendant le passage du traceur (diminue toutefois la traînée)	-
	Conditions limites sur les bords	Flux nul / Hydrostatique / Drainage	Hydro : ●● Transport : ○	Influence sur les fluctuations des niveaux piézométriques Peu d'effets sur les BTCs à l'échelle de temps du transfert	Affiner le bilan hydrique avec positionnement de sondes (TDR ; Succion) à proximité de la zone d'essai et monitoring avant/pendant
Modèle de transfert	Dispersion	$\alpha_L = 0.1$ à 1 [m] $\alpha_T = \alpha_L / 10$	Transport : ●●●	Effets sur les BTCs : Temps arrivée modifié et forte influence sur la valeur du pic	Comment réduire l'incertitude associée à ce paramètre ?
Extrapolation du modèle	Niveau de charge dans l'infiltromètre (sans débordement)	$H_{INF} = 5$ à 20 [cm]	Hydro : ● Transport : ●	$H_{INF}=5$ cm => $V_{INF} = 0.15$ m/h contre 0.2 m/h pour $H_{INF}=20$ cm Peu d'effet sur les PZ. Peu d'effets sur les BTCs.	A affiner certainement en fonction de la durée d'imposition de la charge
	Durée d'imposition de la charge	$T_{INF}=5$ à 200 [h]	Hydro : ●●● Transport : ●●●	Effets sur les PZ et BTCs lorsque le temps d'imposition de la charge est très inférieur au temps de transfert.	Affiner le scénario de déversement et les conditions aux limites associées
	Pompage en Sc41	Avec / Sans	Hydro : ●● Transport : ●●	Effet sur le niveau dynamique en Sc41. Effet de dilution sur les BTCs. Mise en pompage tend à diminuer la traînée des BTCs en Sc41	Effet localisé du pompage

5.5 Critiques et Retours d'expériences

La Zone Non Saturée est souvent négligée dans le calcul d'impact lors de rejets incidentels. L'évaluation porte souvent sur l'impact dans la nappe et néglige le rôle « protecteur / retardateur / émetteur » de la ZNS et souvent, lorsque la ZNS est prise en compte, le transfert est souvent modélisé par un écoulement 1D vertical négligeant par la même son rôle retardateur et atténuateur, entraînant conservatismes ou au contraire, sous-estimation d'un impact futur.

En regard de la méthodologie Caphéine (cf. « Modélisation des écoulements et du transport des éléments traces en zone non saturée », Boissard et al, 2012), des modélisations de niveau 1 (interprétation analytique 1D) et de niveau 2 (modélisation mécanistique avec géochimie simplifiée) ont été mises en œuvre ici.

5.5.1 Construction et validation du modèle numérique

L'interprétation de niveau 1 présentée ici fait l'hypothèse d'un transfert 1D, en assumant un régime principalement gravitaire. Cette hypothèse apparaît recevable ici en regard des conditions d'essai et les valeurs estimées par cette interprétation peuvent servir à alimenter un modèle opérationnel, appliqué à des conditions similaires (écoulement sous charge imposée).

La modélisation mécanistique présente l'intérêt de pouvoir simuler le comportement global de la ZNS (et de la nappe). Toutefois, la modélisation en zone non saturée reste relativement exigeante en termes de données nécessaires pour sa mise en œuvre. La réflexion dans la démarche de modélisation comprend la conceptualisation du modèle (*Quels sont les mécanismes d'intérêts ? Dimensionnalité du problème ?*), le mode d'acquisition des paramètres (*Quels paramètres, pour quels besoins et comment les acquérir ?*) ainsi que la réalisation même de l'étude numérique (*Quels critères de validation du modèle ? Quelles interprétations / extrapolations peut-on en réaliser ?*).

Le modèle ici construit permet de rendre compte de façon acceptable des observations, des niveaux dynamiques de la nappe aux courbes de percée du traceur. L'ajustement du modèle numérique sur les réponses dynamiques des piézomètres n'est pas toujours suffisant pour valider le modèle numérique (non unicité des solutions et réponses dynamiques souvent lissées). La courbe de percée offre un paramètre de calage pertinent, donnant une information quantitative du transfert du traceur (temps de transfert, atténuation).

Dans les conditions de l'essai grand infiltromètre, il n'apparaît pas possible de remonter avec certitude aux paramètres des lois $h(\theta)$ et $k(\theta)$. En effet, le modèle apparaît principalement contrôlé par la valeur de K_s en ZNS, les autres paramètres influents sont de second ordre.



L'étude de sensibilité réalisée ici donne quelques tendances du modèle mais ne sont valables que dans les conditions de mise en œuvre de l'essai. Une étude de sensibilité prenant de plus larges conditions de mise en œuvre serait pertinente. Toutefois, en raison des corrélations entre paramètres, effets de non linéarité et des temps de calculs très importants (et dépendants des paramètres), une méthodologie pertinente est nécessaire.

5.5.1 Valorisation et extrapolation du modèle

Une des principales incertitudes ici reste le comportement du système dans des conditions différentes de celles testées expérimentalement. En effet, le système modélisé est représentatif des conditions d'un déversement de volumes importants d'eaux. On ne dispose pas de jeux de données pouvant valider le comportement du système dans d'autres conditions (état de saturation, volumes déversés plus faibles). Idéalement, disposer de deux jeux de données permettrait d'améliorer la confiance dans le modèle construit.

Il est alors nécessaire de fiabiliser l'étape de caractérisation amont (par les méthodes BEST ou autres) afin de s'assurer de l'adéquation des lois $h(\theta)$ et $k(\theta)$ pour le système considéré.

6 Conclusion

Dans le contexte d'un site industriel, les enjeux environnementaux liés à l'impact de tout type de pollution (métaux lourds, composés organiques, polluants miscibles/non miscibles) sont très forts. Le devenir d'une contamination dans un sol nécessite alors une bonne connaissance : (i) des processus de transfert des polluants dans les eaux souterraines (la mobilité des polluants étant fortement dépendante des caractéristiques physico-chimiques et hydrodynamique) et au préalable, (ii) une bonne compréhension de l'hydrodynamique des sols traversés et, surtout, (iii) la détermination des paramètres adéquats.

Le projet de recherche CAPHEINE a pour objectif principal d'aboutir à la mise à disposition des décideurs d'une méthodologie permettant de préciser les contextes (fonction de la typologie des sites, des polluants, de la géologie et de l'hydrologie) dans lesquels il est utile de prendre en compte, dans l'évaluation d'impacts/risques, la zone non-saturée du site, zone centrale dans les échanges surface/nappe. Le projet s'attache à répondre aux questions suivantes : (i) Quelles méthodes de mesures peut-on mettre en œuvre dans le cas particuliers de remblais et d'alluvions ? (ii) Quelle validité accorder aux résultats obtenus ?

Ce rapport présente les méthodes, données expérimentales et interprétations des investigations menées sur le site N°4 dans le contexte du projet de recherche CAPHEINE. Les essais menés ont visé à améliorer la compréhension du comportement hydraulique (perméabilité, rétention) à l'échelle locale (définition de parcelles sur le site), mettant en œuvre des méthodes de caractérisation hydrique à différentes échelles (- : FPTs ; dm³ : BEST, forage ; m³ : Porchet ; ZNS : « grand infiltromètre ») à l'utilisation de ces informations dans un modèle numérique.

6.1 Investigations menées sur le site N°4 et résultats / interprétations

Sur le site N°4, les travaux sur deux parcelles d'étude (« TN : Terrain Naturel et « RD » : Remblai Décompacté ») ont consistés en :

- la mise en œuvre d'essais d'infiltrométrie in-situ (essais BEST, micro-forage/mini-Porchet, Porchet) pour l'acquisition des paramètres hydrodynamiques (perméabilité) et structuraux (lois de rétention). hétérogénéité verticale et horizontale, échelle de mesure, gamme de paramètres acquis...
- la mesure en laboratoire des courbes de rétentions $h(\theta)$ et $k(\theta)$ (acquisition directe des couples humidité-succion, procédure BEST) sur matériaux prélevés sur site puis recompressés,

- la mesure en laboratoire de paramètres pétrophysiques sur échantillons non remaniés (carottage sous gaine),
- l'interprétation/valorisation des courbes granulométriques par FPTs pour l'estimation des paramètres hydrodynamiques (K_{sat} , $h(\theta)/k(\theta)$),
- l'estimation des temps de transferts et des propriétés de la ZNS (retard, atténuation) par la réalisation d'un essai d'infiltration et traçage de type « grand infiltromètre » selon la méthodologie élaborée dans le cadre du projet ANR TRANSAT (REF),

Les données acquises par les différentes méthodes et en particulier celles issues de l'essai « grand infiltromètre » ont permis de construire et caler un modèle numérique à l'échelle locale (m3). Ce modèle permet de reproduire de façon acceptable le comportement dynamique de la ZNS et la nappe pour des échelles de temps et d'espace limitées toutefois. Les estimations du modèle ont pu être extrapolées à différents scénarii de rejets pour l'estimation des propriétés de la ZNS (retard, atténuation) à l'évaluation de différentes conditions de mise en œuvre de l'essai « grand infiltromètre ».

