



# Travail de fin d'études

pour le diplôme d'ingénieur de l'École nationale des travaux publics de l'État

---

Année 2023-2024

Voie d'approfondissement : CELVN

Soutenu le 3 septembre 2024

Devant le jury composé de :

- Présidente du Jury : Anne-Laure BADIN
- Maître de TFE : Laurent LASSABATERE
- Expert : Laurent OXARANGO

Par Florent GUILLEMET

## Modélisation multi-physique des essais infiltrométriques combinés à la tomographie de résistivité électrique

Organisme d'accueil : UMR CNRS 5023 LEHNA (équipe IAPHY) au sein de l'ENTPE



# Notice analytique

AUTEUR							
Nom	GUILLEMET						
Prénom	Florent						
ORGANISME D'ACCUEIL							
Nom de l'organisme et localité	UMR CNRS 5023 LEHNA (équipe IAPHY) - ENTPE, Vaulx-en-Velin						
Nom du Tuteur	Laurent LASSABATERE						
ANALYSE DU TFE							
Titre (français)	Modélisation multi-physique des essais infiltrométriques combinés à la tomographie de résistivité électrique						
Titre (anglais)	Multiphysics modelling of water infiltration experiments combined with electrical resistivity tomography						
Résumé (français)	<p>Les ouvrages d'infiltration remplissent les rôles d'infiltration de l'eau et de filtration des polluants contenus dans cette eau dans un but de gestion des eaux de surface et de recharge des nappes. Des écoulements préférentiels peuvent entrer en jeu et permettent de favoriser l'infiltration avec un risque de dégrader la fonction d'épuration du sol (transport facilité des polluants). Les essais infiltrométriques permettent de quantifier les capacités d'infiltration des sols. Leur couplage avec des méthodes géophysiques non destructrices telle que la tomographie de résistivité électrique (TRE) permet a priori de caractériser les chemins de l'eau. L'objet de ce travail était d'étudier la finesse de détection des zones d'écoulements préférentiels lors d'essais infiltrométriques avec l'aide de la TRE par une approche de modélisation multi-physique (couplage des champs écoulement-infiltration et électrique-TRE). La modélisation a été mise au point et validée de diverses manières. Les résultats ont montré que la TRE peut détecter a priori une zone d'écoulements préférentiels proche de la surface mais pas en profondeur. Elle reste limitée par les contraintes d'espacement inter-électrodes et de temps d'acquisition.</p>						
Résumé (anglais)	<p>Infiltration structures serve the dual purpose of allowing water to infiltrate and filtering pollutants contained in the water, with the goal of managing surface water and recharging groundwater. Preferential flow paths may occur, which can enhance infiltration but also risk degrading the soil's purification function by facilitating the transport of pollutants. Infiltration tests are used to quantify the soil's infiltration capacity. When combined with non-destructive geophysical methods such as electrical resistivity tomography (ERT), it is possible to characterize water pathways. The objective of this study was to examine the precision with which preferential flow zones can be detected during infiltration tests using ERT, through a multi-physics modeling approach (coupling flow-infiltration fields and electrical-ERT fields). The modeling was developed and validated in various ways. The results showed that ERT can potentially detect a preferential flow zone near the surface but not at depth, as it is limited by electrode spacing and acquisition time constraints.</p>						
Mots clés (français, 5 max)	Infiltration, écoulements préférentiels, modélisation multi-physique, Tomographie de résistivité électrique (TRE), inversion numérique						
Mots clés (anglais, 5 max)	Infiltration, preferential flows, multiphysics modelling, electrical resistivity tomography (ERT), numerical inversion						
Termes géo-graphique (français)							
COLLATION							
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Nb de pages</th> <th>Nb d'annexes (nb de pages)</th> <th>Nb de réf. biblio.</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>58</td> <td>3</td> <td>31</td> </tr> </tbody> </table>	Nb de pages	Nb d'annexes (nb de pages)	Nb de réf. biblio.	58	3	31
Nb de pages	Nb d'annexes (nb de pages)	Nb de réf. biblio.					
58	3	31					

# Déclaration de travail personnel

---

Je déclare que ce rapport constitue l'aboutissement d'un travail personnel et ne peut être suspecté de plagiat.

