

Expérimentation sur données de terrain

Les expériences de terrain se sont déroulées entre le 18 Juillet 2007 et le 26 Juin 2008. Les caractéristiques générales de ces expériences sont résumées dans le Tableau 10.

Étant donné que ces expériences sont nouvelles, on a procédé pas à pas, et certains paramètres ont été modifiés avec l'expérience :

- Pour les premières expériences, un clou a été utilisé pour établir le contact entre le câble électrique et le sol. Après on s'est aperçu que le contact pouvait être obtenu aussi bien en enfonçant le câble directement dans le sol. Ainsi l'hypothèse de ponctualité du point d'injection est mieux respectée (il est d'usage de ne pas enfoncer l'électrode plus profond que 10 % de la valeur de l'écartement entre électrodes).
- Alors que pour les premières expériences, l'infiltromètre a été utilisé tel quel, on a voulu être certain par la suite qu'il n'y avait aucune conduction électrique qui était assurée par l'infiltromètre lui-même, et on a remplacé les pièces en métal par des pièces en plastique (grille d'infiltration et pieds).

Par ailleurs, différentes conductivités électriques de l'eau ont été testées. On a infiltré soit de l'eau du robinet de Grignon (environ $700 \mu\text{S cm}^{-1}$) soit cette même eau dans laquelle du NaCl a été préalablement dissous (conductivité d'environ $15000 \mu\text{S cm}^{-1}$).

3.1. Matériels et Méthodes

3.1.1. Présentation des sites d'étude

3.1.1.1. Sol limoneux : Grignon

Le sol étudié se situe sur une parcelle d'un champ expérimental de l'Institut National de la Recherche Agronomique à Grignon dans le département des Yvelines (78).

Tableau 10. Synthèse des conditions d'expériences de terrain (lieu, date, conditions d'infiltration et de mesures électriques)

Réf.	Lieu	Date	Infiltration							Mesures électriques				Optimisation	
			h_{inf} (cm)	T_{inf} (min)	P_{inf} (cm)	σ_{eau} ($\mu S/cm$)	V_{inf} (cm^3)	θ_i ($cm^3 cm^{-3}$)	σ_b (g/cm^3)	ρ_i ($\Omega.m$)	N_p (-)	Elect.	Métal.		
	Grignon	18/07/2007	-1	195	40	750	584	0,23	1,55	13	18	clou	oui	non	
	Grignon	19/07/2007	-1	140	40	12150	567	0,21	-	13	14	clou	oui	non	
	Grignon	27/09/2007	-1	127	40	715	445	0,18	-	28	16	clou	oui	non	
E1	Grignon	26/10/2007	-1,5	110	40	15350	280	-	-	-	16	clou	oui	non	
			-2	150	40	725	211	0,28	-	27	17	fil	oui	oui	
			-0,5	80	40	725	359	-	-	-	10	fil	oui	non	
E2	Grignon	31/03/2008	10h	-1	120	39	716	101	0,36	-	21	13	fil	non	oui
			14h	-0,5	87	39	716	575	0,36	-	19	12	fil	non	non
E3	Grignon	26/06/2008	-6	177	35	720	247	0,25	-	21	23	fil	non	oui	
	Rambouillet	16/10/2007	-0,4	252	35	700-750	139	0,15	1,72	25	20	fil	oui	oui	
	Rambouillet	19/06/2008	-3	95	22	540	155	0,19	-	37	9	fil	non	non	
	Cernay	17/10/2007	-14	49	5	700-750	3620	0,122	1,43	1948	11	fil	oui	non	
	Cernay	10/04/2008	-15	100	5	700-750	421	0,087	-	6031	14	fil	non	oui	

h_{inf} est le potentiel d'infiltration

T_{inf} est la durée de l'infiltration

P_{inf} est la profondeur à laquelle repose l'infiltromètre (mesurée à partir de la surface du sol)

σ_{eau} est la conductivité électrique de l'eau infiltrée

θ_i est la teneur en eau volumique initiale du sol

σ_b est la masse volumique apparente du sol

ρ_i est la résistivité électrique apparente moyenne initiale du sol

N_p est le nombre de jeux de mesures électriques acquis

Elect. représente le type d'électrode utilisée

Métal. indique la présence de pièces métalliques (grille à la base de l'infiltromètre et pieds)

C'est un «cambisol calcique» (classification FAO), d'une épaisseur d'environ 0,8 m, qui repose sur les calcaires du Lutétien. Le sol est cultivé depuis de nombreuses années (cultures de maïs ou de sorgho). Des études préalables ont estimé les paramètres hydrodynamiques de ce sol à la fois dans son horizon travaillé et dans son horizon profond (Coquet et al., 2005b ; Coquet et al., 2005c). La composition granulométrique de l'horizon qui se situe sous le labour (i.e. à la profondeur où nos expériences sont réalisées) est la suivante : 31,0 % d'argile, 62,5 % de limon, 6,5 % de sable.

3.1.1.2. Sol sableux : Cernay-la-Ville

Le site d'étude se situe à quelques kilomètres de Cernay-la-Ville, dans le Parc Naturel Régional de la Haute Vallée de Chevreuse. Le site se localise sur les sables de Fontainebleau, d'âge Stampien. Il s'agit de dunes provenant d'un faciès marin remodelé par le vent (Figure 13a).

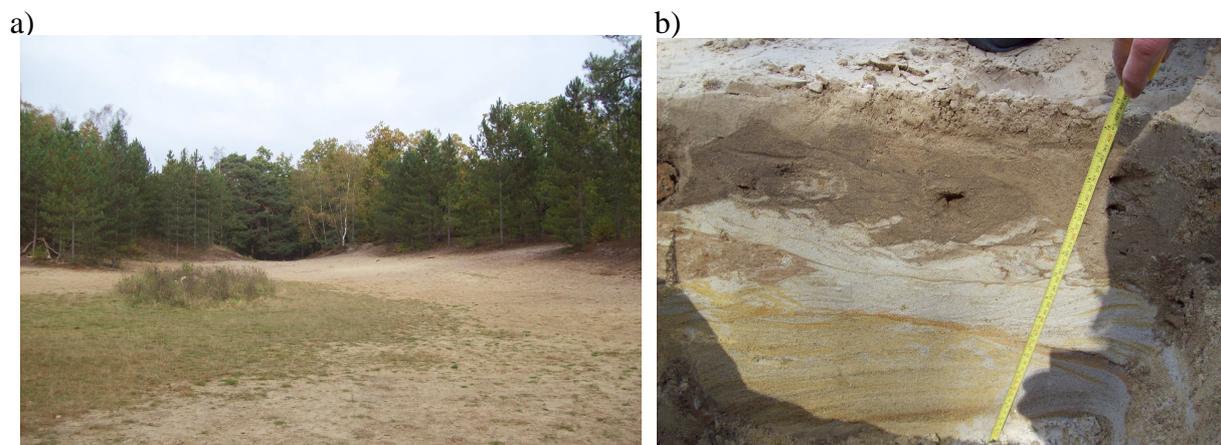


Figure 13. Dunes de sable de Cernay-la-ville (a), et profil vertical d'environ 50 cm (b).

Ces sables sont composés à 99 % de quartz (Schneider, 2006). Sur cette dune, Saintenoy et al. (2008) ont mesuré une porosité moyenne égale 0,43 et une masse volumique moyenne des particules égale à $2,48 \pm 0,03 \text{ kg dm}^{-3}$. De plus 10 % des particules ont un diamètre inférieur à 0,125 mm, et 86 % des grains ont un diamètre inférieur à 0,16 mm. Dans les premiers 50 cm

de profondeur, quelques variations de couleur sont observables avec des teintes blanches et ocres (Figure 13b). Aucune matière organique n'est visible.

3.1.1.3. Sol argileux : Rambouillet

Le site d'étude se situe dans le domaine de la Bergerie Nationale du Parc du château de Rambouillet (Yvelines). Le sol, situé sur une parcelle de prairie, a été excavé jusqu'à 26 cm puis une surface plane a été préparée pour poser l'infiltromètre. Ce sol est connu pour avoir un horizon très argileux, décrit par Fournier et Michelin (1989), et qui débute, selon nos observations, vers 45 cm de profondeur. Cependant, on a préféré travailler dans l'horizon supérieur qui contient déjà une quantité d'argiles importante. Dès l'excavation, on a remarqué la présence de cailloux centimétriques dispersés dans l'horizon superficiel du sol.

3.1.2. Infiltromètre à disque

Avant de placer l'infiltromètre, on a, à chaque fois, préparé une surface plane. A Grignon, pour chaque expérience, on a excavé environ 40 cm de sol, afin de se placer sous la semelle de labour. En effet le labour est réalisé à Grignon aux alentours de 26 cm de profondeur (profondeur variable selon les années), et une semelle de labour d'une épaisseur moyenne égale à environ 8-10 cm est présente. Après l'excavation, on a procédé au couteau à l'aplanissement de la surface du sol.

Pour les sols de Grignon et Rambouillet, une couche (3 mm d'épaisseur) de sable fin (sable de Fontainebleau) a été disposée entre le sol et l'infiltromètre afin d'améliorer le contact hydraulique entre le sol et l'infiltromètre.

Les potentiels d'infiltration ont été choisis à chaque fois de façon à ce que l'infiltromètre se vide dans une période de temps convenable, ni trop courte, afin que le temps d'acquisition des mesures électriques (environ 4 ou 5 minutes) soit négligeable par rapport au processus d'infiltration, ni trop longue, afin que l'expérience puisse se dérouler dans la journée.

Ainsi, à Grignon, on a choisi des potentiels assez proches de la saturation (entre -0,5 et -6 cm) pour avoir une quantité d'eau infiltrée assez importante.

A Rambouillet, en raison de la très faible conductivité hydraulique du sol (typique des sols argileux), on s'est placé à des potentiels proches de la saturation (-0,4 et -3 cm), pour infiltrer

un maximum d'eau, et avoir un bulbe suffisamment développé pour que les mesures électriques soient sensibles à son évolution.

A Cernay, en raison de la grande conductivité hydraulique typique des milieux sableux, on a choisi un potentiel très bas (-14 cm) pour éviter que le bulbe d'infiltration ne se développe trop vite, et que le temps d'acquisition des mesures de résistivité électrique apparente ne soit trop élevé en comparaison à la durée globale de l'expérience.

3.1.3. Dispositif de mesure de la résistivité électrique

Le résistivimètre SYSCAL-R1 PLUS (marque IRIS INSTRUMENTS) a été utilisé pour toutes les expériences. Ce résistivimètre automatique permet, en fonctionnant avec un multiplexeur, de travailler en acquisition multi-électrodes.

Le protocole utilisé est identique à celui décrit dans le chapitre 2. Chaque jeu de 54 données a été acquis en quelques minutes (4 à 5 minutes). On a toujours réalisé une ou plusieurs acquisitions avant le début de l'infiltration et après celle-ci.

3.1.4. Mesure des courbes de rétention en eau

La technique des presses de Richards permet d'obtenir au laboratoire une courbe de rétention en eau $\theta(h)$ (Klute, 1986 ; Quétin et Gaillard, 1998). Des échantillons d'un volume de 50 cm^3 (hauteur de 2,55 cm et diamètre de 5 cm) sont prélevés. Les cylindres sont disposés sur une plaque poreuse. On utilise une pâte de kaolinite pour établir la continuité hydraulique entre les échantillons et la plaque poreuse. L'enceinte, qui contient la plaque poreuse, est fermée, et l'on ajuste la pression de l'air dans l'enceinte à une valeur qui correspond au potentiel de l'eau que l'on veut imposer dans l'échantillon. Il est nécessaire d'attendre environ deux jours que de l'eau soit expulsée de l'échantillon et que l'équilibre entre la pression de l'eau restante dans l'échantillon et celle de l'air de l'enceinte soit atteint. On procède ensuite à la pesée de l'échantillon. On répète l'opération à différents paliers de pression, de plus en plus élevés, la limite de pression applicable dépendant des caractéristiques de la plaque poreuse. On finit par mesurer la masse de l'échantillon séché à 105°C pendant 24 heures. On déduit ainsi les teneurs en eau volumiques du sol pour les différents potentiels testés: pF 1, 1,5, 2, 2,5, 3, 3,5, 4, et 4,2.

3.1.5. Modélisation de la résistivité électrique apparente

Alors que, dans l'étude numérique, il était implicite que l'eau d'infiltration avait une conductivité électrique identique à celle de l'eau présente initialement dans le sol, dans cette partie, on tentera d'inverser les paramètres hydrodynamiques et pétrophysiques, en tenant compte de la différence de conductivité électrique qu'il peut y avoir entre ces deux eaux.

Reprenons l'équation de Rhoades et al. (1976) exposée dans le chapitre 2 (équation 53), qui permet d'effectuer le passage de la teneur en eau θ à la conductivité électrique apparente σ_b :

$$\sigma_b = (A\theta^2 + B\theta)\sigma_w + \sigma_s \quad (56)$$

En faisant l'hypothèse que σ_s est négligeable et en se plaçant à l'instant initial, l'équation (56) devient :

$$\sigma_{b,i} = (A\theta_i^2 + B\theta_i)\sigma_{w,i} \quad (57)$$

où $\sigma_{b,i}$ [$V^{-1} A L^{-1}$] est la conductivité électrique apparente initiale, $\sigma_{w,i}$ [$V^{-1} A L^{-1}$] est la conductivité électrique de l'eau initialement présente dans le sol, et θ_i [$L^3 L^{-3}$] la teneur en eau volumique initiale du sol. Si la conductivité de l'eau σ_w qui est ajoutée dans le sol au cours de l'infiltration est identique à celle qui était déjà présente $\sigma_{w,i}$, alors le rapport ($\sigma_b / \sigma_{b,i}$) peut se calculer par :

$$\frac{\sigma_b}{\sigma_{b,i}} = \frac{A\theta^2 + B\theta}{A\theta_i^2 + B\theta_i} \quad (58)$$

Si l'eau d'infiltration a une conductivité électrique différente de celle de l'eau initialement présente ($\sigma_w \neq \sigma_{w,i}$), alors on écrit que :

$$\frac{\sigma_b}{\sigma_{b,i}} = \frac{(A\theta^2 + B\theta)\sigma_w}{(A\theta_i^2 + B\theta_i)\sigma_{w,i}} \quad (59)$$

où σ_b représente la valeur de la conductivité électrique de l'eau à l'instant t et dans la maille considérée. En écrivant que le rapport des conductivités électriques des fluides est égal à celui des concentrations ioniques :

$$\frac{\sigma_w}{\sigma_{w,i}} = \frac{C}{C_i} = R \quad (60)$$

où C [$M L^{-3}$] est la concentration en soluté à l'instant t et C_i [$M L^{-3}$] est la concentration en soluté à l'instant initial, on peut écrire l'équation (59) sous la forme :

$$\frac{\sigma_b}{\sigma_{b,i}} = \frac{A\theta^2 + B\theta}{A\theta_i^2 + B\theta_i} \times \frac{C}{C_i} \quad (61)$$

3.1.6. Paramétrage du problème inverse et scénarios

On se propose de réaliser deux types d'inversions. Dans le premier cas, on supposera, comme dans le cas des expériences numériques que les conductivités électriques de l'eau d'infiltration et de l'eau initialement présente dans le sol sont identiques, alors que dans le second, on supposera que non.

Ainsi, dans le premier cas on optimisera :

- les paramètres hydrodynamiques de Mualem-van Genuchten
- les paramètres pétrophysiques de Rhoades A et B

Dans le second cas, les paramètres inversés seront :

- les paramètres hydrodynamiques de Mualem-van Genuchten
- les paramètres pétrophysiques de Rhoades A et B
- la dispersivité D . On réalisera pour cela conjointement l'inversion du rapport R des conductivités électriques des eaux ($\sigma_w / \sigma_{w,i}$). Comme la valeur de σ_w a été mesurée pour chaque expérience, connaissant R , il serait alors immédiat de calculer $\sigma_{w,i}$.

Par ailleurs, afin de simplifier le processus d'inversion, on a choisit de lier les paramètres α_L et α_T par la relation suivante :

$$\alpha_L = 10\alpha_T \quad (62)$$

La valeur de diffusion moléculaire utilisé est $1,1 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ qui est une valeur moyenne des coefficients de diffusion des ions majeurs présents dans l'eau du robinet.