6.2 Enseignements opérationnels / méthodologiques

Les retours d'expérience des différentes investigations sur le site N°4 (essais terrain, mise à profit des BDD, évaluation de procédure intégratrice, méthodes numériques) sont capitalisés au travers des Guides méthodologiques Caphéine (Guérin et al., Bataillard et al., Boissard et al., 2012).

Les méthodes développées ici investissent différentes échelles de représentativité et si elles permettent de caractériser finement l'hétérogénéité locale, elles ne permettent pas toujours de donner une information intégratrice des processus hydrodynamiques et hydrodispersifs à l'échelle de la ZNS.

Les principaux résultats opérationnels / méthodologiques sont rappelés ci-dessous :

- Acquisition de K_{sat} et des lois $h(\theta) / k(\theta)$

Les comparaisons des méthodes d'acquisition des paramètres hydrodynamique par infiltrométrie terrain se sont avérées concluantes pour l'ensemble des méthodes sur des sols industriels de type remblais, plutôt sableux à matrice limoneuse avec potentiellement de fortes proportions de graviers.

Des recommandations quant à la mise en œuvre de chaque méthode (notamment BEST) ont été émises, en regard de leur domaine de validité mais aussi en regard de la méthodologie développée dans Caphéine.
- Estimation des temps de transferts à l'échelle de la ZNS

Le document présente également la réalisation d'un essai d'infiltration et de traçage en ZNS via un grand infiltromètre, permettant de se placer directement à l'échelle de l'incident de pollution, de remonter aux vitesses d'écoulement d'eau à l'échelle de la ZNS et d'estimer l'effet retardateur/atténuateur de la ZNS dans les conditions d'un déversement important.

Cet essai, relativement complexe à mettre en place et à interpréter, a un coût très élevé. Il est à réserver à des zones particulièrement vulnérables. Les résultats de l'essai restent toutefois adhérents au scénario de rejet et aux conditions de mise en œuvre et ne peuvent être extrapolés en tant que tels.





7 Références

[1] Angulo-Jaramillo R., J.P. Vandervaere, S. Roulier, J.L. Thony, J.P. Gaudet, M. Vauclin. 2000. Field measurement of soil surface hydraulic properties by disc and ring infiltrometers A review and recent developments. *Soil & Tillage Research* 55:1–29.

[2] Bataillard P., Michel J., Beaucaire C. avec la collaboration de Deschamps T. et Krimissa M. (2012) - Caphéine, Guide « Caractérisation de la mobilité des ETM dans la zone non saturée du sol », CaPhéInE : CAractérisation des PHENomènes de transfert en zone INsaturée des Eléments traces.

[3] Boissard G. ,Decung F., Michel J. avec la collaboration de Béranger S., Croizet N., Parmentier M. Lassin A. Tiffreau C. , Ingmar Pointeau I. et Xavier Coulet X. (2012) - Guide « Modélisation des écoulements et du transport des éléments traces en zone non saturée », CaPhéInE : CAractérisation des PHENomènes de transfert en zone INsaturée des Eléments traces.

[4] Brooks, R. H. and Corey, C. T. 1964. Hydraulic Properties of Porous Media. *Hydrol. Paper* 3. Colorado State University, Fort Collins.

[5] Guérin V. et al. (2012) - Guide « Chapeau », CaPhéInE : CAractérisation des PHENomènes de transfert en zone INsaturée des Eléments traces.

[6] Guérin V., F. Decung et B. Chevrier (2012) - Guide «Caractérisation hydrique de la zone non saturée », CaPhéInE : CAractérisation des PHENomènes de transfert en zone INsaturée des Eléments traces.

[7] Kaskassian S., J.P Gaudet, J. CHASTANET, F. DECUNG, R. ANGULO-JARAMILLO, S. SZENKNECT, J.M CÔME, D. GETTO, V. BARTHES, M. KRIMISSA, Projet ANRPRECODD, TRANSAT 2005-2009, *Evaluation des temps de Transfert, dans la zone Non Saturée des sols, de contaminants dissous ou particuliers*, Guide technique, 2009, 106 pages

[8] Haverkamp R., Zammit C., Bouraoui F., Rajkai K., Arrue J.L., Heckmann N., 1998. GRIZZLY, Grenoble Catalogue of Soils: Survey of soil field data and description of particle-size, soil water retention and hydraulic conductivity functions. Laboratoire d'Etude des Transferts en Hydrologie et Environnement (LTHE), Grenoble, France.

[9] Lassabatère L., R. Angulo-Jaramillo, J. M. Soria Ugalde, R. Cuenca, I. Braud, and R. Haverkamp. 2006. Beerkan Estimation of Soil Transfer Parameters through Infiltration Experiments—BEST. Published online February 27, 2006.



[10] Picot G., Guérin V., Béranger S., Abriak N.E., Laboudigue A., Van Dorpe F. (2010) -Data acquisition and consequences on flows modelling: case of a multilayer unsaturated porous soil., in ConSoil 2010 - 11th International UFZ- Deltares/TNO Conference on Management of Soil - Groundwater & Sediment - Salzburg - Austria 22-24/09/2010.

[11] Richer de Forges A., Feller C., Jamagne M. et D. Arrouays (2008) - Perdus dans le triangle des textures, étude et Gestion des Sols, Volume 15, 2, p. 97 à 111.

[12] Schaap M. G., F. J. Leij and M.Th van Genuchten. 2001. ROSETTA: a computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. Journal of Hydrology, 251,163-176

[13] Schaap M.G., and F.J. Leij, 1998. Database related accuracy and uncertainty of pedotransfer functions, Soil Science, 163:765-779.

[14] Van Genuchten M.T. 1980. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 44:892:898.

[15] Wösten J.H.M., Lilly A., Nemes A., Le Bas C., 1998. Using existing soil data to derive hydraulic parameters for simulation models in environmental studies and in land use planning. Final Report on the European Union Funded project, 1998. (The Netherlands), DLO Winand Staring Centre. Report 156. 106pp. ; 15 Figs. ; 11 Tables ; 32 Refs.



8 Annexe 1 : Caractérisation hydrique : Acquisition des paramètres hydrodynamiques (comparaisons de méthodes) et Estimation des temps de transferts (mise en œuvre du grand infiltromètre)

8.1 Classification des échantillons (USDA) pour l'estimation des paramètres hydrodynamiques via ROSETTA (BDD UNSODA)

8.1.1 Méthodologie

Pour les éléments en dessous de 80 µm une analyse microgranulométrique a été réalisée pour la détermination des fractions entre 80 et 0,5 µm. Pour cette analyse, une prise de l'échantillon brut sec est effectuée. Ce prélèvement est mis en suspension puis lavé sur un tamis de 80µm (coupure granulométrique par voie humide). La fraction supérieure à 80 µm est séchée et pesée, la fraction inférieure à 80 µm est analysée par sédimentation avec un appareil SEDIGRAPH 5100.

Tableau 9 : Coupures granulométriques considérées

Voie sèche (mm)	63	31,5	20	6	3,15	2	1.25	0,63	0,315	0,16	0,08
Voie humide (µm)	63	50	40	31,5	25	20	16	12,5	10	8	6,5

Les résultats de l'analyse sont reportés sur un diagramme semi-logarithmique où l'on porte les diamètres des particules en abscisse (graduation log) et les pourcentages en poids des tamisats cumulés en ordonnée. Sur la courbe on appellera D_x le diamètre pour lequel le tamisat cumulé est de x %. A l'aide de cette courbe on détermine ainsi pour chaque diamètre D_x la quantité de particules inférieures en dimension à D_x .

A partir de cette courbe, on peut déterminer les caractéristiques du sol à l'aide de deux coefficients :

- le coefficient d'uniformité C_u (coefficient de Hazen) qui caractérise l'étalement de la granulométrie :

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

- le coefficient de courbure C_c :

Caphéine



$$C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{60} \times D_{10}}$$

Suivant la forme granulométrique et la valeur des 2 coefficients, on dira que la granulométrie est étalée ou serrée, continue ou discontinue, bien graduée ou mal graduée.

A partir de la composition granulométrique des grains dans les différentes classes de particules (en général : triangle textural basé sur le % d'argile, de limon, et de sable), on peut définir la classe texturale à laquelle appartient le sol considéré. De nombreux triangles existent (Richer de Forges *et al.*, 2008), la méthode BEST ou même l'outil ROSETTA (FPTs) considèrent celui de l'USDA (Figure 39) qui discrimine les sols en 12 classes.