Le travail présenté distingue explicitement ce que j'ai produit de ce que j'ai emprunté à d'autres. A ce titre, les citations sont clairement identifiables et les sources (écrits, images) qui ont alimenté ma réflexion sont référencées.

# Remerciements

---

Je tiens à exprimer ici ma profonde gratitude envers toutes les personnes qui, de près ou de loin, m'ont permis d'aller au bout de ce travail de fin d'études.

Je voudrais commencer par remercier Laurent Lassabatère pour le temps précieux qu'il a su me consacrer tout au long de mon TFE. Ses conseils et ses connaissances m'ont énormément apporté.

Un très grand merci à Rémi Clément, lui aussi pour m'avoir offert de son temps et pour sa patience. Son expertise en modélisation et en méthodes géophysiques a été salvatrice pour atteindre mes objectifs.

Je remercie également chaleureusement Hanifa Bader pour son aide précieuse.

Je tiens aussi à remercier également Anne-Laure Badin, ma tutrice au sein de l'ENTPE, pour ses retours et ses conseils essentiels qui m'ont aidé pour la rédaction de ce mémoire.

Je n'oublie pas non plus de remercier toutes les personnes du LEHNA au sein de l'ENTPE pour leur accueil, leur bonne humeur et leur convivialité.

Enfin, je tenais à remercier ma compagne, Noémie. Ce travail de fin d'étude achève une scolarité extrêmement dense, les sacrifices ont été nombreux pour elle aussi. Merci d'avoir toujours été présente pour moi, durant tout ce temps, même dans les moments difficiles. Merci pour tes conseils, pour ton soutien, d'être là.

# Sommaire

---

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>7</b>
<b>2</b>	<b>Revue bibliographique</b>	<b>8</b>
2.1	Modèle d'infiltration en zone non saturée . . . . .	8
2.1.1	Eau dans le sol et écoulements : principes . . . . .	8
2.1.2	Modèle analytique de Haverkamp pour la modélisation de l'infiltration . . . . .	10
2.1.3	Zones d'écoulements préférentiels . . . . .	14
2.2	Méthode géophysique : Tomographie de Résistivité Electrique (TRE) . . . . .	16
2.2.1	Tomographie de résistivité électrique . . . . .	16
2.2.2	Modélisation numérique directe des données TRE . . . . .	19
2.2.3	Inversion des données TRE : principes . . . . .	20
2.2.4	Inversion des données TRE en suivi temporel (time-lapse) . . . . .	21
<b>3</b>	<b>Matériels &amp; Méthodes</b>	<b>22</b>
3.1	Méthodologie générale . . . . .	22
3.2	Modélisations de l'infiltration par COMSOL . . . . .	23
3.2.1	Présentation des logiciels Hydrus 1D/3D et COMSOL Multiphysics . . . . .	23
3.2.2	Modélisation de l'infiltration 1D . . . . .	24
3.2.3	Modèles 2D axisymétriques avec éléments carrés . . . . .	26
3.2.4	Modèles 2D axisymétriques avec éléments triangulaires . . . . .	27
3.2.5	Modélisation 3D de l'infiltration avec COMSOL Multiphysics . . . . .	29
3.3	Couplage infiltration / acquisition TRE . . . . .	32
3.3.1	Résistivités vraies . . . . .	32
3.3.2	Résistivités apparentes . . . . .	33
3.3.3	Résistivités interprétées : inversion avec ResIPy . . . . .	36
<b>4</b>	<b>Résultats</b>	<b>38</b>
4.1	Modélisation COMSOL de l'infiltration 1D et validation . . . . .	38
4.1.1	Sensibilité de la condition de Neumann (drainage libre) au maillage . . . . .	38
4.1.2	Sensibilité à la condition limite de surface ( $z=0$ ) . . . . .	39
4.1.3	Sensibilité de l'infiltration aux conditions initiales en fonction du maillage . . . . .	40
4.2	Modélisation COMSOL de l'infiltration 2D axisymétrique et validation . . . . .	42
4.3	Modélisation COMSOL de l'infiltration 3D pour un milieu homogène . . . . .	45
4.4	Modélisation COMSOL de l'infiltration 3D avec zone d'écoulements préférentiels . . . . .	46
4.5	Couplage Infiltration - TRE : Acquisitions et inversions . . . . .	48
<b>5</b>	<b>Conclusion</b>	<b>53</b>
<b>6</b>	<b>Bibliographie</b>	<b>54</b>
<b>7</b>	<b>ANNEXES</b>	<b>56</b>