En ce qui concerne les paramètres de Mualem-van Genuchten, étant donné que θ_r joue un rôle important dans la formulation mathématique des fonctions $K(h)$ et $\theta(h)$, mais que l'optimisation d'un nombre trop important de paramètres peut interdire la convergence de l'algorithme vers le minimum global, on testera deux alternatives :

- θ_r est optimisé.
- θ_r est fixé à la valeur 0.

Par ailleurs on a choisi, à la différence de la partie numérique pour laquelle il fallait se restreindre à un nombre de paramètres réduit en raison des temps de calculs très importants, d'inverser θ_s .

En résumé, on aura, pour chaque expérience, quatre scénarios correspondant aux 4 jeux de paramètres à inverser suivants :

- $\theta_s, \alpha, n, K_s, A, B$ (scénario 1).
- $\theta_r, \theta_s, \alpha, n, K_s, A, B$ (scénario 2).
- $\theta_s, \alpha, n, K_s, A, B, D, R$ (scénario 3).
- $\theta_r, \theta_s, \alpha, n, K_s, A, B, D, R$ (scénario 4).

3.2. Résultats de terrain

3.2.1. Cinétiques d'infiltration

Les cinétiques d'infiltration réalisées à différents potentiels présentent, pour certaines, une allure inattendue (Figures 14, 15, 16) : certaines courbes d'infiltration cumulée au cours du temps montrent une allure convexe. Alors que le taux d'infiltration est censé décroître au cours du temps, lors de certaines infiltrations, il croît au cours du temps (Figures 14a, 14b, 14c, 14f). Par exemple, si l'on regarde en détail la courbe d'infiltration du 27/09/07 (Figure 14c), on observe que la première courbe d'infiltration (entre les temps 0 et 125 min) montre deux régimes facilement distinguables. Jusqu'au temps 20 min, la courbe a une allure convexe (creux dirigé vers le bas) typique. Le ralentissement du taux d'infiltration est classique des débuts d'infiltration pendant lesquels le régime d'infiltration est transitoire. Cependant, à partir du temps 20 min environ, la courbe se redresse et donc le taux d'infiltration augmente. Différentes raisons peuvent être avancées pour expliquer cette observation :

- une modification du système poral sous l'infiltromètre (par exemple, sous l'action de l'eau d'infiltration, des particules du sol sont déplacées et de nouveaux pores actifs apparaissent),
- la présence et le développement d'un film d'eau en surface qui augmente la surface d'infiltration,
- une évaporation d'eau dans le vase de Mariotte qui induirait une augmentation du potentiel d'infiltration au cours de l'expérience, et donc la mise en fonction de pores jusque là inactifs.
- la présence de deux horizons avec des conductivités hydrauliques différentes (l'horizon de surface aurait une conductivité hydraulique inférieure à celle de l'horizon sous-jacent).

L'allure de la courbe de la Figure 14a s'accorde bien avec cette dernière hypothèse puisque l'accroissement du taux d'infiltration est très régulier.

L'expérience du 26/10/07 sur le sol de Grignon, qui a comporté 4 infiltrations successives, montre des résultats mitigés. Les courbes représentant les 2 premières infiltrations donnent les résultats escomptés (courbes convexes) alors que les 2 dernières montrent des allures concaves (Figure 14d). Le potentiel choisi pour l'infiltration semble discriminant dans ce cas. Les deux premières infiltrations se sont déroulées à un potentiel égal à -2 cm alors que les deux dernières se sont déroulées au potentiel -0,5 cm.

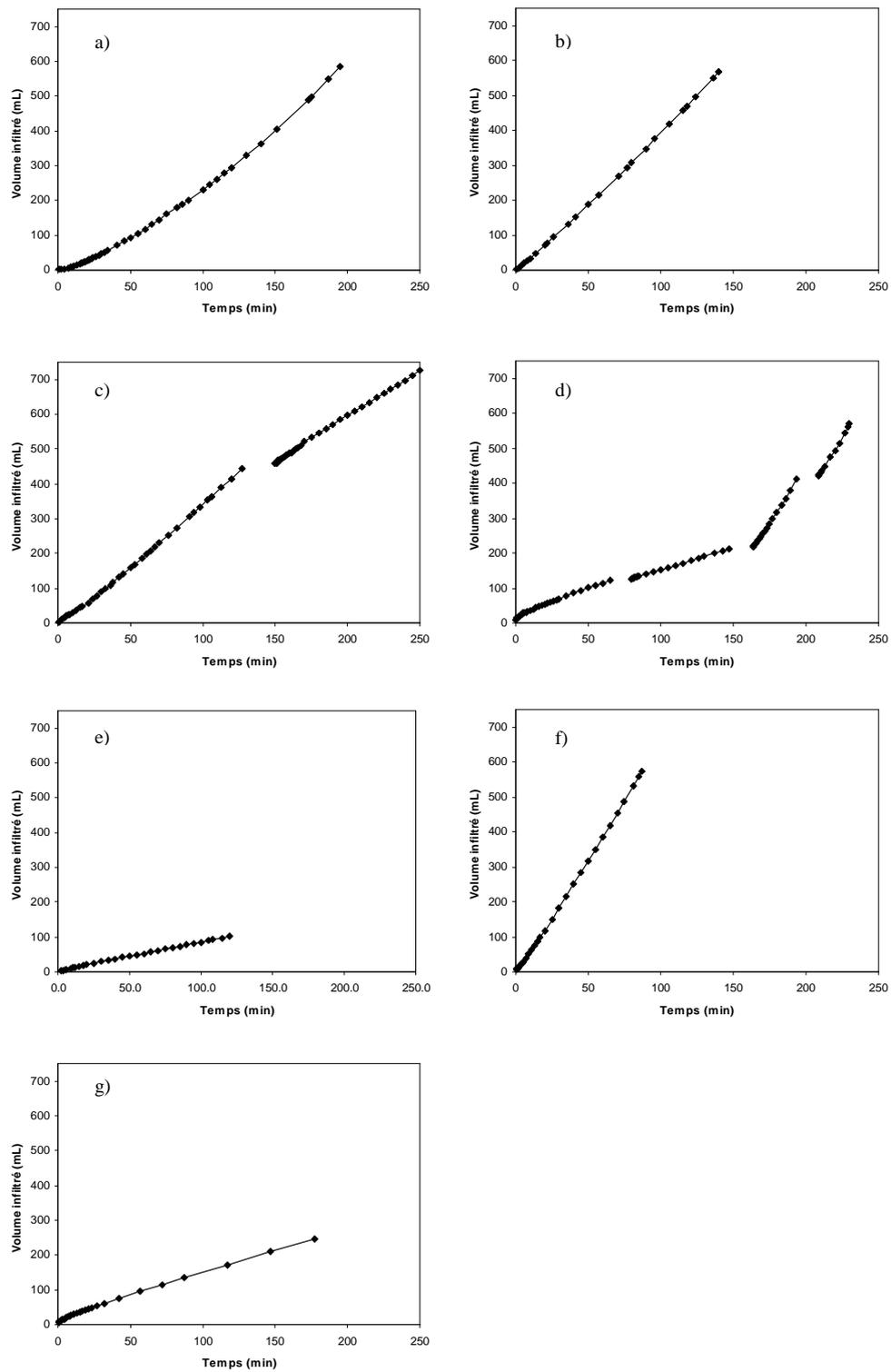


Figure 14. Cinétiques d'infiltration pour le sol de Grignon. a) le 18/07/07. b) le 19/07/07. c) le 27/09/07. d) le 26/10/07. e) le 31/03/08 matin. f) le 31/03/08 après-midi. g) le 26/06/08.

En ce qui concerne la journée du 31 mars, la même observation que précédemment peut être faite : l'infiltration du matin au potentiel -1 cm montre une allure convexe, alors que celle de l'après-midi, réalisée à un potentiel supérieur (-0,5 cm) est concave (Figures 14e, 14f).

La cinétique d'infiltration sur le sol de Cernay, le 17-10-07, montre une allure en palier, car, ce jour là, on a tenté de bloquer l'infiltromètre (en bouchant le tube d'alimentation en air), pour réaliser des mesures d'infiltration et pouvoir juger d'un éventuel effet électrocinétique (Figure 15a). De plus le taux d'infiltration est très élevé. Il se pourrait qu'une fuite à la base de l'infiltromètre soit responsable de ce taux d'infiltration très élevé. La cinétique d'infiltration sur le sol de Cernay du 10-4-08 est nettement plus régulière et montre un taux d'infiltration plus modéré que lors de l'infiltration du 17-10-07 (Figure 15). La courbe présente une allure rectiligne.

Les cinétiques d'infiltration sur le sol de Rambouillet montrent, quant à elles, les régimes d'infiltration attendus avec une décroissance régulière au cours du temps du taux d'infiltration (Figure 16). Néanmoins l'infiltration du 16/10/07 montre un taux d'infiltration plus faible que celui du 19/06/08 alors que le potentiel d'infiltration est plus élevé le 16/10/07 que le 19/06/08 (potentiels d'infiltration égaux à -0,4 cm et -3 cm respectivement). Ce résultat inattendu peut s'expliquer par la variabilité spatiale de la conductivité hydraulique dans ce sol.

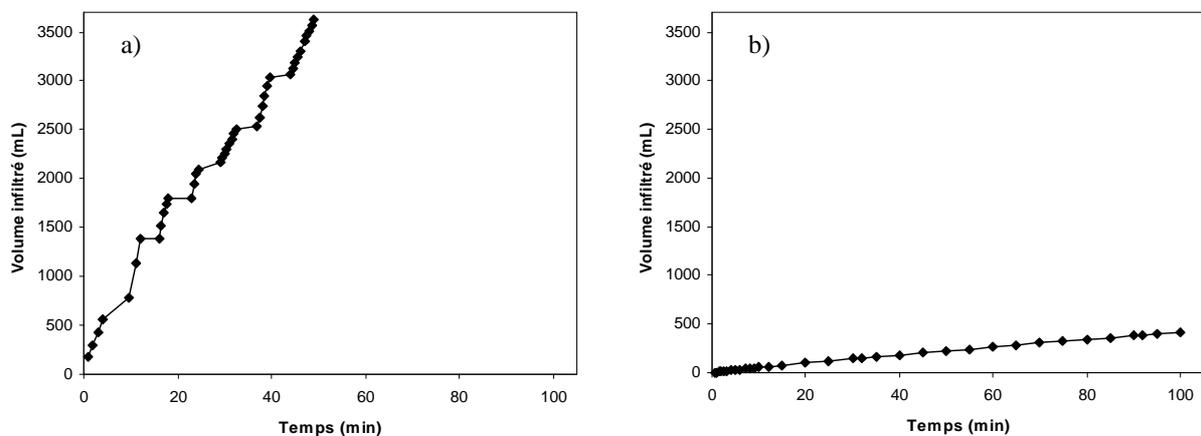


Figure 15. Cinétiques d'infiltration pour le sol de Cernay. a) le 17/10/07. b) le 10/04/08.

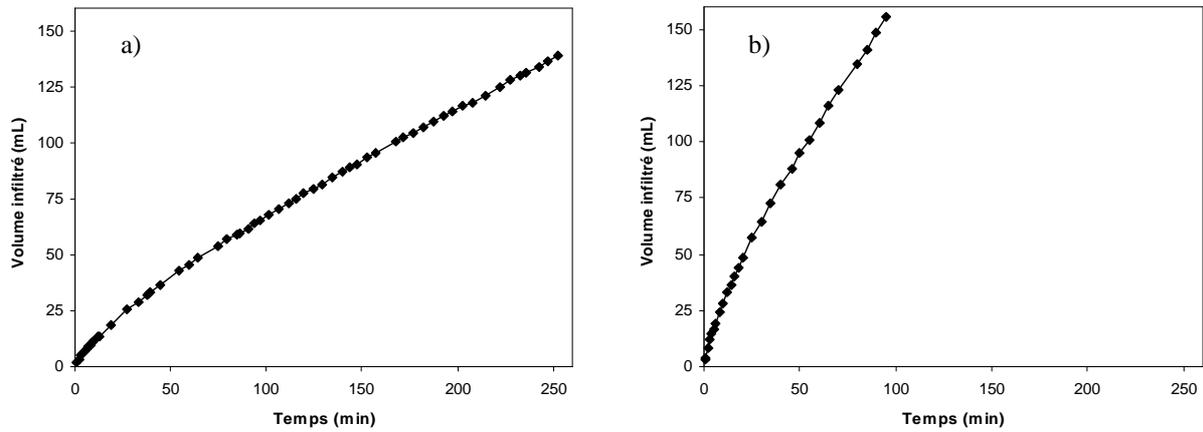


Figure 16. Cinétiques d'infiltration pour le sol de Rambouillet. a) le 16/10/07. b) le 19/06/08.

De nombreuses courbes d'infiltration ne présentent pas l'allure escomptée. On ne pourra pas réaliser d'inversion des paramètres hydrodynamiques en utilisant les courbes d'infiltration concaves, car aucun jeu de paramètre ne permettrait de prédire une telle cinétique d'infiltration.

3.2.2. Résistivités électriques

3.2.2.1. État initial

On a représenté en fonction du temps l'évolution de la résistivité électrique apparente mesurée par chacun des 54 quadripôles (Figures 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25 et 26) lors des infiltrations. Pour un sol homogène et un système électrique idéal (c'est-à-dire si les électrodes étaient parfaitement disposées et ponctuelles), on aurait à l'instant initial la même valeur de résistivité électrique pour chacun des quadripôles. Ceci n'est évidemment pas le cas, et les valeurs mesurées de résistivité électrique montrent pour chaque expérience, et à l'instant initial (avant infiltration), une dispersion autour d'une valeur moyenne. Cette dispersion est d'ailleurs assez variable (Tableau 11).

Tableau 11. Résistivités électriques apparentes initiales

Lieu	Date	μ	σ	σ/μ	min	max
		($\Omega.m$)	($\Omega.m$)	(-)	($\Omega.m$)	($\Omega.m$)
Grignon	18/07/2007	12,9	0,91	0,07	10,46	14,56
Grignon	19/07/2007	12,5	1,22	0,10	9,32	14,60
Grignon	27/09/2007	28,1	2,29	0,08	23,14	31,96
Grignon	26/10/2007	26,7	2,26	0,08	21,01	32,05
Grignon	31/03/2008 10h	20,8	2,31	0,11	16,80	25,92
Grignon	31/03/2008 14h	19,3	1,34	0,07	15,98	22,98
Grignon	26/06/2008	21,4	3,01	0,14	17,51	28,76
Rambouillet	16/10/2007	25,0	3,92	0,16	17,66	32,83
Rambouillet	19/06/2008	36,6	6,47	0,18	22,99	51,28
Cernay	17/10/2007	1947,9	510,97	0,26	1054,61	2829,63
Cernay	10/04/2008	6031,2	772,44	0,13	4422,82	7851,84

μ est la valeur moyenne de la résistivité électrique apparente

σ est l'écart-type de la valeur de résistivité électrique apparente

Ces différences entre les valeurs des résistivités électriques apparentes calculées pour chacun des quadripôles résultent à la fois de l'inhomogénéité du sol et des erreurs de mesures. Par inhomogénéité du sol, on entend l'effet de la variabilité spatiale des caractéristiques

bio-physico-chimiques du sol (texture, masse volumique apparente, teneur en eau volumique,...) dont dépend la mesure de résistivité électrique apparente.

Cette dispersion des valeurs de résistivités électriques apparentes est largement plus faible pour le sol de Grignon (coefficient de variation σ/μ environ égal à 0,9) que pour le sol de Cernay et le sol de Rambouillet (coefficients de variation compris entre 0,13 et 0,26).

Ce résultat s'accorde avec des observations macroscopiques :

- A Grignon, aucune inhomogénéité de matériau n'avait été observée.
- A Rambouillet, de nombreux petits cailloux sont présents.
- A Cernay, il existe des variations locales de couleur qui pourraient être corrélées à des variations de paramètres physiques (type de constituants, porosité, granulométrie,...). De plus, les mesures ont été réalisées sur des états très secs, ce qui se traduit par des résistivités électriques très élevées (comprises entre 1055 et 7852 $\Omega.m$), et parfois même hors gamme de mesure ($>10 \text{ k}\Omega.m$).