0 < Argile < 2µm < Limon < 50µm < Sable < 2mm

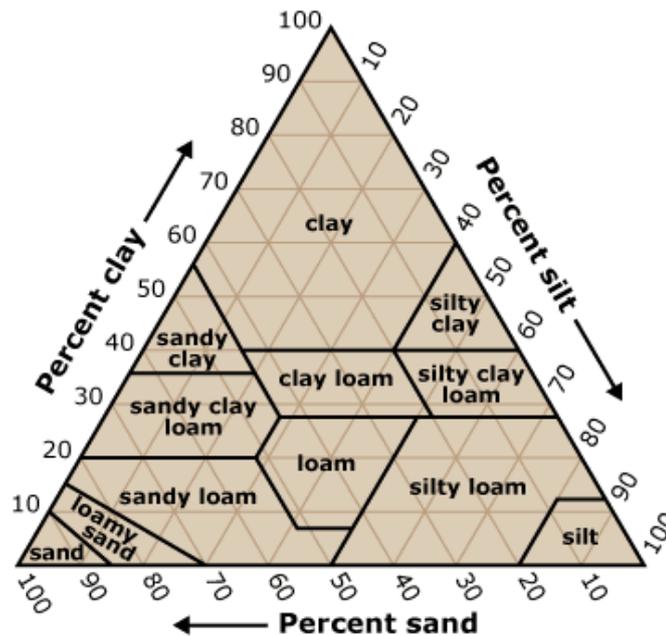


Figure 39 : Triangle textural de l'USDA

8.1.2 Résultats / Classification

Les tableaux suivants synthétisent les caractéristiques des sols prélevés sur chaque zone. Les analyses présentent une fraction importante de graviers/cailloux (38% > 2mm) sur l'échantillon issu de



la fosse P1 (entre 10 et 60 cm de profondeur). Les autres échantillons présentent une fraction de graviers/cailloux de l'ordre de 10%.

Tableau 10 : Caractéristiques des sols de la zone TN d'après leurs courbes granulométriques

sol	% argile	% silt	% sable	Cu	Cc	Granulométrie
Terrain naturel TN entre 10 et 60 cm de profondeur (Fosse P1)	5,1 [‡] 8,3*	25,0 [‡] 40,5*	31,7 [‡] 51,3*	284	0,8	Très étalée
Couche limoneuse (Fosse P3)	10,3 [‡] 11,3*	37,8 [‡] 41,5*	43,0 [‡] 47,2*	76,3	0,9	Étalée

[‡] Pourcentage réel dans la tranche granulométrique de référence

* Valeur corrigée et utilisée dans le diagramme triangulaire pour amener la somme des trois composants à 100% après exclusion des grains > 2mm

Tableau 11 : Caractéristiques des sols de la zone RD d'après la courbe granulométrique

sol	% argile	% silt	% sable	Cu	Cc	Granulométrie
Couche sableuse (Fosse P5)	6,3 [‡] 6,9*	22,8 [‡] 24,9*	62,5 [‡] 68,2*	43,2	4,7	Étalée

[‡] Pourcentage réel dans la tranche granulométrique de référence

* Valeur corrigée et utilisée dans le diagramme triangulaire pour amener la somme des trois composants à 100% après exclusion des grains > 2mm

La figure suivante présente l'ensemble des échantillons positionnés sur le triangle de texture USDA :



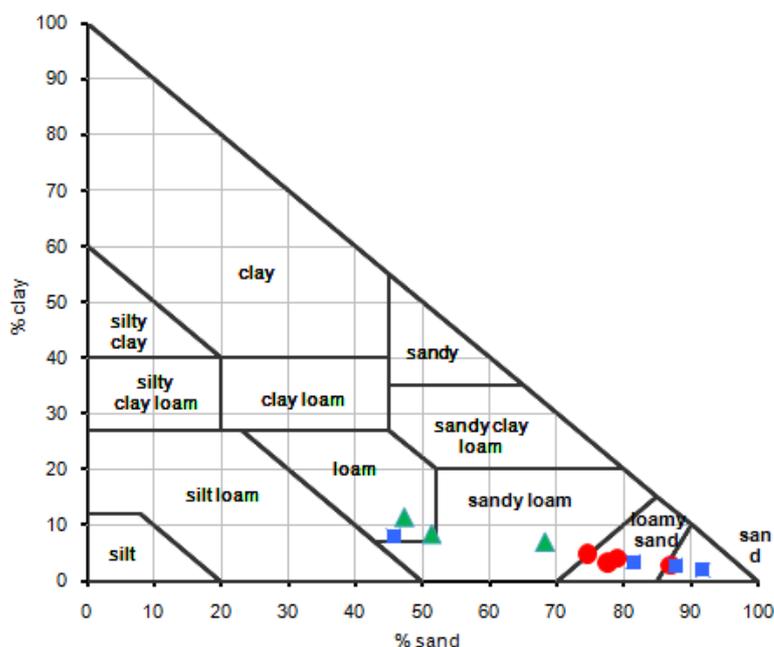


Figure 40 : Classification des échantillons de sols sur les parcelles NR et RD [carrés :NR, cercles :RD, triangles : TN]

Les prélèvements de sols sur les parcelles RD, NR et TN ont été classés selon leur structure, les échantillons analysés sont respectivement de type sableux/sablo-limoneux sur RD et NR, limoneux/limoneux-sableux sur TN.

A l'exception d'un échantillon en surface prélevé sur la zone NR, les échantillons montrent une bonne homogénéité des propriétés granulométriques à l'échelle des parcelles.



8.2 Correspondance entre mesures d'humidité pondérale et mesures d'humidité volumique

8.2.1 Mesure d'humidité des matériaux prélevés sur le terrain

Le mélange galets/sol argileux, la zone de sable fin, de sables plus grossiers et l'argile compacte ont été prélevés pour une mesure de l'humidité et la réalisation d'une granulométrie.

L'humidité pondérale des matériaux en place au niveau de la fosse P3 (Terrain naturel TN) est répertoriée dans le tableau suivant.

Tableau 12 : Humidité pondérale des sols en place (Terrain naturel TN)

Type de sol	Humidité pondérale (%)
Zone de surface à galets et matrice argilo-sableuse : en surface	19,8
Zone de surface à galets et matrice argilo-sableuse : à 30 cm de profondeur	11,3
Zone de surface à galets et matrice argilo-sableuse : à 45 cm de profondeur	8,5
Zone sableuse à sables fins	7,8
Zone sableuse à sables plus grossiers	3,4
Zone limoneuse	15,0

8.2.2 Correspondance entre mesures d'humidité pondérale et mesures d'humidité volumique

Des prélèvements de sols ont été réalisés immédiatement après la fin des essais BEST réalisés en laboratoire sur tout le profil de matériau. Des mesures d'humidité pondérale classique de laboratoire par pesée avant et après séchage ont été réalisées. En parallèle des mesures de l'humidité volumique sur le profil de sol à l'aide de la sonde TDR utilisée pour la réalisation des courbes humidité-succion ont été faites (Figure 41).

Les valeurs d'humidité pondérale sont transformées en humidité volumique en multipliant les valeurs obtenues par la masse volumique apparente sèche (Tableau 13).

Tableau 13 : Masses volumiques apparentes des essais laboratoire zone TN

Essai	Masse volumique apparente humide (g/cm ³)	Masse volumique apparente sèche (g/cm ³)
3 % humidité pondérale compaction 3kg	1,43	1,38
10 % humidité pondérale compaction 3kg	1,92	1,72

Les valeurs de masses volumiques apparentes sèches et humides mesurées sont bien cohérentes entre elles. Ainsi, les valeurs théoriques de la masse volumique apparente humide, calculées d'après la formule la reliant à la masse volumique apparente sèche (respectivement 1,42 et 1,89 g/cm³ pour une humidité pondérale de 3 et 10 %), sont très proches de celles mesurées.

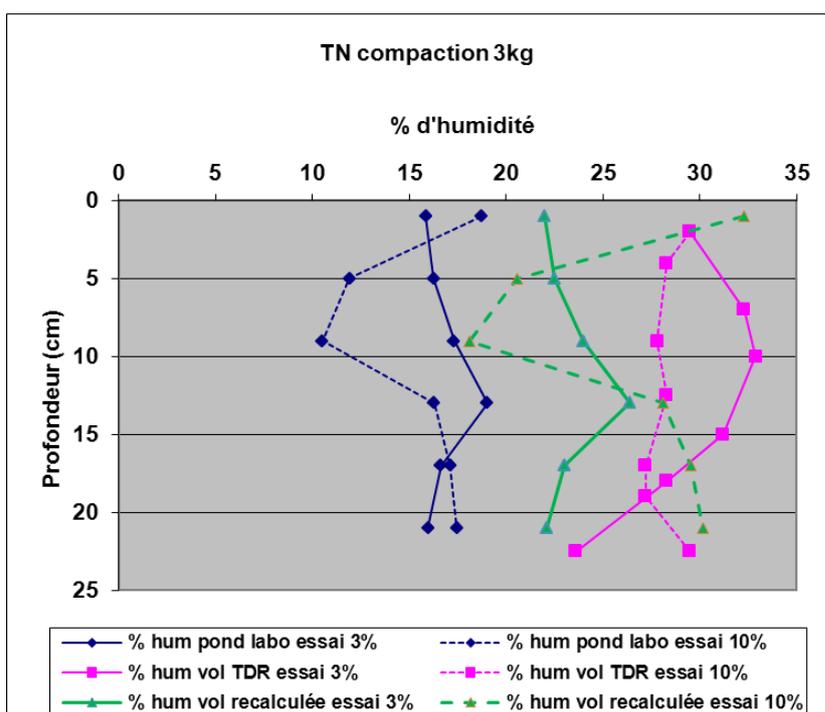


Figure 41 : Evolution humidité pondérale (mesurée au laboratoire) humidité volumique (mesure sonde TDR) avec la profondeur : Terrain naturel TN



Pour l'essai BEST à 3% d'humidité, un décalage de 6,7% en moyenne est observé, la sonde TDR surestimant quasi systématiquement la valeur d'humidité volumique.