# Liste des figures

1	Les 3 phases de l'eau dans le sol . . . . .	8
2	Exemples de courbes de rétention . . . . .	10
3	Différents types de zones d'écoulements préférentiels (Vereecken et al., 2019). . . . .	14
4	Échantillon de sol schématique . . . . .	16
5	Dispositif en quadripôle de la méthode TRE (Knödel, Voigt, and Lange, 2007) : en rouge (A et B) les électrodes servant à l'injection du courant, en bleu (M et N) celles servant à la mesure de potentiels. . . . .	17
6	Schéma explicatif de l'acquisition d'une pseudo-section 2D (Loke and Barker, 1996) . . . . .	18
7	Exemple de simulation d'acquisition TRE avec F3DM. a. Modèle de résistivités vraies créé avec COMSOL Multiphysics b. Section de résistivités apparentes suite à la simulation de l'acquisition (Audebert, 2015) . . . . .	20
8	Principe itératif d'une inversion TRE (Clément, 2010). [1] Calcul du modèle de résistivités. [2] Calcul du modèle de résistivités apparentes simulées. [3] Comparaison du modèle de résistivités apparentes mesurées sur le terrain et simulées. . . . .	21
9	Les quatre types d'éléments 3D disponibles dans COMSOL . . . . .	23
10	Exemples de modèles 1D, Hydrus et COMSOL . . . . .	25
11	Exemples de modèles 2D axisymétriques avec éléments carrés, Hydrus et COMSOL. . . . .	27
12	Exemples de modèles 2D axisymétriques avec éléments triangulaires dans COMSOL Multiphysics. (a) Maillage triangulaire avec raffinement au niveau de l'anneau d'infiltration. (b) Degrés de saturation obtenus au bout de 48h d'infiltration . . . . .	28
13	Exemple de modèle (a) et de maillage (b) 3D homogène pour 64 électrodes espacées de 4 cm, profondeur 0.75 m. . . . .	30
14	Exemples de maillage 3D avec écoulements préférentiels et qualité des éléments (skewness). . . . .	31
15	Relation entre résistivité électrique et saturation en eau. La loi d'Archie calibrée donne la relation : $\rho/\rho_w = 0.42^{-1.25} * S^{-1.65}$ . . . . .	32
16	Calibration de la loi d'Archie . . . . .	33
17	Géométrie et maillage 3D généré par F3DM. . . . .	34
18	Modèle F3DM avec ajout du domaine du modèle utilisé pour l'infiltration. . . . .	35
19	Exemple de maillage généré par ResIPy pour l'inversion de données TRE. . . . .	36
20	Étapes des traitements des données d'infiltration et de TRE pour . Exemple de profil de teneur en eau (COMSOL) et de pseudo-section des résistivités apparentes obtenues (ResIPy) à partir de données au format BERT. (a) Profil de teneurs en eau utilisées pour extraire les résistivités vraies. (b) Résistivités vraies associés aux teneurs en eau par la loi d'Archie. (c) Points de mesure de résistivités apparentes. (d) Résistivités interprétés obtenues après inversion (time-lapse dans ce cas). . . . .	37
21	Profil de potentiels de pression en $z = -1$ m . . . . .	38
22	Taux d'accroissement à $z = -1$ m en fonction du maillage . . . . .	38
23	Sensibilité de l'infiltration cumulée à la condition limite de surface, h constante à plusieurs instants de l'infiltration . . . . .	39
24	Courbes d'infiltrations cumulées en fonction de la condition de pression en surface. . . . .	39
25	Sensibilité de l'infiltration cumulée et du taux d'infiltration à la condition initiale pour plusieurs maillages . . . . .	41
26	Sensibilité des modèles d'infiltration COMSOL au maillage, condition de potentiel de pression initiale -1 m. (a) Infiltration cumulée. (b) Infiltration cumulée en échelle logarithmique. (c) Erreur relative entre les modèles COMSOL et le modèle Hydrus. (d) Taux d'infiltration. . . . .	42