Les valeurs moyennes de la résistivité électrique apparente à Grignon appartiennent à l'intervalle 12,5 $\Omega.m$ – 28,1 $\Omega.m$ ce qui démontre une grande variabilité de cette valeur à l'échelle saisonnière. En revanche, l'effet d'inhomogénéité nous semble assez restreint et les valeurs de coefficient de variation relatif ne dépassent jamais à Grignon 14 %.

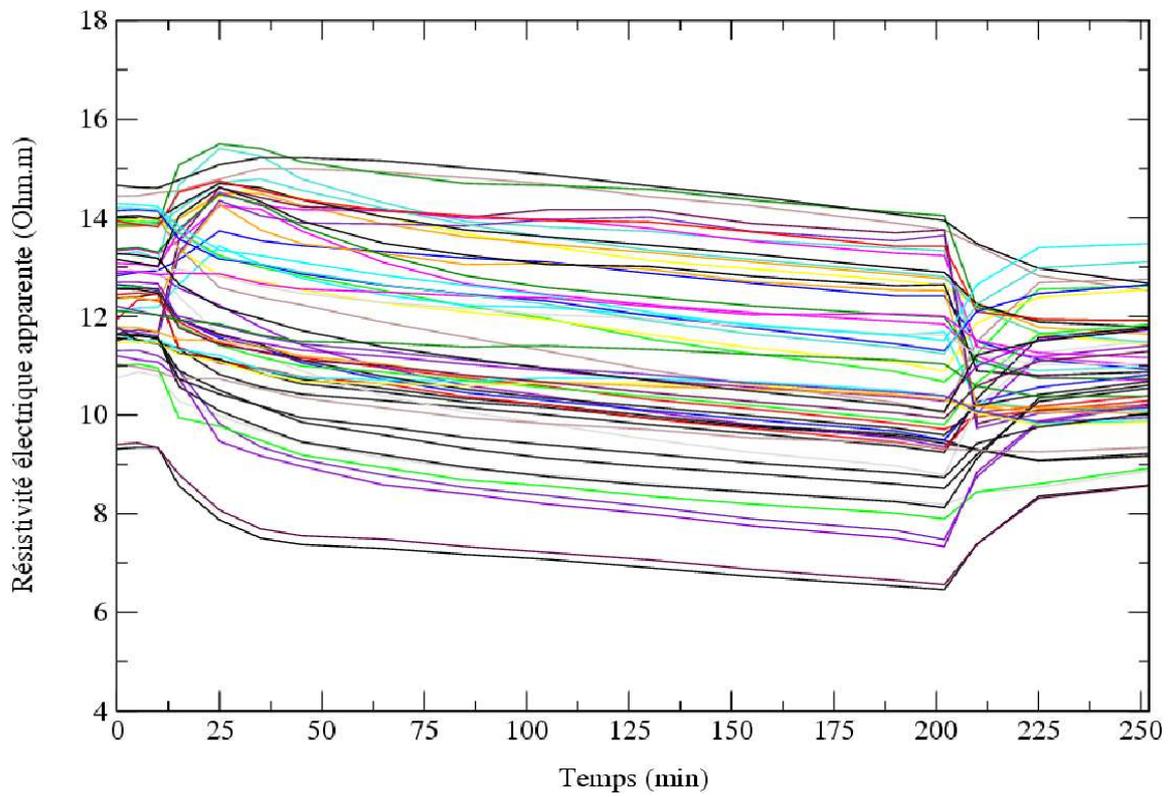


Figure 17. Résistivité électrique apparente des 54 quadripôles. Grignon 18-07-07.

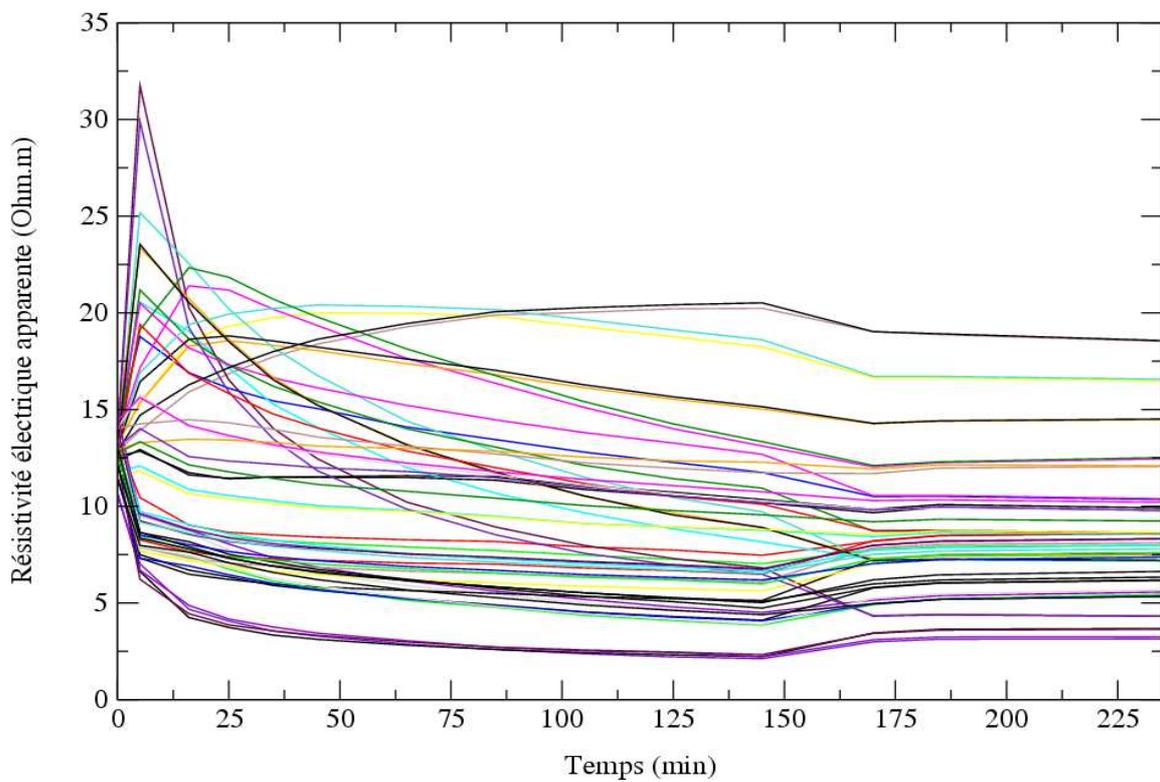


Figure 18. Résistivité électrique apparente des 54 quadripôles. Grignon 19-07-07.

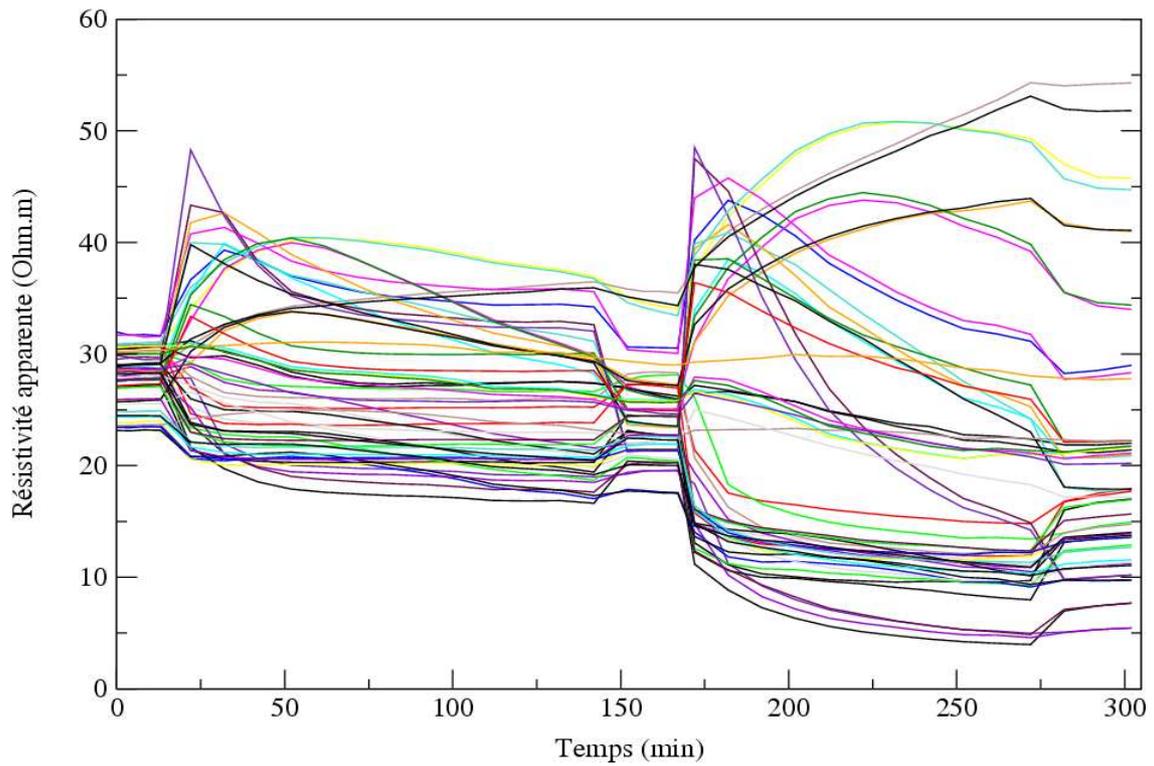


Figure 19. Résistivité électrique apparente des 54 quadripôles. Grignon 27-09-07.

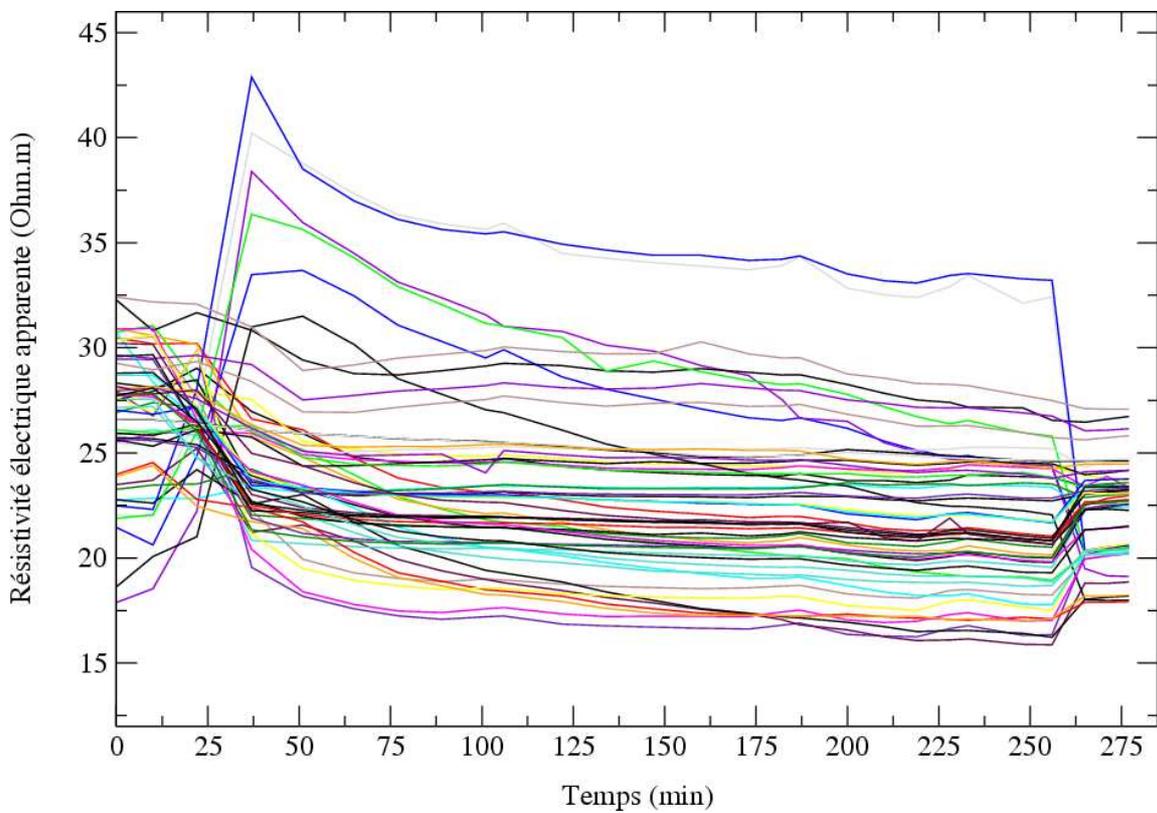


Figure 20. Résistivité électrique apparente des 54 quadripôles. Grignon 26-10-07.

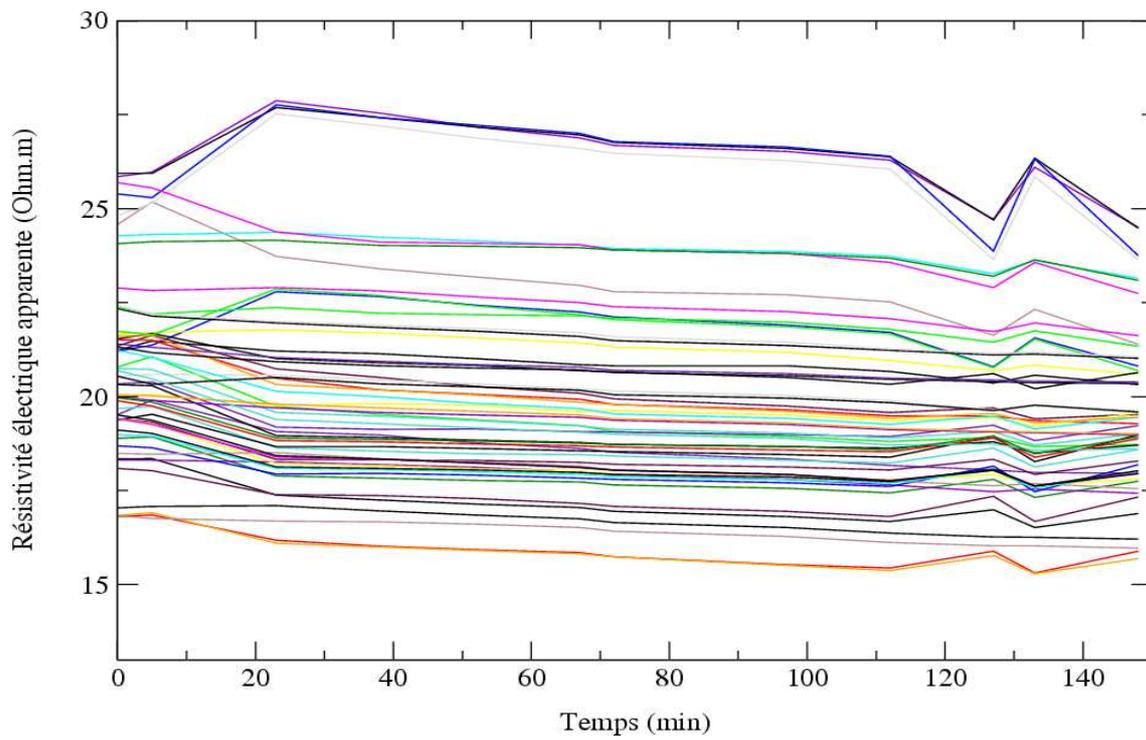


Figure 21. Résistivité électrique apparente des 54 quadripôles. Grignon 31-03-08, matin.