Pour l'essai BEST à 10% d'humidité, les valeurs sont très proches (moins de 2 % d'erreur, la sonde TDR sous-estimant les valeurs réelles) sauf pour 2 points (erreur de 9%, la sonde surestimant les valeurs). Pour cet essai les valeurs d'humidité pondérale semblent faibles au regard des autres en fin d'infiltration. On explique en effet assez mal pourquoi les sols entre 5 et 10 cm de profondeur seraient moins humides que les sols sus et sous-jacents.

8.2.3 Mesure d'humidité des matériaux prélevés sur le terrain

Le mélange galets / sable a été prélevé en fond de fosse P5 (zone Tranche 4-5 : Remblai décompacté RD) sont répertoriés dans le Tableau 14.

Tableau 14 : Humidité pondérale des sols en place zone Tranche 4-5 : Remblai décompacté RD

Type de sol	Humidité pondérale (%)
Galets et matrice sableuse : entre 30 et 70 cm de profondeur	6,3

8.2.4 Correspondance entre mesures d'humidité pondérale et mesures d'humidité volumique

Des prélèvements de sols ont été réalisés en fin d'essais BEST sur tout le profil de matériau. Des mesures d'humidité classique de laboratoire par pesée avant et après séchage ont été réalisées. En parallèle, des mesures sur le profil de sol à l'aide de la sonde TDR utilisée pour la réalisation des courbes humidité-succion ont été faites (Figure 42).

Les valeurs d'humidité pondérale sont transformées en humidité volumique en multipliant les valeurs obtenues par la masse volumique apparente sèche (Tableau 15).

Tableau 15 : Masses volumiques apparentes des essais en laboratoire zone TN

Essai	Masse volumique apparente humide (g/cm ³)	Masse volumique apparente sèche (g/cm ³)
3 % humidité pondérale compaction 1kg	1,47	1,42
3 % humidité pondérale compaction 3kg	1,54	1,50
10 % humidité pondérale compaction 1kg	1,49	1,44
10 % humidité pondérale compaction 3kg	1,58	1,43

Globalement pour ce matériau, la sonde TDR sous-estime la teneur en eau volumique de l'ordre de 6% quand l'humidité pondérale est autour de 20 %. La sonde TDR sous-estime la teneur en eau volumique de l'ordre de 2 % quand l'humidité pondérale est entre 10 et 20 %. Par contre la sonde TDR surestime la teneur en eau volumique aux faibles humidités pondérales (<10%).

Les valeurs de masses volumiques apparentes sèches et humides mesurées sont bien cohérentes entre elles. Ainsi, les valeurs théoriques de la masse volumique apparente humide, calculées d'après la formule la reliant à la masse volumique apparente sèche (respectivement 1,46 ; 1,55 ; 1,58 et 1,57 g/cm³ pour une humidité pondérale de 3% et une compaction de 1 kg, pour une humidité pondérale de 3% et une compaction de 3 kg, pour une humidité pondérale de 10% et une compaction de 1 kg, pour une humidité pondérale de 10% et une compaction de 3 kg), sont très proches de celles mesurées.

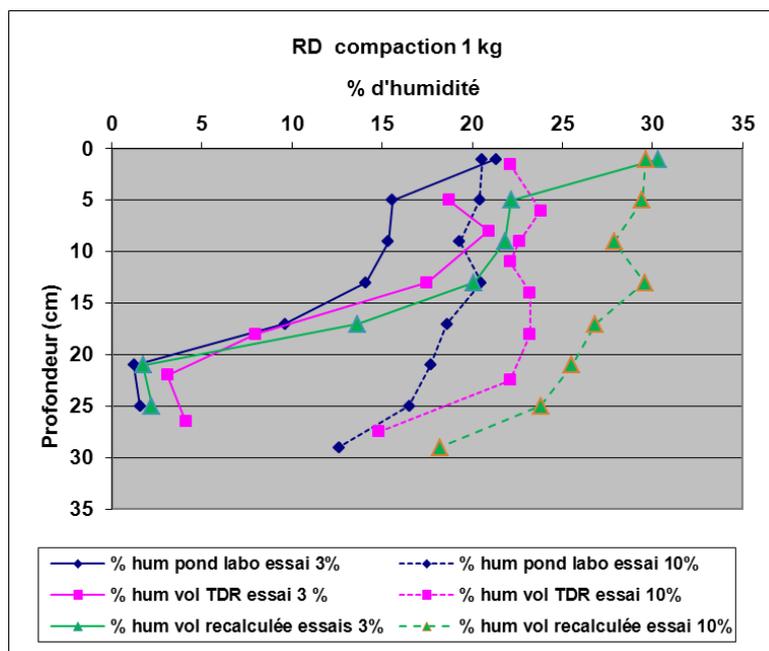
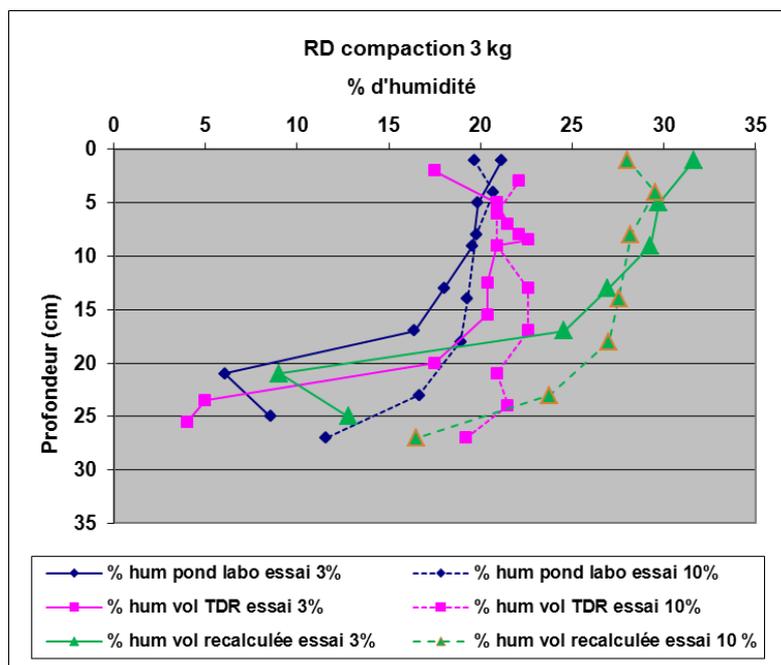


Figure 42 : Evolution humidité pondérale (mesurée au laboratoire) humidité volumique (mesure sonde TDR) avec la profondeur : Tranche 4-5 : Remblai décompacté RD (haut : compaction 3 kg ; bas : compaction 1 kg)



9 Annexe 2 : Détermination des temps de transfert par essai d'infiltration et de traçage avec grand infiltromètre

9.1 Distribution des temps de séjour (DTS) et fonctions de transfert

Compte tenu de la méconnaissance de la fonction de transfert de la nappe seule (absence de traçage de nappe), les fonctions de transfert sont déterminées selon 2 hypothèses :

- un chemin de parcours pour le traceur de l'ordre de 3,75 m, ce qui correspond à l'épaisseur de la ZNS sous l'infiltromètre en conditions naturelles (absence de pompage et d'infiltration). Cette hypothèse repose sur une fonction de transfert en nappe peu significative,
- un chemin de parcours pour le traceur de l'ordre de 5,65 m, ce qui correspond à l'épaisseur de la ZNS sous l'infiltromètre avec pompage en Sc41 à laquelle on ajoute la distance entre le bord de l'infiltromètre et le centre du Sc41. Cette hypothèse repose sur une fonction de transfert en nappe non négligeable.