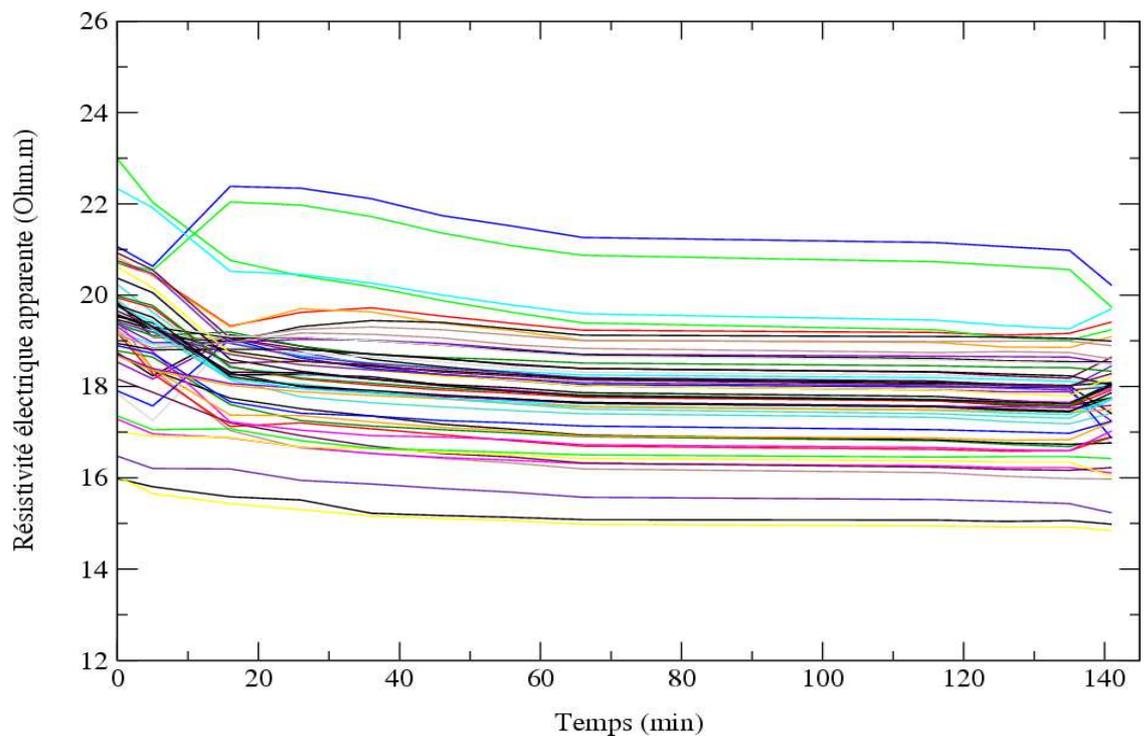


Figure 22. Résistivité électrique apparente des 54 quadripôles. Grignon 31-03-08, après-midi.

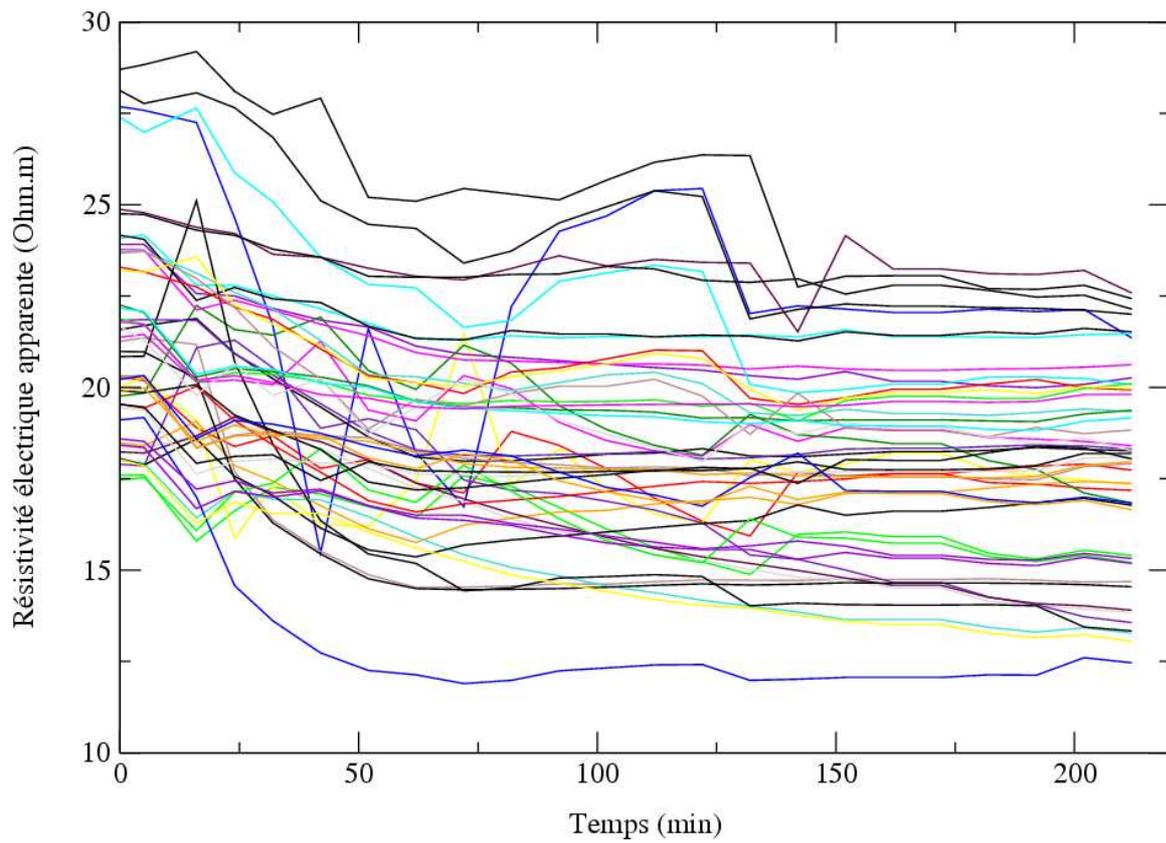


Figure 23. Résistivité électrique apparente des 54 quadripôles. Grignon 26-06-08.

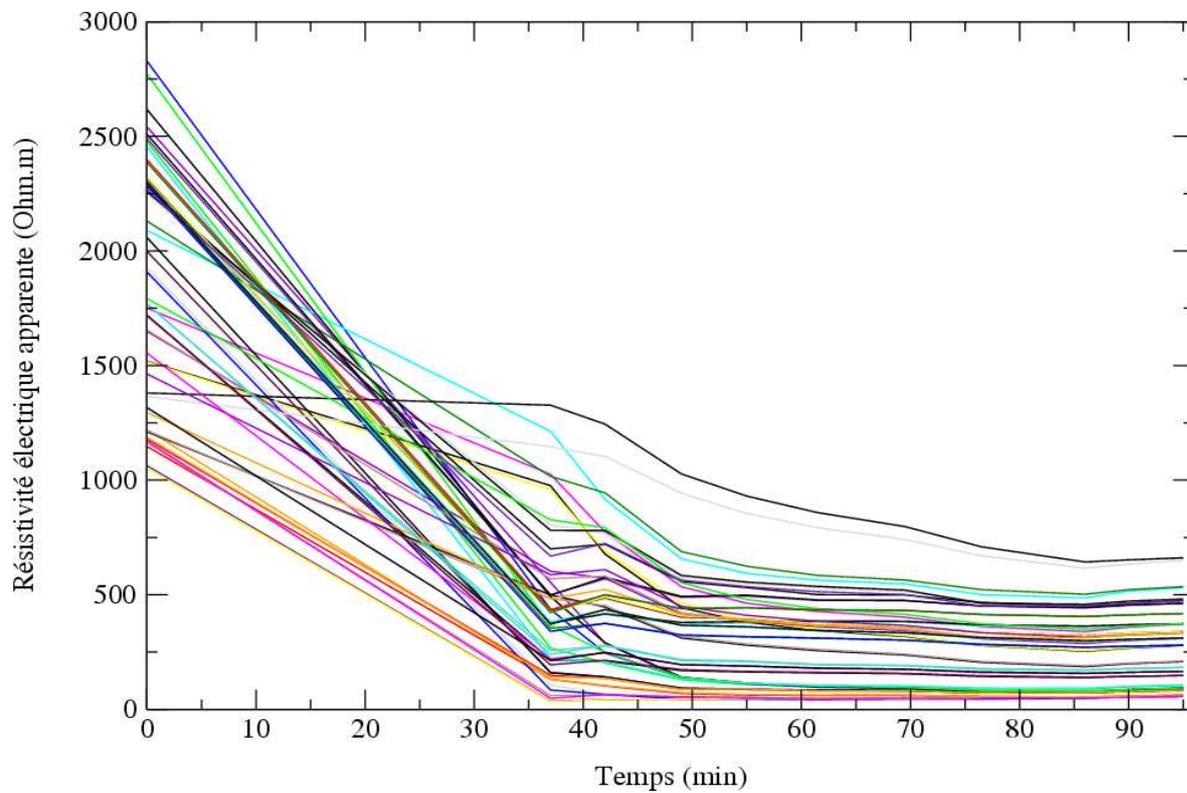


Figure 24. Résistivité électrique apparente des 54 quadripôles. Cernay 17-10-07.

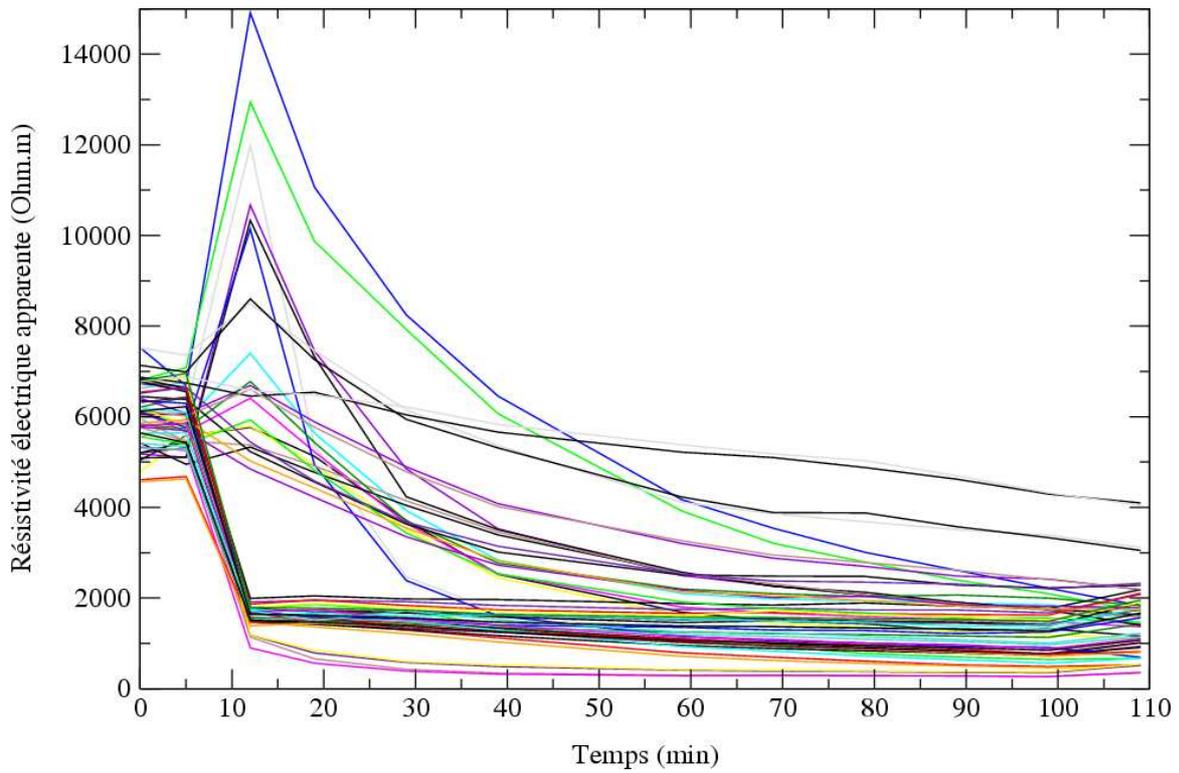


Figure 25. Résistivité électrique apparente des 54 quadripôles. Cernay 10-04-08.

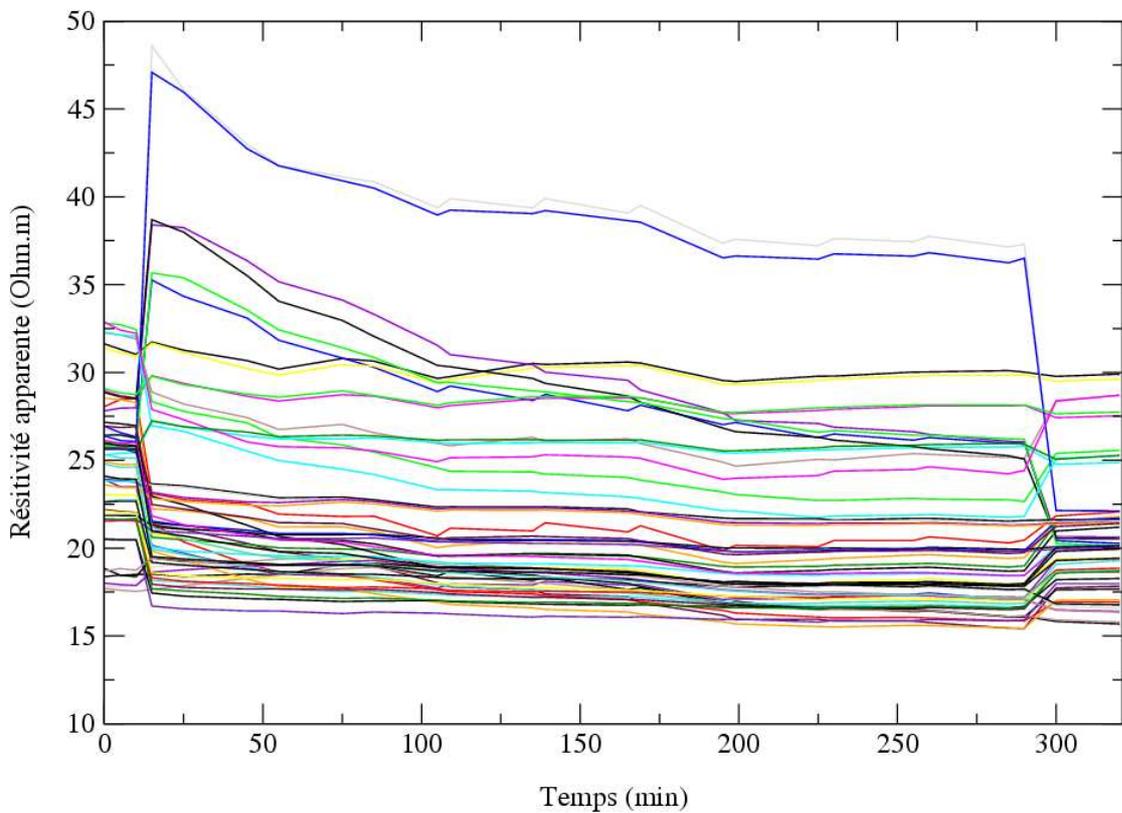


Figure 26. Résistivité électrique apparente des 54 quadripôles. Rambouillet 16-10-07.

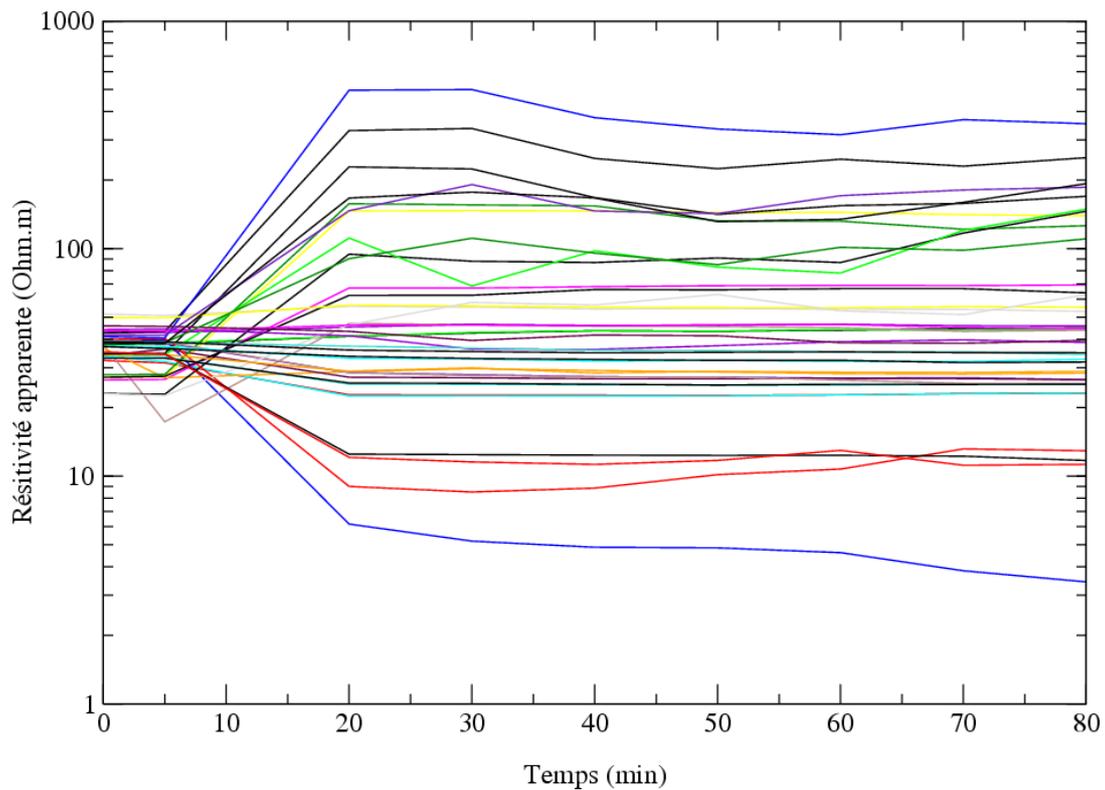


Figure 27. Résistivité électrique apparente des 39 quadripôles. Rambouillet 19-06-08. (15 quadripôles sont non utilisables car les erreurs de mesures sont trop importantes)

3.2.2.2. État transitoire

Pour toutes les expériences, dès le début de l'infiltration, l'évolution de la résistivité électrique apparente est brutale. Certains quadripôles enregistrent une baisse ou une hausse de la résistivité électrique apparente selon que leur sensibilité est positive ou négative par rapport à l'anomalie (c'est-à-dire le bulbe d'infiltration) qui se développe. En effet, il existe des zones de sensibilité négative dans le cas des dispositifs gradient et dipôle-dipôle.

A Grignon, si l'on compare les mesures réalisées le 18 et le 19 juillet 2007 (Figure 17 et Figure 18 respectivement), on observe le 19-07-07, alors que l'eau d'infiltration est plus minéralisée, une allure voisine de celle du 18-07-07, avec toutefois, pour certains quadripôles, une amplitude supérieure dans les contrastes de résistivité électrique apparente. Le 19-07-07, la résistivité électrique apparente initiale, comme pour le 18-07-07, est voisine de 13 Ω .m,

mais la gamme de variation est cette fois plus large (2,5 – 32 Ω .m contre une gamme 7-17 Ω .m pour le 18-07-07).

L'expérience du 27-09-07 réalisée sur le sol de Grignon, qui comporte deux phases d'infiltration distinctes séparées d'une pause pendant laquelle l'infiltromètre a été rempli à nouveau (Figure 19), montre bien l'effet de la minéralisation de l'eau : l'amplitude des variations de résistivité électrique apparente est plus importante lors de la seconde phase qui correspond à l'infiltration de l'eau plus conductrice. Lors des 2 arrêts de l'infiltration, entre les temps 142 min à 167 min, et après 272 min, on observe un saut de sens contraire au saut initial. Plusieurs explications peuvent être mises en avant pour expliquer ces sauts :

1. La «désaturation» du milieu peut expliquer le saut inverse. Le retrait de l'infiltromètre fait se vider très rapidement les macropores remplis d'eau et déclenche ainsi une baisse rapide de la teneur en eau.
2. La présence de l'infiltromètre pourrait modifier, par sa seule présence, les lignes de champ du courant électrique. Même pour les expériences où les pièces métalliques ont été remplacées par des pièces isolantes, la présence de l'infiltromètre et de l'eau contenue à l'intérieur, peut être une cause de ces variations brutales. Ainsi, lors de sa pose et de son retrait, il y aurait une variation brusque.

Il est possible que les phénomènes 1 et 2 se combinent.

L'expérience du 26-10-07 montre, aux instants initiaux qui précèdent l'infiltration, une variabilité importante des valeurs de résistivité électrique apparente (Figure 20), alors que, pour toutes les autres expériences, les mesures initiales montrent des résultats très proches. Peut-être que ce jour là, le prélèvement des cylindres (destinés à la teneur en eau initiale du sol), a perturbé les premières mesures de résistivité électrique.

Les expériences du 31-03-08 réalisées sur le sol de Grignon montrent des variations de résistivité électrique apparente au cours de l'infiltration beaucoup plus faibles que les précédentes (Figures 21 et 22) qui s'expliquent par des teneurs en eau initiales très élevées ($\theta_i=0,36 \text{ cm cm}^{-3}$).

L'expérience réalisée sur le sol de Cernay le 17-10-07 (Figure 24) pose plusieurs problèmes : Les valeurs de résistivité électrique apparente calculées grâce aux 54 quadripôles avant l'infiltration sont très dispersées (coefficient de variation μ/σ égal à 0,26) (Tableau 11). Lors de l'infiltration, les valeurs de résistivité électrique apparente sont décroissantes tout au long de l'infiltration pour tous les quadripôles (pas de saut positif de la valeur de résistivité électrique apparente au début de l'infiltration), ce qui n'est le cas pour aucune des autres

expériences. Ce résultat inattendu s'accorde cependant avant l'observation selon laquelle l'eau s'est infiltrée extrêmement rapidement, en dépit d'un potentiel bas imposé (-14 cm). Une fuite à la base de l'infiltromètre pourrait en être la cause.

A Cernay, lors de l'expérience du 10-04-08, les valeurs de résistivité électrique apparente initiale sont nettement moins dispersées qu'elles ne l'étaient le 17-10-07 (coefficient de variation μ/σ égal à 0,13). La résistivité électrique apparente décroît très rapidement dès les premières minutes d'infiltration (Figure 25). La décroissance est ensuite nettement plus faible (à partir de 12 min). Il n'était pas possible d'obtenir une infiltration plus lente car le potentiel imposé (-15 cm) est le plus faible potentiel que l'on puisse obtenir avec notre matériel. Cependant on peut imaginer que si l'on avait infiltré une eau beaucoup moins conductrice, l'évolution des valeurs de résistivité électrique apparente aurait été moins marquée.

A Rambouillet, le 16-10-07, on a observé comme à Grignon, un saut très marqué des valeurs de résistivité électrique apparentes dès le début de l'infiltration et un saut de sens contraire à la fin de l'infiltration (Figure 26). Cependant, pour certains quadripôles, les valeurs n'évoluent presque pas au cours de l'infiltration. Les quadripôles concernés ont des écartements très larges.

A Rambouillet, le 19-06-08, la qualité des mesures de résistivité électrique obtenues est très médiocre, c'est-à-dire que les valeurs mesurées par 15 quadripôles sont inutilisables car la variabilité sur la mesure est trop importante (en effet chaque mesure est répétée plusieurs fois afin d'obtenir une moyenne). Il est probable que ce problème d'extrême variabilité de la mesure (liée donc au dispositif expérimental) soit imputable à l'appareil. En effet ce jour là, alors que notre résistivimètre habituel était en réparation, nous avons utilisé un autre résistivimètre. Néanmoins, les mesures de résistivité électrique apparente obtenues montrent une évolution très particulière : certains quadripôles voient leur valeur décroître ou augmenter de façon vertigineuse (Figure 27), alors que pour d'autres, cette valeur n'évolue quasiment pas lors de l'infiltration (les valeurs qui n'évoluent que très peu correspondent à des quadripôles aux grands écartements, dont la mesure est peu sensible à la faible quantité d'eau infiltrée). Comme dans le cas de Cernay, l'évolution est très importante dans les premières minutes, et ralentit nettement par la suite. Cependant, le volume infiltré est dans le cas du sol argileux de Rambouillet beaucoup plus faible.

Des informations sur la sensibilité des différents quadripôles seront apportées lors de l'interprétation des inversions numériques. En effet lors de l'optimisation des valeurs de

sensibilité des mesures sont calculées par PEST, ce qui donne directement une information sur la sensibilité du modèle aux différents quadripôles utilisés.

3.2.3. Courbes de teneur en eau

Le sol de Grignon montre une courbe de teneur en eau volumique avec une pente assez constante (Figure 28) typique des sols limoneux.

- A pF 4,2, il reste, en volume, encore 19 % d'eau.
- La pente est très douce (paramètre n proche de 1,1)
- La teneur en eau volumique à saturation à pF 1 est environ égale à 0,38.

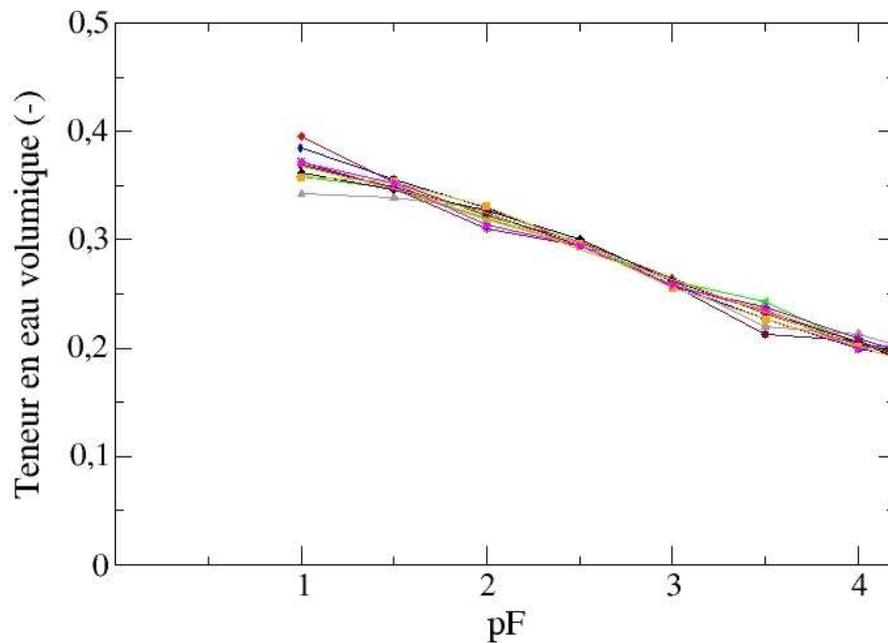


Figure 28. Courbes de teneur en eau volumique. Grignon. 10 échantillons.

Les courbes de teneur en eau réalisées sur les échantillons du sol de Cernay (9 échantillons) montrent une allure typique de sols sableux (Figure 29) :

- faible teneur en eau aux états secs : à partir de pF 2,5, le sable contient en volume moins de 5 % d'eau.
- cassure de la courbe assez franche aux alentours de pF 2 (-100 cm).
- teneur en eau à saturation proche de 45 %.

Pour le sol argileux de Rambouillet, l'ensemble des courbes (6 échantillons) montre une allure typique des sols argileux (Figure 30) :

- teneur en eau élevée aux états secs : à pF 4,2, le sol contient en volume encore environ 22 % d'eau.
- augmentation douce de la teneur en eau avec l'augmentation du potentiel jusqu'à une valeur de 35 % aux alentours de pF 2 (-100 cm).

Par ailleurs, entre pF 1 et la saturation, il y a une évolution de la teneur en eau volumique, ce qui signifie, que le sol contient des pores de diamètre équivalent supérieur à 300 μm .

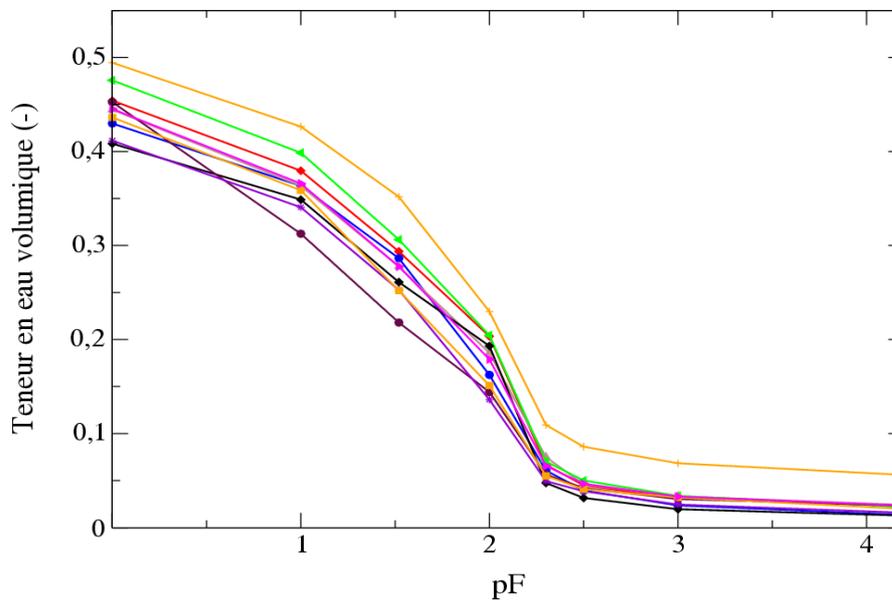


Figure 29. Courbes de teneur en eau volumique. Cernay. 9 échantillons.

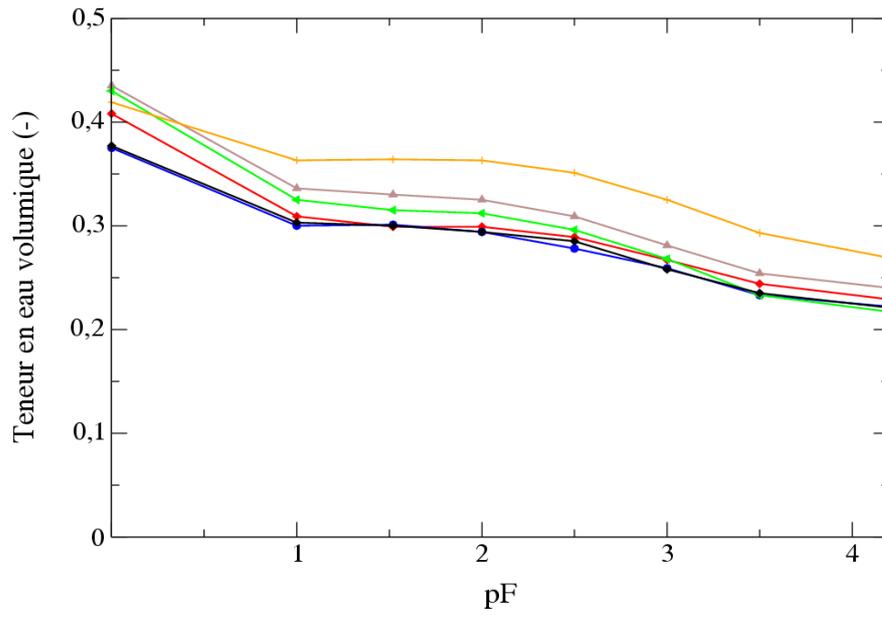


Figure 30. Courbes de teneur en eau volumique. Rambouillet. 6 échantillons.

3.3. Résultats des inversions des paramètres hydrodynamiques

Comme il a été constaté que les mesures sont entachées d'un effet lié à l'inhomogénéité du sol, on a décidé de travailler en «time-lapse». C'est le rapport entre la valeur à un instant donné et la valeur de résistivité électrique initiale qui est utilisée. En travaillant ainsi, on s'affranchit en grande partie des erreurs liées à l'inhomogénéité du sol et au système électrique (imprécision dans la localisation 3D des électrodes).

3.3.1. Sol limoneux : Grignon

Pour le sol de Grignon, on dispose de trois expériences correctes qui permettent de tenter une inversion des paramètres. Ce sont les expériences du 26-10-07 (Expérience 1 - E1), du 31-03-08 matin (Expérience 2 - E2), et du 26-06-08 (Expérience 3 - E3).