Pour apprécier l'importance du transfert dans la nappe seule sur une distance de 2,10 m (distance centre à centre entre l'infiltromètre et Sc41), on évalue les temps de transfert à l'aide des données de l'essai de pompage en nappe ($K_{\text{moyen}} = 3.10^{-5}$ m/s, $S_{\text{moyen}} \# 20\%$) selon 2 scenarios :

- 156 h en considérant un gradient moyen de la nappe sans dôme d'infiltration de l'ordre de 2,5% (gradient moyen stabilisé entre PzN04 et Sc40 avec ou sans pompage dans Sc41),
- 1,9 h en considérant un gradient moyen de la nappe surmontée du dôme d'infiltration (donc en supposant une continuité des conditions saturées sous l'infiltromètre) de l'ordre de 2 (ou 200%, gradient moyen avec ou sans pompage dans Sc41 et avec ou sans charge dans l'infiltromètre).

Les fonctions de transfert déterminées selon ces différents scenarios sont donc des fonctions globales « ZNS + nappe » et leurs paramètres de calage sur une (ou plusieurs) fonction(s) Piston-Dispersion monodimensionnelle(s) sont renseignés dans le Tableau 16.

Tableau 16 : Paramètres de calage des fonctions de transfert globales « ZNS+NAPPE » (type Piston-Dispersion 1D) pour l'essai d'infiltration avec traçage entre l'infiltromètre et Sc41

Fonctions de transfert	Chemin	Distance Entrée / Sortie (m)		U (m/h)	Temps de séjour (h)	D (m ² /h)	α_L (m)	Amplitude	Ecart (r ²)
Déconvolution sur les courbes de concentrations									
1 Piston-Dispersion	ZNS seule	3,75	DTS	0,176	21,3	1,40E-02	0,08	1	1,0E-01
1 Piston-Dispersion	ZNS+ nappe	5,65	DTS	0,260	21,7	3,00E-02	0,12	1	8,2E-02
2 Pistons- Dispersion	ZNS seule	3,75	DTS 1	0,184	20,4	1,40E-03	0,008	0,32	1,3E-02
			DTS 2	0,152	24,8	1,46E-02	0,10	0,68	
2 Pistons- Dispersion	ZNS+ nappe	5,65	DTS 1	0,280	20,2	4,36E-03	0,016	0,37	1,3E-02
			DTS 2	0,221	25,6	2,67E-02	0,12	0,63	
Déconvolution sur les courbes de flux massiques									
1 Piston-Dispersion	ZNS seule	3,75	DTS	0,176	21,3	1,40E-02	0,08	1	8,3E-02
1 Piston-Dispersion	ZNS+ nappe	5,65	DTS	0,260	21,7	3,00E-02	0,12	1	7,2E-02
2 Pistons- Dispersion	ZNS seule	3,75	DTS 1	0,189	19,8	2,00E-03	0,011	0,37	1,6E-02
			DTS 2	0,150	25,0	1,21E-02	0,08	0,63	
2 Pistons- Dispersion	ZNS+ nappe	5,65	DTS 1	0,283	20,0	5,50E-03	0,019	0,41	1,6E-02
			DTS 2	0,222	25,5	2,67E-02	0,12	0,59	

La déconvolution à partir des courbes de concentration ou de flux permet de déterminer globalement des valeurs proches pour chaque paramètre. Selon que l'on retient une distance de parcours de 3,75 ou de 5,65 m, les vitesses de transfert et les dispersivités sont modifiées mais les temps de séjour et les coefficients de dispersion deviennent très proches. La Figure 43 illustre bien cette similarité dans les courbes de transferts composées de 2 fonctions Piston-Dispersion.

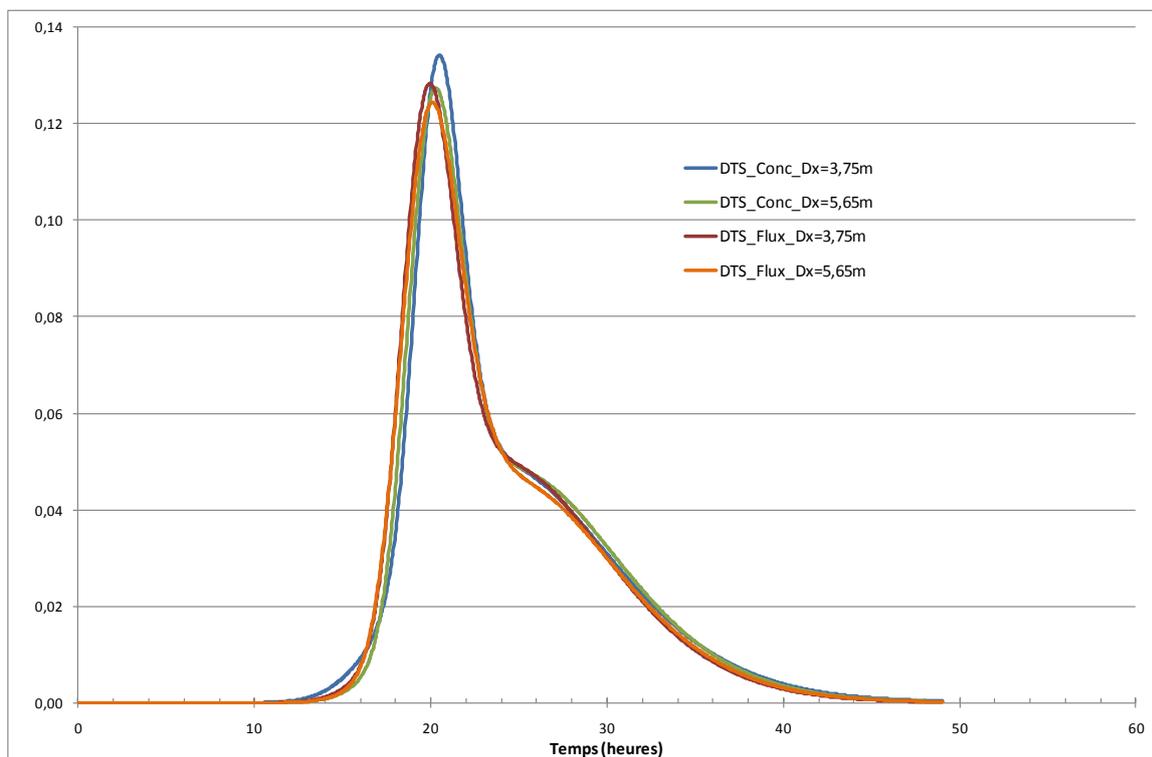


Figure 43 – Fonctions de transfert composées de 2 fonctions Piston-Dispersion entre l'infiltromètre et SC41 issues de la déconvolution des courbes de concentrations et de flux massiques pour les 2 distances de parcours retenues

On note par contre une très nette amélioration de la déconvolution dès lors que sont utilisées 2 fonctions Piston-Dispersion comme l'indique les écarts (r^2) et l'illustre la Figure 44: la courbe bleu ciel appelée « test de convolution » (résultat de la convolution de la fonction de transfert retenue avec les données d'entrée) suit beaucoup mieux la courbe de sortie mesurée dans la figure du bas (2 fonctions Piston-Dispersion) que celle du haut (1 fonction Piston-Dispersion).