3.3.1.1. Valeur de la fonction objectif et RMSE

Les valeurs de la fonction objectif sont comprises pour les 4 scénarios des 3 expériences dans l'intervalle [0,22 – 4,09] ce qui est assez semblable aux valeurs obtenues lors des expérimentations numériques (Tableaux 12, 13 et 14). On constate que pour E1, ces valeurs sont les plus élevées, et sont comprises entre 2,9 et 4,09, que, pour E2, les valeurs de la fonction objectif sont comprises entre 0,22 et 0,25, alors que, pour E3, les valeurs de la fonction objectif sont comprises entre 1,00 et 1,18. Le fait que θ_r soit optimisé ou non n'a pas de conséquence sur ces valeurs, excepté pour E1 quand on ajuste D et R . Pour E2 et E3, l'optimisation de D et R n'influe pas sur la valeur de la fonction objectif.

Si l'on compare les RMSE (Root Mean Squared Error) obtenues lors des expérimentations numériques sur le sol limoneux, les valeurs obtenues sont très voisines de celles obtenues sur le terrain (sol de Grignon). Pour les 4 scénarios de E1, la RMSE est comprise entre 4,92 % et 6,72 %. Pour E2, la RMSE est comprise entre 2,10 % et 2,50 %, alors que, pour E3, la RMSE est comprise entre 5,49 % et 6,09 %.

Tableau 12. Résultats des estimations pour les 4 scénarios du sol de Grignon, le 26-10-07

	Valeur des paramètres et intervalle de confiance à 95%									FO	RMSE (%)
	θ_r (cm ³ cm ⁻³)	θ_s (cm ³ cm ⁻³)	α (cm ⁻¹)	n	K_s (cm min ⁻¹)	A	B	D (cm)	R		
Initial	0,000	0,430	0,036	1,560	0,036	1,403	-0,064	-	1		
Optimisés	-	0,416	0,049	1,120	0,094	1,294	0,381	-	-	3,04	4,87
Limite inf.	-	0,393	0,018	1,075	0,018	-17,140	-4,993	-	-		
Limite sup.	-	0,439	0,137	1,164	0,489	19,731	5,755	-	-		
Initial	0,050	0,430	0,036	1,560	0,036	1,403	-0,064	-	1		
Optimisés	0,144	0,412	0,053	1,188	0,052	1,379	0,341	-	-	3,01	4,75
Limite inf.	-0,080	0,386	0,007	1,047	0,006	-19,983	-4,905	-	-		
Limite sup.	0,368	0,438	0,377	1,329	0,427	22,741	5,587	-	-		
Initial	0,000	0,430	0,036	1,560	0,036	1,403	-0,064	4,000	2,000	2,90	4,92
Optimisés	-	0,406	0,039	1,111	0,079	1,252	0,740	1,310	1,255		
Limite inf.	-	0,349	0,003	1,040	0,003	-12,854	-7,292	0,002	0,157		
Limite sup.	-	0,463	0,449	1,183	2,022	15,358	8,771	733,290	2,353		
Initial	0,050	0,430	0,036	1,560	0,036	1,403	-0,064	4,000	2,000	4,09	6,72
Optimisés	0,170	0,380	0,057	1,161	0,077	1,141	1,025	1,123	1,591		
Limite inf.	-0,018	0,335	0,022	1,047	0,066	-2,470	-0,920	0,288	0,802		
Limite sup.	0,358	0,425	0,147	1,276	0,089	4,752	2,970	4,390	2,380		

Tableau 13. Résultats des estimations pour les 4 scénarios du sol de Grignon, le 31-03-08 matin

	Valeur des paramètres et intervalle de confiance à 95%									FO	RMSE (%)
	θ_r (cm ³ cm ⁻³)	θ_s (cm ³ cm ⁻³)	α (cm ⁻¹)	n	K_s (cm min ⁻¹)	A	B	D (cm)	R		
Initial	0,000	0,430	0,036	1,560	0,036	1,403	-0,064	-	1		
Optimisés	-	0,386	0,032	1,155	0,031	1,390	-0,276	-	-	0,25	2,50
Limite inf.	-	0,382	0,023	1,105	0,018	-4,270	-1,388	-	-		
Limite sup.	-	0,389	0,045	1,206	0,056	7,050	0,836	-	-		
Initial	0,050	0,430	0,036	1,560	0,036	1,403	-0,064	-	1		
Optimisés	0,245	0,387	0,082	1,284	0,028	1,395	-0,231	-	-	0,23	2,28
Limite inf.	0,010	0,376	0,029	0,634	0,001	-4,699	-1,274	-	-		
Limite sup.	0,479	0,395	0,229	1,935	1,063	7,489	0,811	-	-		
Initial	0,000	0,430	0,036	1,560	0,036	1,403	-0,064	4,000	2,000	0,23	2,35
Optimisés	-	0,385	0,055	1,096	0,100	1,752	-0,026	7,129	1,291		
Limite inf.	-	0,376	0,022	1,066	0,038	-14,797	-0,485	0,800	1,062		
Limite sup.	-	0,395	0,133	1,127	0,262	18,301	0,434	63,543	1,521		
Initial	0,050	0,430	0,036	1,560	0,036	1,403	-0,064	4,000	2,000	0,22	2,10
Optimisés	0,079	0,378	0,009	1,145	0,010	1,770	-0,184	7,947	1,375		
Limite inf.	-0,175	0,373	0,002	1,093	0,003	-26,625	-1,360	4,574	1,174		
Limite sup.	0,333	0,382	0,030	1,197	0,033	30,165	0,992	13,805	1,576		

Tableau 14. Résultats des estimations pour les 4 scénarios du sol de Grignon, le 26-06-08

	Valeur des paramètres et intervalle de confiance à 95%									FO	RMSE (%)
	θ_r (cm ³ cm ⁻³)	θ_s (cm ³ cm ⁻³)	α (cm ⁻¹)	n	K_s (cm min ⁻¹)	A	B	D (cm)	R		
Initial	0,000	0,430	0,036	1,560	0,036	1,403	-0,064	-	1		
Optimisés	-	0,305	0,023	1,065	0,137	1,190	0,025	-	-	1,00	5,49
Limite inf.	-	0,298	0,005	1,022	0,002	-11,566	-0,185	-	-		
Limite sup.	-	0,313	0,340	1,109	9,159	13,946	0,235	-	-		
Initial	0,050	0,430	0,036	1,560	0,036	1,403	-0,064	-	1		
Optimisés	0,043	0,311	0,024	1,090	0,096	1,420	0,074	-	-	1,03	5,65
Limite inf.	0,030	0,294	0,004	1,058	0,007	-1,957	-0,055	-	-		
Limite sup.	0,057	0,329	0,158	1,121	1,258	4,795	0,203	-	-		
Initial	0,000	0,430	0,036	1,560	0,036	1,403	-0,064	1,000	2,000		
Optimisés	-	0,349	0,044	1,154	0,101	2,268	0,089	0,627	0,845	1,18	6,09
Limite inf.	-	0,307	0,016	1,098	0,038	-44,200	-1,709	-2,109	0,658		
Limite sup.	-	0,391	0,119	1,209	0,268	48,739	1,886	3,362	1,032		
Initial	0,050	0,430	0,036	1,560	0,036	1,403	-0,064	4,000	2,000	1,08	5,80
Optimisés	0,100	0,340	0,053	1,173	0,112	1,002	0,001	4,490	0,791		
Limite inf.	0,091	0,308	0,016	1,092	0,014	-6,046	-0,016	0,386	0,570		
Limite sup.	0,109	0,373	0,176	1,255	0,890	8,050	0,018	52,294	1,011		

Ces similitudes d'ordre de grandeur des valeurs de la fonction objectif et de la RMSE, entre les expériences de terrain et les expériences numériques, semblent indiquer, à première vue, que les erreurs simulées lors des expériences numériques ont été choisies.

3.3.1.2. Estimations des paramètres et intervalles de confiance

Si l'on regarde dans le détail, il apparaît que l'intervalle de confiance à 95 % délivré par PEST est très variable selon le paramètre, l'expérience et le scénario :

. θ_r

Les intervalles de confiances sont extrêmement variables pour ce paramètre : Pour E1, les intervalles sont très importants ($[-0,08 - 0,368]$ et $[-0,018 - 0,358]$ pour les scénarios 2 et 4 respectivement) tout comme pour E2 ($[0,01 - 0,479]$ et $[-0,175 - 0,333]$ pour les scénarios 2 et 4 respectivement), alors que, pour E3, les intervalles de confiance sur θ_r sont très restreints ($[0,03 - 0,057]$ et $[0,091 - 0,109]$ pour les scénarios 2 et 4 respectivement). Ces résultats sont cohérents avec les coefficients de corrélation impliquant θ_r qui sont élevés lors de E1 et E2 (à l'exception du scénario 4) et faibles lors de E3 (Tableaux 16, 17, 18).

. θ_s

Pour toutes les expériences, les intervalles délivrés par PEST sur ce paramètre sont étroits. Par exemple, lors de E1, pour le scénario 1, l'intervalle de confiance est $[0,393 - 0,439]$. Dans le cas de l'expérience E2, pour le scénario 1, cet intervalle est encore plus étroit $[0,382 - 0,389]$. En revanche l'optimisation de D et R conduit pour E1 et E3 à un élargissement de l'intervalle (par exemple, pour le scénario 4, ces intervalles valent $[0,335 - 0,425]$ et $[0,308 - 0,373]$ respectivement) ce qui n'est pas le cas lors de E2 ($[0,373 - 0,382]$ pour le scénario 4).

θ_s est optimisé à une valeur voisine de $0,40 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ pour E1 (relativement invariante selon le scénario), et à une valeur de $0,38 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ pour E2 (complètement invariante selon le scénario). Pour E3, θ_s est optimisé à une valeur de $0,31 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ pour les scénarios 1 et 2, et à une valeur de $0,345 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ pour les scénarios 3 et 4.

. α

La gamme d'intervalles de confiance pour ce paramètre est très variable : dans certains cas, les limites sont à environ $\pm 50\%$ de la valeur du paramètre (par exemple dans le cas du

scénario 1 de E2), alors que dans d'autres cas les limites sont à \pm un ordre de grandeur de la valeur du paramètre (scénarios 2 et 3 de E1). Dans le cas où α est estimé avec une large incertitude, on observe de hautes corrélations avec K_s (par exemple 0,998 et 0,981 pour les scénarios 1 et 2 de E3 respectivement).

En comparant au sein d'une même expérience les valeurs obtenues, on observe que :

- pour E1, les valeurs obtenues pour les 4 scénarios sont comprises entre $0,039 \text{ cm}^{-1}$ et $0,057 \text{ cm}^{-1}$,
- pour E2, les valeurs obtenues pour les 4 scénarios sont comprises entre $0,009 \text{ cm}^{-1}$ et $0,082 \text{ cm}^{-1}$ (pour les scénarios 4 et 2 respectivement),
- pour E3, les valeurs obtenues pour les 4 scénarios sont comprises entre $0,023 \text{ cm}^{-1}$ et $0,053 \text{ cm}^{-1}$.

A l'exception des scénarios 2 et 4 de E2, toutes les optimisations (ce qui représente donc 10 scénarios) mènent vers une valeur de α comprise entre $0,023 \text{ cm}^{-1}$ et $0,057 \text{ cm}^{-1}$.

Ces valeurs s'accordent bien avec celle de Coquet et al. (2005c) qui estiment que α est égal à $0,035 \text{ cm}^{-1}$. Ce résultat est important car il montre qu'en dépit du fait que les expériences ont eu lieu à des dates différentes, à des endroits différents sur la parcelle, et avec des valeurs de teneur en eau initiale différentes, le paramètre α est estimé à une valeur relativement invariante.

. K_s

La gamme d'intervalles de confiance sur K_s est, comme pour α très variable. Par exemple pour le scénario 2 et 4 de E1 les intervalles valent $[0,006 - 0,427]$ et $[0,066 - 0,089]$, respectivement. Les valeurs estimées lors de ces 2 scénarios sont $0,052 \text{ cm.min}^{-1}$ et $0,077 \text{ cm.min}^{-1}$.

En comparant au sein d'une même expérience les valeurs obtenues lors des 4 scénarios, on observe que :

- pour E1, les valeurs obtenues pour les 4 scénarios sont comprises entre $0,052 \text{ cm.min}^{-1}$ et $0,094 \text{ cm.min}^{-1}$,
- pour E2, les valeurs obtenues pour les 4 scénarios sont comprises entre $0,010 \text{ cm.min}^{-1}$ et $0,100 \text{ cm.min}^{-1}$ (ces deux valeurs extrêmes étant obtenues pour les scénarios 3 et 4 alors que les scénarios 1 et 2 montrent des valeurs beaucoup plus proches l'une de l'autre),

- pour E3, les valeurs obtenues pour les 4 scénarios sont comprises entre $0,096 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$ et $0,137 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$.

Les différences obtenues ainsi au niveau de la conductivité hydraulique à saturation peuvent s'expliquer par la variabilité spatiale de cette propriété du sol. En effet, des coefficients de variation pour K_s compris entre 35% to 135% sont usuels (McBratney and Mulla, 2002).

Par ailleurs les valeurs obtenues sont largement inférieures à celle mesurée par Coquet et al. (2005c) qui obtiennent à l'aide d'un cylindre soumis à évaporation (méthode WIND) une valeur de K_s égale à $0,493 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$ (Tableau 15). Ce résultat peut être attribué à la différence de méthode employée (évaporation/infiltration, laboratoire/*in situ*).

Tableau 15. Valeurs des paramètres estimés à partir de méthodes différentes

Sol	Méthode	$\theta_r(\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3})$	$\theta_s(\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3})$	$\alpha (\text{cm}^{-1})$	n	$K_s (\text{cm min}^{-1})$
limoneux (Grignon)	Presses de Richards	0,000	0,377	0,035	1,104	-
	Wind (Coquet et al, 2005)	-	-	-	-	0,493
sableux (Cernay)	Presses de Richards (10/04/2008)	0,014	0,404	0,020	2,312	-
	Multipotentiel	-	-	-	-	0,185
argileux (Rambouillet)	Presses de Richards (16/10/2007)	0,217	0,321	0,003	1,507	-

. *n*

A l'exception du scénario 2 de E2, les intervalles de confiance sur l'estimation de n sont toujours très étroits (environ $\pm 10 \%$ de la valeur du paramètre) et la valeur obtenue est invariablement voisine de 1,1, qui est la valeur estimée par Coquet et al. (2005c) (Tableau 15). Comme pour α , ceci conforte la confiance que l'on peut avoir dans ces résultats, et plus généralement dans la méthode.

. *A* et *B*

Les valeurs optimisées de ces paramètres montrent de grandes différences en fonction de l'expérience (surtout pour B dont la valeur varie entre $-0,276$ et $1,025$). Le paramètre A est estimé selon les scénarios et les expériences avec des intervalles de confiance très variables ($-26,6 - 30,1$ pour le scénario 4 de E2 ou $-2,0 - 4,8$ pour le scénario 2 de E3). Les intervalles de confiance sur B sont environ à $\pm 1000 \%$ de la valeur du paramètre. Manifestement la

confiance que l'on peut avoir dans l'estimation de A et B est très limitée. Ces résultats coïncident avec ceux de la partie 2, et à la vue de l'estimation des paramètres de Mualem-van Genuchten, il semble que des conclusions similaires s'imposent, à savoir, que l'optimisation de A et B , même incorrecte, ne nuit pas à l'obtention de paramètres hydrodynamiques corrects

. D et R

Pour les expériences E1 et E2, les scénarios 3 et 4 montrent des estimations très proches (donc le fait d'estimer θ_r n'a que peu d'impact sur l'estimation de D). En revanche les valeurs obtenues sont très différentes en fonction de l'expérience (D vaut 1,31 cm et 1,23 cm pour les scénarios 3 et 4 de E1, alors que D vaut 7,13 cm et 7,95 cm pour les scénarios 3 et 4 de E2). Bien que ces valeurs soient dans l'ordre de grandeur attendu, il est difficile de juger de leur pertinence car nous n'avons pas de mesures alternatives à comparer. Toutefois, les intervalles de confiance sont importants.

Pour l'expérience E3, les valeurs obtenues pour les scénarios 3 et 4 sont très contrastées (0,63 cm et 4,49 cm respectivement), et de plus les intervalles de confiance sont à nouveau très larges. L'estimation de ce paramètre n'est donc pas satisfaisante pour cette expérience et, dans une plus large mesure, semble peu fiable.

L'optimisation de R semble plus convaincante que celle de D , car les intervalles de confiance sont nettement plus étroits. Ainsi, pour les scénarios 3 et 4 de E1, ces intervalles sont [0,16 – 2,35] et [0,80 – 2,38], alors que, pour E2, ces mêmes intervalles sont [1,06 – 1,52] et [1,17 – 1,58], et que, pour E3, ils valent [0,67 – 1,03] et [0,57 – 1,01] respectivement.

Les valeurs estimées lors de ces 3 expériences sont assez peu différentes de 1 (pour $R=1$ la conductivité électrique de l'eau infiltrée est égale à celle de l'eau présente initialement dans le sol), ce qui a posteriori peut à la fois justifier le choix de ne pas optimiser D et R pour les scénarios 1 et 2, et en même temps pourrait expliquer que la dispersivité D est difficilement inversable. En effet, si l'on infiltre une eau dont la conductivité est identique à celle du sol, alors aucun gradient de concentration ionique n'existe dans le sol, et donc il n'y a aucune possibilité d'estimer la dispersivité.

3.3.1.3. Corrélations de paramètres

Les matrices de corrélations obtenues ont certaines similitudes avec celles obtenues lors des expériences numériques, en montrant des corrélations importantes entre K_s et α et entre A et B (Tableaux 16, 17 et 18).

On observe en général que plus le nombre de paramètres optimisés est important, moins les coefficients de corrélations sont élevés. Par exemple pour E3 (Tableau 18), alors que la corrélation entre α et K_s vaut 0,998 dans le cas du scénario 1, cette valeur décroît à 0,981 pour le scénario 2, à 0,983 pour le scénario 3, et à 0,943 pour le scénario 4. De même pour E1 (Tableau 16), le coefficient de corrélation entre A et B vaut 0,999 pour le scénario 2, et décroît à 0,956 pour le scénario 3, et à 0,469 pour le scénario 4.

Le paramètre θ_r montre parfois des corrélations non négligeables avec les paramètres α , n et K_s . Par exemple pour E1, pour les scénarios 2 et 4, le coefficient de corrélation entre θ_r et n vaut 0,871 et 0,768 respectivement.

Comme pour θ_r , la corrélation de θ_s avec les autres paramètres est assez variable selon les expériences et les scénarios. Alors que, pour E3 et pour le scénario 3, les coefficients de corrélation entre θ_s et α , θ_s et n , et θ_s et K_s valent respectivement 0,991, 0,964 et 0,954, ces mêmes coefficients ne valent que 0,642, 0,567 et 0,398 pour le scénario 3 de E1.

Les paramètres A et B ont des coefficients de corrélations importants entre eux, mais, en revanche, sont relativement indépendants des autres paramètres (avec α , n , θ_r , θ_s , K_s , D et R les coefficients de corrélations sont toujours inférieurs à 0,6).

Les valeurs des coefficients de corrélation impliquant les paramètres D et R sont comprises pour les 3 expériences (en valeur absolue) entre 0,004 et 0,862, ce qui indique des corrélations importantes quelquefois, mais n'interdit pas a priori une inversion correcte de leur valeur.

Tableau 16. Matrices des coefficients de corrélation des paramètres pour les 4 scénarios du sol de Grignon, le 26-10-07

Scénario 1	θ_s	α	n	K_s	A	B	D	R
θ_s		0,091	0,743	-0,184	-0,075	-0,036	-	-
α			-0,578	0,961	0,015	0,012	-	-
n				-0,780	-0,070	-0,038	-	-
K_s					0,035	0,022	-	-
A						0,999	-	-
Scénario 2	θ_s	α	n	K_s	A	B	D	R
θ_r	0,051	0,751	0,871	0,387	-0,025	-0,024	-	-
θ_s		0,334	0,264	0,223	-0,063	-0,019	-	-
α			0,463	0,882	-0,044	-0,034	-	-
n				-0,010	-0,030	-0,017	-	-
K_s					-0,033	-0,029	-	-
A						0,999	-	-
Scénario 3	θ_s	α	n	K_s	A	B	D	R
θ_s		0,642	0,567	0,398	0,073	-0,090	-0,330	-0,679
α			-0,263	0,959	0,083	0,005	-0,183	-0,362
n				-0,526	0,003	-0,119	-0,219	-0,466
K_s					0,073	0,040	-0,096	-0,181
A						0,956	-0,103	-0,143
B							0,145	0,145
D								0,862
Scénario 4	θ_s	α	n	K_s	A	B	D	R
θ_r	-0,466	0,759	0,768	-0,060	0,175	0,148	-0,437	0,095
θ_s		0,212	0,206	-0,267	0,207	-0,348	0,095	-0,699
α			0,994	-0,154	0,342	-0,096	-0,421	-0,405
n				-0,251	0,344	-0,089	-0,418	-0,401
K_s					-0,129	0,045	-0,004	0,221
A						0,469	-0,334	-0,556
B							-0,031	0,405
D								0,361

Tableau 17. Matrices des coefficients de corrélation des paramètres pour les 4 scénarios du sol de Grignon, le 31-03-08 matin

Scénario 1	θ_s	α	n	K_s	A	B	D	R
θ_s		0,578	0,734	-0,317	-0,209	0,244	-	-
α			-0,072	0,568	-0,003	0,030	-	-
n				-0,862	-0,285	0,304	-	-
K_s					0,233	-0,235	-	-
A						-0,999	-	-
Scénario 2	θ_s	α	n	K_s	A	B	D	R
θ_r	-0,239	-0,111	0,983	-0,929	-0,170	0,176	-	-
θ_s		0,942	-0,278	0,494	-0,023	0,193	-	-
α			-0,206	0,442	0,026	0,148	-	-
n				-0,969	-0,207	0,201	-	-
K_s					0,196	-0,146	-	-
A						-0,983	-	-
Scénario 3	θ_s	α	n	K_s	A	B	D	R
θ_s		0,934	0,271	0,676	0,071	-0,093	-0,259	-0,753
α			-0,077	0,891	0,080	-0,101	-0,203	-0,668
n				-0,520	-0,015	0,005	-0,170	-0,297
K_s					0,076	-0,089	-0,096	-0,436
A						-0,884	-0,078	-0,093
B							0,135	0,287
D								0,643
Scénario 4	θ_s	α	n	K_s	A	B	D	R
θ_r	-0,114	0,662	0,070	0,492	-0,292	0,326	-0,098	0,090
θ_s		0,597	0,307	0,447	-0,061	0,117	0,202	-0,228
α			-0,014	0,890	-0,292	0,354	0,176	-0,055
n				-0,460	0,056	-0,034	-0,259	-0,148
K_s					-0,271	0,317	0,294	0,003
A						-0,968	0,074	0,056
B							0,020	0,112
D								0,598

Tableau 18. Matrices des coefficients de corrélation des paramètres pour les 4 scénarios du sol de Grignon, le 26-06-08

Scénario 1	θ_s	α	n	K_s	A	B	D	R
θ_s		0,355	0,005	0,292	-0,060	0,170	-	-
α			-0,930	0,998	0,040	0,032	-	-
n				-0,953	-0,064	0,031	-	-
K_s					0,045	0,020	-	-
A						0,941	-	-
Scénario 2	θ_s	α	n	K_s	A	B	D	R
θ_r	0,162	0,276	0,155	0,240	0,078	0,049	-	-
θ_s		0,726	0,587	0,583	0,401	0,801	-	-
α			-0,095	0,981	0,309	0,483	-	-
n				-0,286	0,216	0,561	-	-
K_s					0,255	0,354	-	-
A						0,743	-	-
Scénario 3	θ_s	α	n	K_s	A	B	D	R
θ_s		0,991	0,964	0,954	0,018	0,033	-0,141	-0,677
α			0,932	0,983	0,019	0,033	-0,137	-0,670
n				0,852	0,020	0,033	-0,139	-0,660
K_s					0,017	0,032	-0,129	-0,642
A						0,997	0,079	-0,159
B							0,050	-0,124
D								-0,399
Scénario 4	θ_s	α	n	K_s	A	B	D	R
θ_r	0,110	0,544	-0,403	0,611	0,033	0,085	0,229	-0,131
θ_s		0,634	0,633	0,341	-0,217	-0,091	-0,151	-0,766
α			-0,191	0,943	-0,078	0,059	0,121	-0,454
n				-0,508	-0,196	-0,174	-0,322	-0,504
K_s					-0,002	0,111	0,215	-0,226
A						0,685	-0,142	0,280
B							0,001	0,193
D								-0,388

Optimiser ou ne pas optimiser θ_r ?

Les résultats sont mitigés :

- pour E1, si l'on compare les scénarios 1 et 2, il apparaît que la valeur optimisée des paramètres varie peu, excepté pour K_s , dont l'intervalle de confiance est plus étroit pour le scénario 1. Or la valeur de θ_r est très incertaine, donc dans ce cas il ne paraît pas judicieux d'optimiser θ_r . En revanche, si l'on compare les scénarios 3 et 4, les intervalles de confiance

sur les valeurs estimées des paramètres sont plus resserrés et ceci est particulièrement vrai pour K_s . Donc, pour inverser correctement les paramètres D et R , il se pourrait qu'il faille également inverser θ_r . En revanche l'estimation du paramètre lui-même est complètement incertaine, et les valeurs de FO et de la RMSE sont plus élevées pour le scénario 4 que pour le scénario 3.

- pour E2, si l'on compare les scénarios 1 et 2, il apparaît que les valeurs obtenues sont assez semblables excepté pour α qui a dans le scénario 2 une valeur différente de toutes les celles obtenues lors des autres expériences et scénarios ($0,082 \text{ cm}^{-1}$). Les résultats semblent moins bons ($n = 1,284$ est une valeur sensiblement différente de celles obtenues dans les autres scénarios et expériences) lorsque θ_r est optimisé. Si l'on observe les résultats du scénario 4, il semble que l'inversion de θ_r soit préjudiciable, car α et K_s sont optimisés à des valeurs très basses et largement différentes de celles obtenues par ailleurs.

- pour E3, dans le scénario 2, θ_r est optimisé avec un intervalle de confiance étroit. De plus son optimisation montre, en comparaison du scénario 1, un intervalle de confiance plus étroit sur l'estimation des paramètres α , K_s , A , et B . Par ailleurs, il apparaît que la valeur des estimations sur les paramètres α , K_s , et n des scénarios 3 et 4 est relativement insensible au fait que θ_r soit estimé ou non.

A l'aide de ces résultats, très contrastés selon l'expérience, il ne paraît possible de répondre catégoriquement à la question du bien fondé, dans le cadre de nos expériences, de l'estimation de θ_r .

3.3.2. Sol sableux : Cernay-la-ville

3.3.2.1. Valeur de la fonction objectif et RMSE

L'expérience du 10-04-2008 montre des résultats très contrastés selon que le paramètre θ_r est optimisé (scénarios 2 et 4) ou non (scénarios 1 et 3) (Tableau 19). Le scénario 2 avec une FO égale à 520 et une RMSE égale à 41 % montre une optimisation défailante. Pour les 3 autres scénarios, les valeurs de FO, comprises entre 8,9 et 10,1, et les valeurs de RMSE, comprises entre 6,4 % et 8,7 % sont légèrement supérieures à celles des expériences menées sur le sol limoneux, mais restent dans un ordre de grandeur comparable.

3.3.2.2. Estimations des paramètres et intervalles de confiance

. θ_s

Le paramètre θ_s montre (à l'exception du scénario 2 qui est un échec) des valeurs comprises dans l'intervalle [0,405-0,463]. Ces valeurs sont peu différentes de celles obtenues sur presses de Richards (0,404 cm³.cm⁻³). Cependant les intervalles de confiances sont larges et la précision de l'estimation est moins bonne que celle obtenue, en général, lors des expériences menées sur le sol limoneux.

. α

Les estimations du paramètre α sont, pour les scénarios 1, 3, et 4, comprises dans l'intervalle [0,068 - 0,081]. Les intervalles de confiance sont assez étroits (et ce, en particulier pour le scénario 3, avec un intervalle de confiance égal à [0,068 – 0,098]). Les estimations de ce paramètre semblent ainsi fiables, en dépit de corrélations importantes avec les paramètres K_s et θ_s .

. n

Les estimations du paramètre n sont pour les scénarios 1, 3, et 4 comprises dans l'intervalle [2,35 – 2,99]. Les intervalles se situent à + et – 20 % de la valeur du paramètre ce qui donne une assez bonne confiance dans les valeurs estimées. C'est le scénario 3, avec la valeur n égale à 2,48 qui possède l'intervalle de confiance le plus étroit [2,12 – 2,85].

. K_s

Les estimations du paramètre K_s sont, pour les scénarios 1, 3, et 4, comprises dans l'intervalle [0,28 – 0,96] ce qui montre une grande variabilité de la valeur estimée en fonction du scénario suivi.

Si l'on compare les scénarios 3 et 4, il semble que l'optimisation de θ_r soit préjudiciable à la précision de l'estimation sur K_s (l'intervalle de confiance est plus large pour le scénario 4).

La valeur obtenue par extrapolation des données d'infiltrométrie multipotentielle est égale à 0,185 cm.min⁻¹, et diffère donc sensiblement des valeurs obtenues pour les scénarios 3 et 4, mais peu de celle obtenue pour le scénario 1 (0,28 cm.min⁻¹). Il semblerait donc qu'on ne peut avoir qu'une confiance modérée dans la valeur estimée de K_s lors de ces inversions.

A* et *B

Ces paramètres montrent, pour les scénarios 1, 2, et 4, des valeurs estimées très semblables. Toutefois les intervalles de confiance sont, comme lors des expériences numériques et lors des expériences de terrain menées sur le sol limoneux, très larges.

D* et *R

Les scénarios 3 et 4 mènent à des estimations de la dispersivité assez différentes (3,69 cm et 2,43 cm respectivement) avec des intervalles de confiance larges pour le scénario 3 [1,57 – 8,69] et extrêmement large pour le scénario 4 [0,08 – 73,8].

Les scénarios 3 et 4 donnent des estimations de R voisines (2,11 et 1,95, respectivement), cependant les intervalles de confiance sur ce paramètre sont larges ([0,96 – 3,28] et [0,54 – 3,37] respectivement).

Les résultats de cette optimisation montrent que le scénario 3 est de loin le plus efficace pour obtenir une estimation avec de bons intervalles de confiance. Les paramètres hydrodynamiques, à l'exception de K_s et D , sont estimés dans ce scénario avec une très bonne confiance. La différence obtenue lors de l'inversion avec les résultats d'infiltrométrie multipotentielle a pour causes à la fois la différence de méthode employée dans l'estimation du paramètre, et la variabilité spatiale du paramètre. Les incertitudes sur l'estimation des paramètres de Rhoades et de la dispersivité sont larges.

3.3.2.3. Corrélations de paramètres

Pour les 4 scénarios, de très fortes corrélations existent entre les paramètres K_s , θ_r , et α (Tableau 20). De même A et B montrent une corrélation très importante, voisine de -0,99 pour les scénarios 1, 2, et 4, et égale à -0,94 pour le scénario 3.