Mise en application des outils développés dans Caphéine : Site 4

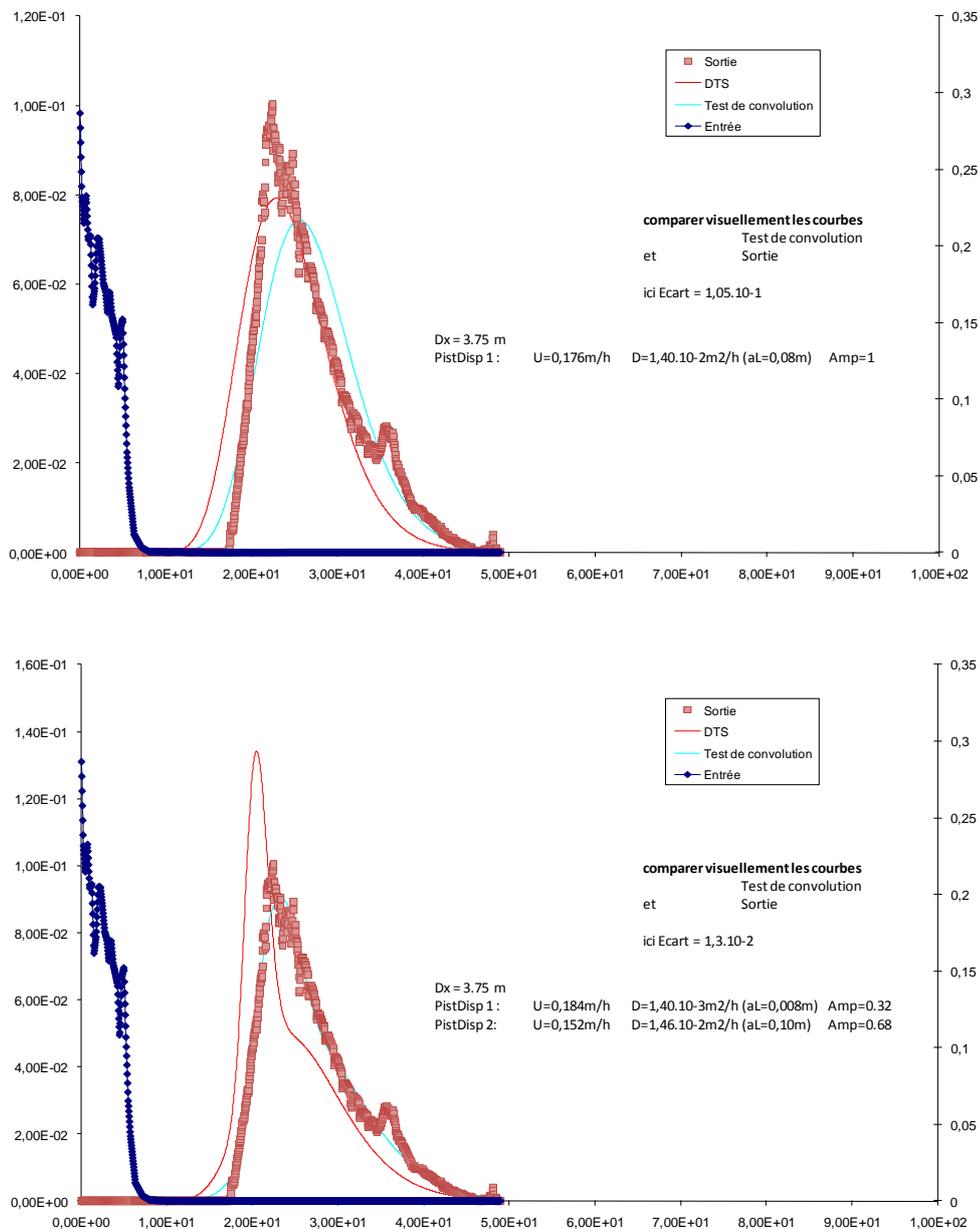


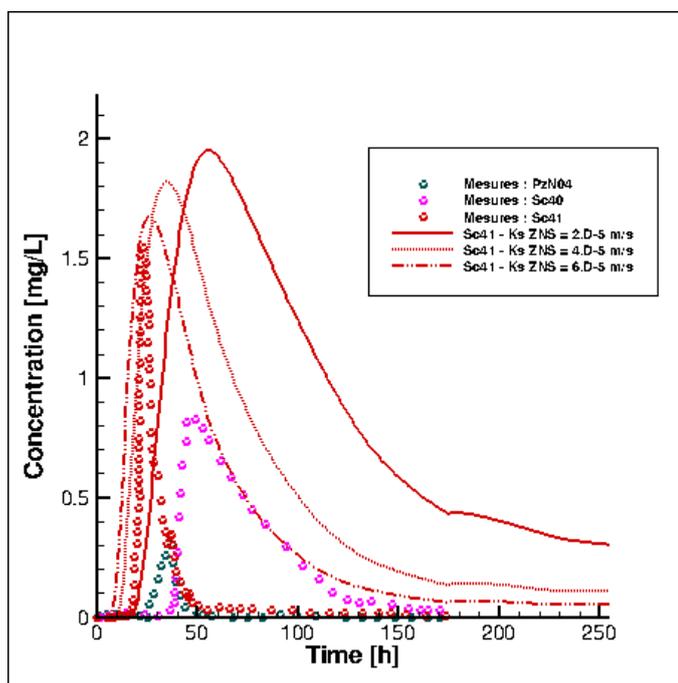
Figure 44 – Test de reconvolution des fonctions de transfert issues de la déconvolution des courbes de concentrations pour une distance de parcours de 3,75 m - calage avec 1 fonction Piston-Dispersion (figure du haut) et avec 2 fonctions Piston-Dispersion (figure du bas)



10 Annexe 3 : Influence des paramètres d'entrée - Analyse de sensibilité

10.1.1 Sensibilité des paramètres hydrodynamiques

De manière générale, les paramètres hydrodynamiques influents sont liés à la définition de la ZNS et notamment de la couche superficielle qui contrôle l'infiltration. La montre en effet l'influence de la valeur de K_s en ZNS sur l'arrivée du traceur. Toutefois, les débits infiltrés ici ne correspondent pas à ceux mesurés expérimentalement.



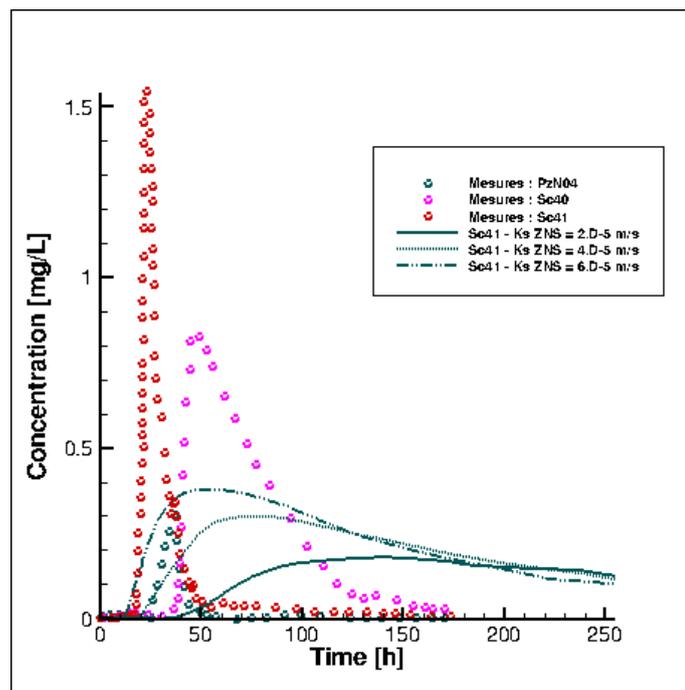
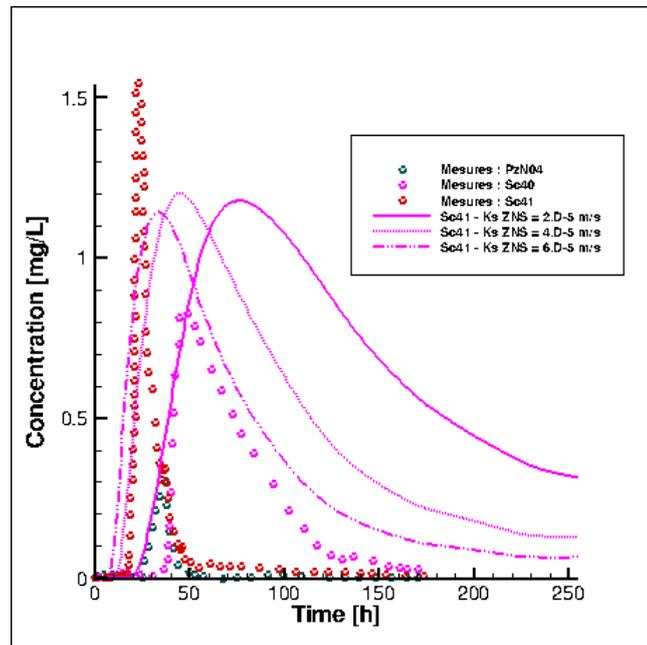


Figure 45 : Sensibilité à la valeur de Ks en ZNS (modèle homogène). Modélisation des restitutions du traceur en Sc41, Sc40, N04. $H_{inf} = 20\text{cm}$ (conditions normales) ; $H_{inf} = 35\text{cm}$ (sans flux de débordement).
Cercles : Mesures, Traits : Modèle.



Il serait intéressant de construire un modèle double-couche et réaliser des tests de sensibilités sur la perméabilité de la couche inférieure.

Si les hauteurs d'eau modélisées sont sensibles à la perméabilité de la nappe (notamment Sc41, mis en pompage), les tests de sensibilité montrent que la nappe joue un rôle mineur sur les BTCs (cf. Figure 40). En effet, à l'échelle des transferts latéraux ici (i.e. 1m60 à 2m), les transferts sont principalement pilotés par la ZNS. Toutefois, il existe une forte incertitude quant à la pénétration du traceur dans la nappe.

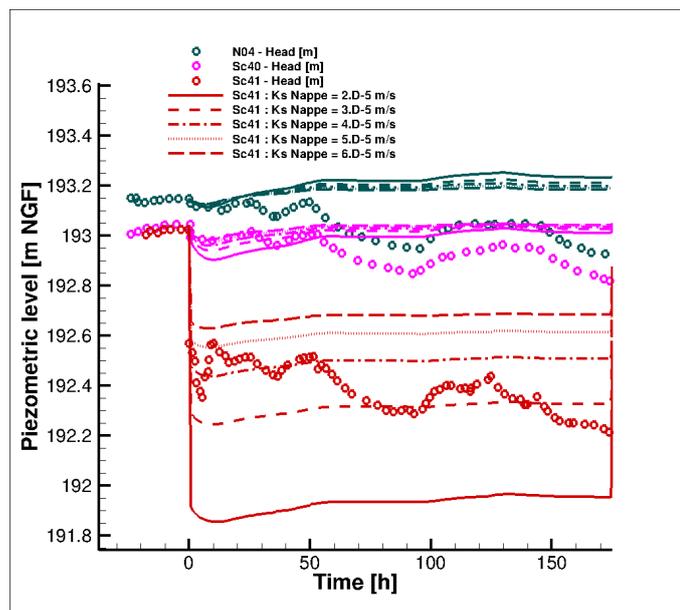


Figure 46 : Sensibilité à la valeur de K_s en nappe (modèle homogène). Modélisation de la réponse dynamique des piézomètres Sc41, Sc40, N04. $H_{Inf} = 20\text{cm}$ (conditions normales) ; $H_{Inf} = 35\text{cm}$ (sans flux de débordement). Cercles : Mesures, Traits : Modèle.