Tableau 19. Résultats des estimations pour les 4 scénarios du sol de Cernay, le 10-04-08

	Valeur des paramètres et intervalle de confiance à 95%									FO	RMSE (%)
	θ_r (cm ³ cm ⁻³)	θ_s (cm ³ cm ⁻³)	α (cm ⁻¹)	n	K_s (cm min ⁻¹)	A	B	D (cm)	R		
Initial	0,000	0,450	0,145	2,680	0,495	1,210	0,132	-	1		
Optimisés	-	0,405	0,068	2,344	0,280	1,260	-0,075	-	-	10,050	8,66
Limite inf.	-	0,208	0,031	1,890	0,167	-7,207	-0,583	-	-		
Limite sup.	-	0,603	0,145	2,799	4,703	9,727	0,432	-	-		
Initial	0,010	0,450	0,145	2,680	0,495	1,210	0,132	-	1		
Optimisés	0,019	0,550	0,030	1,920	0,030	1,000	-3,000	-	-	520,400	40,88
Limite inf.	-0,756	-0,270	0,000	-0,715	0,000	-12,370	-43,162	-	-		
Limite sup.	0,793	1,370	92,500	4,557	227521	14,372	37,163	-	-		
Initial	0,000	0,450	0,145	2,680	0,495	1,210	0,132	4,000	2,000	9,882	6,920
Optimisés	-	0,463	0,081	2,485	0,610	1,241	-0,044	3,688	2,114		
Limite inf.	-	0,406	0,068	2,118	0,290	-1,651	-0,150	1,566	0,957		
Limite sup.	-	0,520	0,098	2,852	1,280	4,133	0,062	8,688	3,271		
Initial	0,010	0,450	0,145	2,680	0,495	1,210	0,132	4,000	2,000	8,890	6,42
Optimisés	0,050	0,412	0,076	2,991	0,512	1,330	-0,055	2,433	1,952		
Limite inf.	0,002	0,205	0,044	2,129	0,036	-7,408	-0,432	0,080	0,540		
Limite sup.	0,098	0,618	0,132	3,853	7,237	10,069	0,321	73,849	3,364		

Tableau 20. Matrices des coefficients de corrélation des paramètres pour les 4 scénarios du sol de Cernay, le 10-04-08

Scénario 1	θ_s	α	n	K_s	A	B	D	R
θ_s		0,991	-0,859	0,990	0,026	-0,026	-	-
α			-0,892	1,000	0,027	-0,028	-	-
n				-0,892	-0,013	0,013	-	-
K_s					0,027	-0,028	-	-
A						-1,000	-	-
Scénario 2	θ_s	α	n	K_s	A	B	D	R
θ_r	0,369	0,592	0,897	0,486	0,082	-0,083	-	-
θ_s		0,942	0,254	0,953	0,076	-0,042	-	-
α			0,421	0,990	0,067	-0,055	-	-
n				0,291	0,099	-0,088	-	-
K_s					0,055	-0,045	-	-
A						-0,993	-	-
Scénario 3	θ_s	α	n	K_s	A	B	D	R
θ_s		0,543	-0,183	0,555	-0,043	0,012	0,176	-0,207
α			-0,805	0,996	-0,010	-0,048	-0,358	-0,032
n				-0,754	-0,009	0,106	0,407	0,168
K_s					-0,012	-0,039	-0,353	-0,002
A						-0,937	-0,022	0,191
B							0,068	0,144
D								0,045
Scénario 4	θ_s	α	n	K_s	A	B	D	R
θ_r	0,402	0,437	0,502	0,487	-0,156	0,099	-0,237	-0,586
θ_s		0,910	-0,168	0,920	-0,059	0,030	0,083	-0,305
α			-0,392	0,998	-0,094	0,051	-0,296	-0,395
n				-0,328	-0,033	0,030	0,426	-0,087
K_s					-0,099	0,055	-0,276	-0,412
A						-0,994	0,082	0,144
B							-0,021	-0,034
D								0,493

3.3.3. Sol argileux : Rambouillet

3.3.3.1. Valeur de la fonction objectif et RMSE

Les résultats en termes de valeur de la FO et d'erreur RMSE montrent, à l'exception du scénario 4 pour lequel ces valeurs sont très élevées (50,4 et 36,17 respectivement), des valeurs

proches de celles obtenues pour les expériences numériques et lors des expériences de terrain sur sol limoneux et sableux (Tableau 21).

Avec une valeur de 3,46, c'est le scénario 3 qui présente la valeur de la FO la plus basse (contre 3,72 et 4,0 pour les scénarios 1 et 2 respectivement). Les valeurs de RMSE les plus faibles sont obtenues pour les scénarios 1 et 3 (5,04 % et 5,06 %) alors que le scénario 2 a une RMSE égale à 5,53 %. On remarque que le scénario 2, qui optimise un paramètre de plus que le scénario 1, présente une valeur de la FO plus élevée. Un résultat inverse était attendu, car la liberté supplémentaire sur la valeur d'un paramètre offre normalement des possibilités de faire décroître la FO. Cette observation semble donc indiquer que, soit l'algorithme utilisé (Levenberg-Marquardt) n'est pas adapté pour le problème, soit sa paramétrisation (réglages dans PEST) devrait être améliorée.

3.3.3.2. Estimations des paramètres et intervalles de confiance

Les scénarios 1 et 2 montrent des différences dans les valeurs des paramètres estimées considérables. Cette observation ainsi que la remarque concernant les valeurs des FO pour ces 2 scénarios peuvent être interprétées comme une sous-détermination du problème (plusieurs minimums de la FO). Il se pourrait que le fait d'utiliser l'hypothèse d'une conductivité électrique de surface négligeable (loi de Rhoades simplifiée, équation 54) soit responsable en partie de cette sous-détermination du problème. En effet la teneur en argile élevée du sol de Rambouillet implique une conductivité électrique de surface importante.

Le scénario 3 montre des intervalles de confiance très importants. De plus il existe des différences considérables entre les valeurs de paramètres obtenues lors du scénario 3 avec les valeurs de paramètres obtenues à partir des expériences de laboratoire (Tableau 15). Ainsi donc on ne peut avoir qu'une confiance modérée dans la valeur des estimations réalisées pour cette expérience.

Tableau 21. Résultats des estimations pour les 4 scénarios du sol de Rambouillet, 16-10-07

	Valeur des paramètres et intervalle de confiance à 95%									FO	RMSE (%)
	θ_r (cm ³ cm ⁻³)	θ_s (cm ³ cm ⁻³)	α (cm ⁻¹)	n	K_s (cm min ⁻¹)	A	B	D (cm)	R		
Initial	0,000	0,330	0,019	1,310	0,0043	2,134	-0,245	-	1		
Optimisés	-	0,370	0,012	1,973	0,0006	1,807	0,015	-	-	3,72	5,04
Limite inf.	-	0,347	0,001	1,676	2,E-05	-79,264	-0,196	-	-		
Limite sup.	-	0,392	0,262	2,269	0,0137	82,877	0,226	-	-		
Initial	0,050	0,330	0,019	1,310	0,0043	2,134	-0,245	-	1		
Optimisés	0,002	0,301	0,022	1,304	0,0038	2,130	-0,282	-	-	4,00	5,53
Limite inf.	-0,064	0,282	0,013	1,132	0,0023	-27,600	-4,222	-	-		
Limite sup.	0,068	0,319	0,035	1,476	0,0065	31,859	3,658	-	-		
Initial	0,000	0,330	0,019	1,310	0,0043	2,134	-0,245	4,000	2,000	3,46	5,06
Optimisés	-	0,360	0,027	2,425	0,0009	2,177	0,203	6,025	0,116		
Limite inf.	-	0,243	0,001	2,044	3,E-05	-20,235	-1,818	0,307	-0,614		
Limite sup.	-	0,476	0,802	2,805	0,0220	24,590	2,223	118,142	0,846		
Initial	0,050	0,330	0,019	1,310	0,0043	2,134	-0,245	4,000	2,000		
Optimisés	0,050	0,412	0,076	2,991	0,5121	1,330	-0,055	2,433	1,952	50,36	36,17
Limite inf.	0,002	0,205	0,044	2,129	0,0362	-7,408	-0,432	0,080	0,540		
Limite sup.	0,098	0,618	0,132	3,853	7,2374	10,069	0,321	73,849	3,364		

3.3.3.3. Corrélations de paramètres

Le scénario 4, pour lequel la FO et la RMSE sont très élevés possède une matrice normale presque singulière et donc la matrice de corrélation n'a pas pu être calculée.

Les 3 autres scénarios montrent des coefficients de corrélation assez hétérogènes (Tableau 22) avec, comme valeurs remarquables, les coefficients de corrélation suivants :

- entre α et K_s pour les scénarios 1 et 3 égaux à 0,998 et 0,996 respectivement (alors que pour le scénario 2 le coefficient de corrélation entre α et K_s vaut -0,164),
- entre A et B pour les scénarios 1, 2 et 3, avec des valeurs égales à 0,908, -0,9998, et 0,936 respectivement,
- entre D et R (-0,924) et entre D et θ_s (-0,942) pour le scénario 3.

Tableau 22. Matrices des coefficients de corrélation des paramètres pour les 4 scénarios du sol de Rambouillet, 16-10-07

Scénario 1	θ_s	α	n	K_s	A	B	D	R
θ_s		-0,406	0,621	-0,447	0,197	0,445	-	-
α			-0,587	0,998	0,012	-0,082	-	-
n				-0,633	0,094	0,248	-	-
K_s					0,002	-0,103	-	-
A						0,908	-	-
Scénario 2	θ_s	α	n	K_s	A	B	D	R
θ_r	-0,018	0,117	0,319	-0,356	-0,109	0,109	-	-
θ_s		0,672	0,826	-0,647	0,020	-0,002	-	-
α			0,713	-0,164	-0,086	0,099	-	-
n				-0,803	-0,021	0,034	-	-
K_s					-0,045	0,035	-	-
A						-0,9998	-	-
Scénario 3	θ_s	α	n	K_s	A	B	D	R
θ_s		0,393	0,622	0,311	-0,182	0,145	-0,942	0,867
α			-0,288	0,996	-0,096	0,025	-0,473	0,345
n				-0,365	-0,094	0,114	-0,524	0,532
K_s					-0,082	0,011	-0,399	0,275
A						0,936	0,304	-0,290
B							-0,015	0,054
D								-0,924
Scénario 4								

3.3.4. Sensibilité des quadripôles

Le calcul des valeurs moyennes des sensibilités calculées pour chacun des 54 quadripôles montre que les ordres de grandeur entre les quadripôles sont comparables, au sein d'un même sol (Tableau 23). Les valeurs de sensibilité les plus faibles correspondent, et ce pour tous les sols, aux grands écartements en configuration gradient (de type : injection aux électrodes 1 et 9, et mesure entre les électrodes 2 et 8), alors que les valeurs les plus élevées correspondent aux écartements les plus serrés en configuration dipôle-dipôle (de type : injection aux électrodes 4 et 5, et mesures entre les électrodes 6 et 7).

3.3.5. Discussion et conclusions

Nous avons réalisé pour 5 expériences de terrain, 4 scénarios d'inversion des paramètres, qui estiment chacun un nombre différent de paramètres. Ces scénarios, qui avaient pour but de valider la méthode, ont montré que l'optimisation du paramètre θ_r ne joue pas un rôle identique pour toutes les expériences, et que son rôle peut être différent selon que le paramètre de dispersivité est optimisé ou non. Il semble que, dans une large part, ce résultat puisse être attribué au fait que l'algorithme utilisé n'est pas complètement adapté à ce type de problème ou alors que sa paramétrisation ait été imparfaite. En effet, il est courant que ce type de méthode d'inversion ne mène pas vers le minimum global, car la forme de la fonction objectif est souvent complexe et il peut exister de nombreux minimums locaux.

Trois des expériences servant de support aux inversions réalisées concernent le sol de Grignon. Il apparaît que l'optimisation des paramètres hydrodynamiques de Mualem-van Genuchten est assez concluante pour ce sol. En effet les valeurs des paramètres obtenues coïncident bien avec celles établies à partir des courbes de rétention en eau. De plus les intervalles de confiance à 95 % délivrés par PEST sont étroits et attestent d'une bonne précision de ces estimations (surtout pour les paramètres α , θ_s , et n). Les 3 expériences donnent des estimations des valeurs des paramètres hydrodynamiques très proches, excepté pour K_s qui est plus variable selon l'expérience.

En revanche pour les sols sableux de Cernay et argileux de Rambouillet, pour chacun desquels une seule expérience a pu servir à inverser les paramètres, la méthode semble nettement moins concluante, car les valeurs des estimations des paramètres hydrodynamiques varient selon le scénario utilisé.

Tableau 23. Valeur moyenne de la sensibilité pour les 54 quadripôles, pour les 4 scénarios

Electrodes d'injection		Electrodes de mesure		Sensibilité		
				Grignon	Cernay	Rambouillet
1	2	3	4	0,14	0,55	0,09
2	3	4	5	0,29	1,41	0,30
2	3	5	6	0,23	1,41	0,23
2	3	6	7	0,20	0,55	0,26
3	4	1	2	0,14	0,61	0,09
3	4	5	6	0,44	2,23	0,30
3	4	6	7	0,26	1,14	0,24
3	4	7	8	0,18	0,67	0,25
3	4	1	9	0,11	0,66	0,11
3	4	2	8	0,13	0,63	0,10
4	5	2	3	0,30	1,58	0,32
4	5	6	7	0,48	2,19	0,37
4	5	7	8	0,23	1,53	0,28
4	5	1	9	0,22	1,52	0,31
4	5	2	8	0,24	1,52	0,30
4	5	3	7	0,27	1,54	0,31
8	9	6	7	0,14	0,41	0,11
7	8	3	4	0,19	0,74	0,26
7	8	4	5	0,22	1,42	0,27
7	8	5	6	0,28	1,01	0,34
6	7	2	3	0,20	0,63	0,24
6	7	3	4	0,27	1,09	0,24
6	7	4	5	0,46	2,28	0,35
6	7	8	9	0,14	0,45	0,11
6	7	1	9	0,11	0,51	0,13
6	7	2	8	0,13	0,47	0,12
5	6	2	3	0,23	1,35	0,24
5	6	3	4	0,45	2,25	0,32
5	6	7	8	0,28	1,05	0,35
5	6	1	9	0,22	1,16	0,31
5	6	2	8	0,23	1,30	0,31
5	6	3	7	0,26	1,25	0,32
1	9	3	4	0,11	0,64	0,11
1	9	4	5	0,21	1,38	0,29
1	9	5	6	0,21	1,15	0,30
1	9	6	7	0,11	0,47	0,13
1	9	2	8	0,04	0,08	0,01
1	9	3	7	0,10	0,62	0,10
1	9	4	6	0,21	1,26	0,29
2	8	3	4	0,13	0,60	0,10
2	8	4	5	0,23	1,35	0,29
2	8	5	6	0,23	1,11	0,30
2	8	6	7	0,13	0,42	0,12
2	8	1	9	0,04	0,08	0,02
2	8	3	7	0,12	0,54	0,09
2	8	4	6	0,23	1,21	0,29
3	7	4	6	0,26	1,27	0,30
3	7	2	8	0,12	0,58	0,09
3	7	1	9	0,10	0,63	0,10
3	7	4	5	0,26	1,44	0,29
3	7	5	6	0,26	1,19	0,31
4	6	1	9	0,22	1,41	0,31
4	6	2	8	0,24	1,41	0,30
4	6	3	7	0,26	1,24	0,31

De plus, les intervalles de confiances obtenus sont beaucoup plus larges que dans le cas du sol limoneux. Pour Rambouillet, il était vraisemblablement illusoire d'espérer qu'une relation qui ne prenne pas en compte la conductivité électrique de surface des constituants du sol puisse représenter correctement la correspondance entre la teneur en eau volumique du sol et sa conductivité électrique. Dans le cas de Cernay, il semblerait que c'est l'allure raide de la courbe de teneur en eau volumique en fonction du potentiel matriciel, typique des sols de texture grossière, qui rend la méthode moins opérationnelle (cette explication avait été proposée lors de l'expérience numérique pour justifier des résultats moins concluants pour le sol sablo-limoneux comparés à ceux du sol limoneux).

En ce qui concerne l'estimation des paramètres de Rhoades, pour tous les scénarios des trois sols, les incertitudes sur les valeurs des paramètres obtenues sont très fortes. D'importantes corrélations entre ces 2 paramètres ont été observées lors des inversions. Les valeurs obtenues sont très variables, à Grignon, d'une expérience à l'autre, et d'un scénario à l'autre, ce qui ne permet pas d'avoir une bonne confiance sur les résultats obtenus.

Le paramètre de dispersivité, lorsqu'il est optimisé, montre lui aussi une incertitude importante sur sa valeur. Parmi les 3 expériences réalisées à Grignon, deux d'entre elles donnent, pour les scénarios 3 et 4, des estimations de D très voisines, alors que la troisième expérience donne des résultats très différents selon le scénario employé (E3). A Cernay et Rambouillet, il existe également des différences notoires dans la valeur de l'estimation de D en fonction du scénario employé.

Il apparaît donc que, lors de notre étude, la méthode employée n'a fonctionné correctement que dans le cas du sol limoneux. Dans ce cas, les paramètres de Mualem-van Genuchten ont été estimés précisément, bien que l'inversion des paramètres pétrophysiques de Rhoades n'ait pas été fiable. La dispersivité a été obtenue avec une incertitude importante.