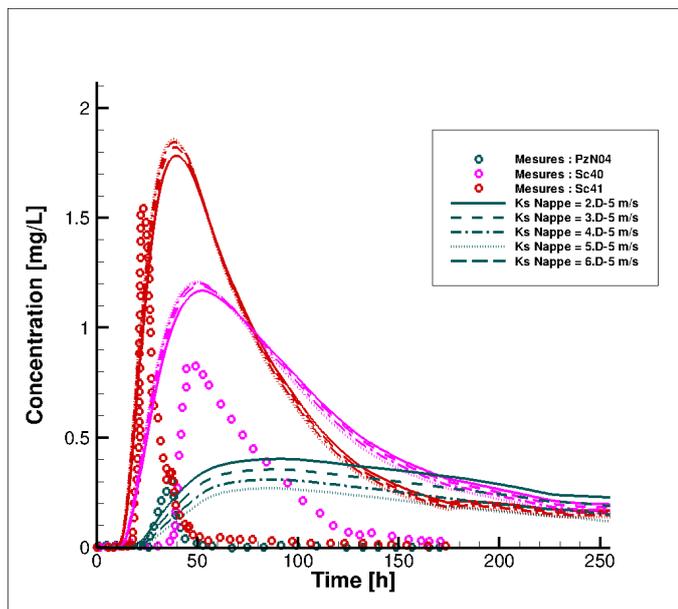


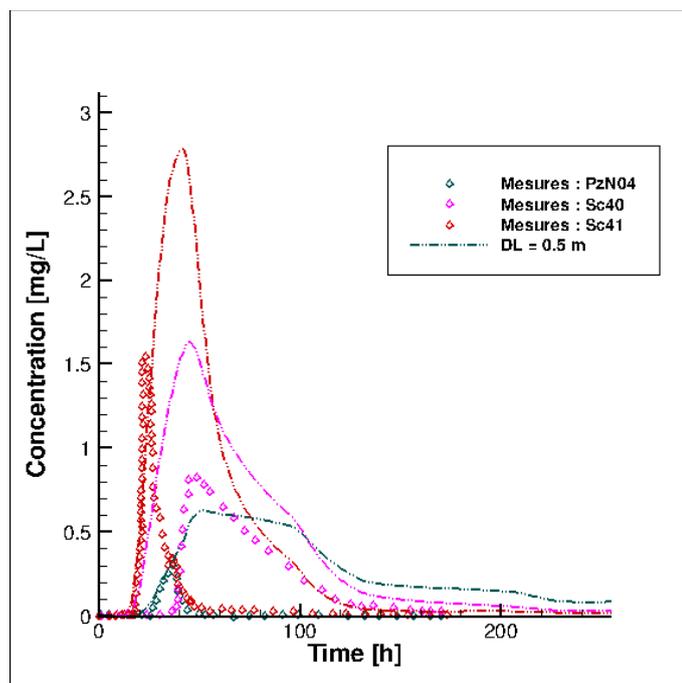
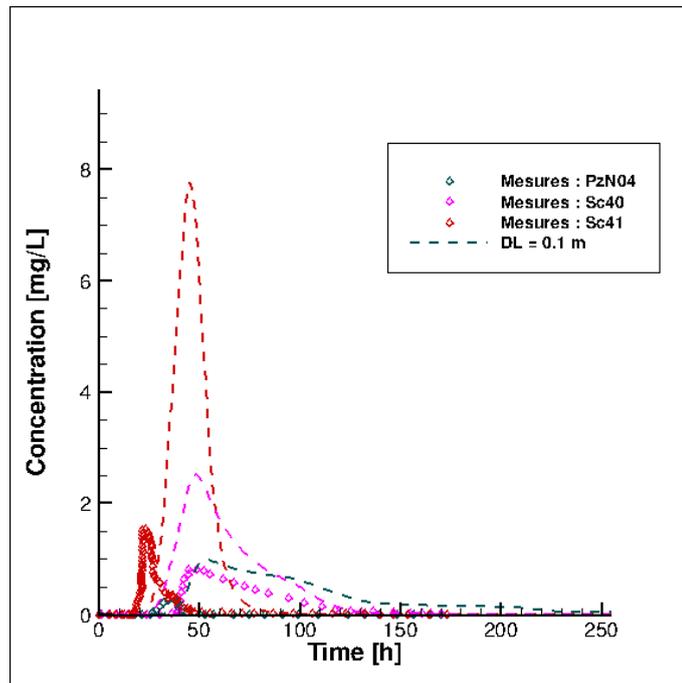
Figure 47 : Sensibilité à la valeur de K_s en nappe (modèle homogène). Modélisation des restitutions du traceur en Sc41, Sc40, N04. $H_{inf} = 20\text{cm}$ (conditions normales) ; $H_{inf} = 35\text{cm}$ (sans flux de débordement).
Cercles : Mesures, Traits : Modèle.

Les tests de sensibilité permettent d'illustrer des résultats connus, à savoir l'influence des paramètres θ_s et H_g sur les BTCs.

10.1.2 Sensibilité des paramètres hydrodispersifs

Les paramètres hydrodispersifs influent fortement sur les BTCs. Les coefficients de dispersion sont généralement des grandeurs difficiles à obtenir. On retient souvent une valeur de dispersivité longitudinale de 1m de l'ordre d' $1/10^{\text{ème}}$ de la longueur de parcours. Cependant, on manque de références concernant la dispersion à l'échelle de la ZNS où la dispersion hydrodynamique se mêle à la diffusion de l'eau par capillarité.

L'utilisation d'une dispersivité faible permet de réduire la traînée des BTCs, notamment en Sc41. Toutefois, l'arrivée du traceur en Sc41 est sous-estimée, et les concentrations largement surestimées.



Caphéine



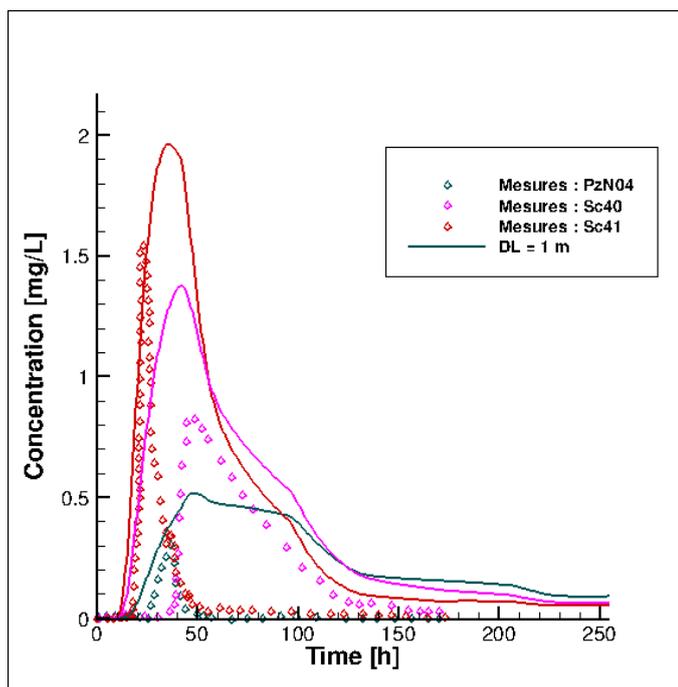


Figure 48 : Sensibilité aux coefficients de dispersion en ZNS/ZS (modèle homogène). Modélisation des restitutions du traceur en Sc41, Sc40, N04. $H_{Inf} = 20\text{cm}$ (conditions normales) ; $H_{Inf} = 35\text{cm}$ (sans flux de débordement). Cercles : Mesures, Traits : Modèle.

10.1.2.1 Sensibilité aux conditions de mise en œuvre de l'essai (H_{INF} , T_{INF})

Selon le scénario de déversement, il peut être intéressant d'adapter/modifier les conditions de mise en œuvre de l'essai « grand infiltromètre ». L'essai est initialement dimensionné afin de proposer un compromis selon trois critères :

- la qualité des restitutions : les résultats doivent être directement utilisables dans un contexte opérationnel (minimum de biais tels que pompage, formation de dôme),
- la fiabilisation des restitutions : prendre les garanties nécessaires quant à la réussite de l'essai (mise en pompage si trop d'incertitudes sur les directions d'écoulement, imposition d'une charge continue afin de pousser le traceur),
- la qualité des restitutions : les résultats doivent être directement utilisables dans un contexte opérationnel (minimum de biais tels que pompage, formation de dôme),
- la fiabilisation des restitutions : prendre les garanties nécessaires quant à la réussite de l'essai (mise en pompage si trop d'incertitudes sur les directions d'écoulement, imposition d'une charge continue afin de pousser le traceur),

- la durée de l'essai : définition de la charge (durée imposition, hauteur) en regard du scénario et des caractéristiques du milieu.
-

A ce titre, des simulations complémentaires ont été menées afin de voir l'influence (dans le même contexte) de modifications de mises en œuvre pouvant altérer un des trois critères précédents :

- Imposition d'une charge $H_{INF}=20\text{cm}$ (S1) pendant toute la durée de l'essai $T_{INF}=200\text{h}$ (scénario similaire à la mise en œuvre réelle), (S2) pour $T_{INF}=35\text{h}$, (S3) pendant $T_{INF}=5\text{h}$ (couplé à l'infiltration du traceur),
- (S4), (S5) et (S6): respectivement (S1), (S2) & (S3) avec imposition d'une charge $H_{INF}=5\text{cm}$,
- Le terme de pompage n'est pas pris en compte dans les scénarios (sauf S1). Les concentrations sont toutefois moyennées sur la colonne d'eau en Sc41.

Les figures suivantes présentent les restitutions du modèle, soumis à ces différents scénarios de rejets, en Sc41 et Sc40.

Les scénarios de rejets ont alors les caractéristiques suivantes :

- Masse totale de traceur : 39g (pour chaque scénario),
- Vitesses d'infiltration :
Le passage d'une charge $H_{INF}=20\text{cm}$ à $H_{INF}=5\text{cm}$ n'entraîne pas de modifications significatives des vitesses d'infiltration dans l'infiltromètre (respectivement $V_{INF}=0.22\text{m/h}$ et 0.18m/h , 0.26m/h pour $H_{INF}=35\text{cm}$ si défaut de maintien de charge),
- Volumes d'eau rejetés :
 $T_{INF}=200\text{h}$ sont de 111m^3 en (S1) (40m^3 sans le défaut de maintien de charge) et 21m^3 en (S4),
 $T_{INF}=35\text{h}$ sont de 4.9m^3 en (S2) et 3.8m^3 en (S5),
 $T_{INF}=5\text{h}$ sont de 0.8m^3 en (S1) et 0.6m^3 en (S6),



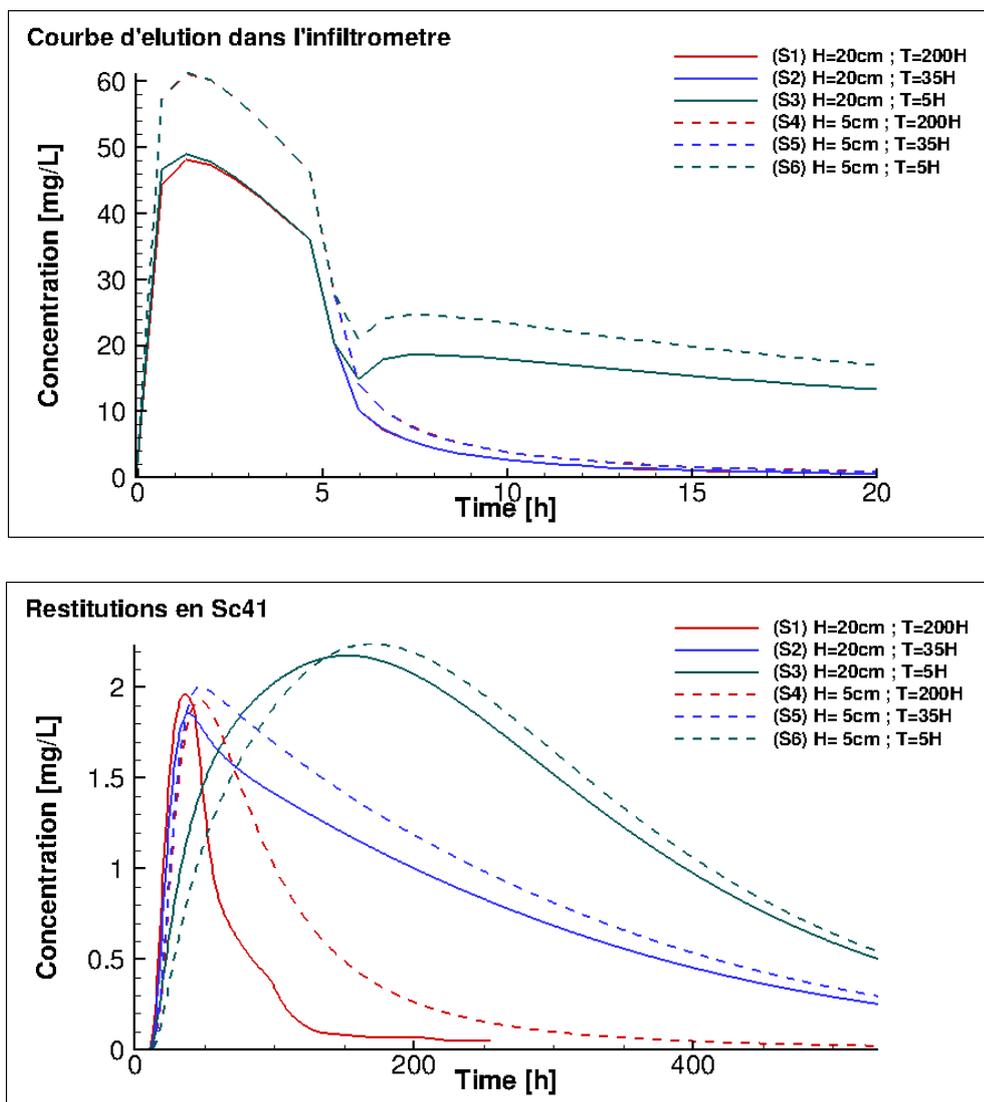


Figure 49 : (haut) Modifications de mise en œuvre de l'essai grand infiltromètre : a) Suivi de la concentration dans l'infiltromètre ; (bas) Restitutions du modèle en Sc41 , soumis à des modifications du scénario de rejet dans l'infiltromètre (H_{INF} , T_{INF} , pompage)

On observe les comportements suivants :

- (S1) correspond au scénario tel qu'il a été mis en œuvre sur le site N°4,
- (S4) : le passage d'une charge $H_{INF}=20\text{cm}$ à 5cm dans des conditions de mise en œuvre similaire (infiltration d'eau continue, de traceur de $T=0$ à $T=5\text{h}$) ne modifie pas sensiblement les restitutions en Sc41 (arrivée du traceur à $T\sim 12\text{h}$, pic à $T=35\text{h}$ et $C \# 2\text{mg/L}$). Les volumes d'eau rejetés sont de l'ordre de 2.4m^3 , pour une vitesse de filtration de 0.18m/h au niveau de

l'infiltromètre. La traînée est toutefois plus importante (effet également dû à l'absence de débordement d'eau dans l'infiltromètre),

- (S2) et (S5) : l'arrêt prématuré de l'infiltration n'altère principalement que la traînée du panache. Ce comportement était prévisible en regard des temps de transferts principaux (~50h). De même, le signal en Sc40 est relativement peu atténué,
- (S3) et (S6) : les BTCs sont significativement modifiées sous ces scénarios. Si les temps d'arrivée sont similaires (en raison notamment de la forte dispersivité), le pic du traceur est estimé à 200h contre ~30h dans les conditions réelles.
-

Tableau 17 : Tableau synthétique des tests de sensibilité aux conditions de mise en œuvre de l'essai

Scénario	H _{INF}	T _{INF}	Volume infiltré	V _{INF}	Conc. Infiltromètre	Conc. Sc41	Atténuation du signal	Commentaires
S1 (condition réelle de l'essai)	H _{INF} = 20cm + phases avec {H _{INF} = 35cm et Débordement}	200h	111 m ³ (40m ³ sans débordement)	0.22m/h (0.26m/h pour une charge de 35cm)	45 mg/L	2 mg/L	95.5 %	Temps d'arrivée entre T=30h 48h. <u>Aucune différence de comportement.</u> Les fortes traînées s'expliquent par l'absence de pompage
S2	H _{INF} = 20cm	35h	4.9m ³	0.22m/h	45 mg/L	2 mg/L	95.5 %	
S3		5h	0.8m ³		45 mg/L	2 mg/L	95.5 %	
S4	H _{INF} = 5cm	200h		0.18m/h	55 mg/L	2 mg/L	96.4 %	
S5		35h	3.8 m ³		55 mg/L	2 mg/L	96.4 %	
S6		5h	0.6m ³		55 mg/L	2.2 mg/L	96 %	