27	Comparaison des modèles 2D axisymétriques en fonction du maillage entre Hydrus et COMSOL. (a), (b), (c) et (d) : Infiltrations cumulées. (e), (f), (g) et (h) : Taux d'infiltration. . . . .	43
28	Maillage et histogramme de la qualité des éléments. (a) Maillage uniforme "Extremely fine". (b) Maillage de l'anneau raffiné au niveau 14. (c) Maillage de l'anneau raffiné au niveau 18. . . . .	43
29	Sensibilité de I (a) et q (b) au niveau de finesse sur maillage en surface et comparaison avec le modèle Hydrus (éléments carrés 0.2 cm). . . . .	44
30	Résultats de l'optimisation des paramètres $\beta$ et $\gamma$ . (a) Heatmap des valeurs de RMSE en fonction des couples $(\beta, \gamma)$ . (b) Comparaison des infiltrations cumulées entre QEI optimisé et le modèle 2D-axisymétrique. (c) Comparaison des taux d'infiltration entre QEI optimisé et le modèle 2D-axisymétrique. . . . .	45
31	(a) Comparaison des infiltrations cumulées entre QEI optimisé et les modèles 3D homogènes. (b) Comparaison des taux d'infiltration entre QEI optimisé et les modèles 3D homogènes. (c) Erreur relative de l'infiltration cumulée entre les modèles 3D et le QEI 3D optimisé . . . . .	46
32	Infiltration cumulée et taux d'infiltration pour les modèles COMSOL 3D avec zone d'écoulements préférentiels, en fonction du niveau de maillage de l'anneau d'infiltration. . . . .	46
33	Profils de teneurs en eau en milieu homogène et hétérogène à différents instants. . . . .	47
34	Courbes d'infiltrations cumulées du modèle 3D homogène et avec zone d'écoulements préférentiels. . . . .	47
35	Résistivités interprétées (time-lapse) entre 0 et 60 minutes toutes les 10 minutes d'un dispositif TRE à 64 électrodes espacées de 4 cm (gauche) et espacé de 2 cm (droite) . . . . .	49
36	Inversion simple pour chaque pas de temps de 1 minute (gauche) ; Inversion time-lapse pour un pas de temps de 1 minute (droite). Dispositif TRE de 64 électrodes espacées de 2 cm . . . . .	50
37	Résistivités vraies obtenues à partir des teneurs en eau et de la loi d'Archie optimisée (Gauche) ; Inversion time-lapse pour un pas de temps de 1 minute pour un dispositif TRE de 64 électrodes espacées de 2 cm (droite) . . . . .	51
38	Exemple de dispositif TRE en étoile à 108 électrodes pour le suivi d'infiltration à travers un anneau (Clément, 2010). . . . .	52
41	(a) Coordonnées des électrodes (2D). (b) Numéros électrodes - Potentiel en M - Potentiel en N - $\Delta V - I(A)$ . . . . .	58

## 1 Introduction

Les défis liés à l'eau sont immenses dans le contexte actuel du changement climatique et des changements globaux. Le cycle de l'eau risque d'être perturbé de façon durable avec des impacts très significatifs sur la façon de gérer cette ressource dans le monde entier. Les incertitudes quant aux effets effectifs de ces changements sur les précipitations sont grandes mais des études envisagent toutefois une augmentation des fréquences des événements extrêmes, que ce soient les sécheresses ou les pluies extrêmes. Pour lutter contre ces aléas extrêmes, le concept de ville éponge prend de l'ampleur à travers le monde. Il vise à remettre au centre de la gestion des eaux pluviales les processus naturels d'infiltration de l'eau dans le sol par la création de toute une batterie d'aménagements tels que des espaces verts ou encore des jardins de pluie (Jia et al., 2017). Concrètement, l'approche de la «ville éponge» est d'améliorer l'infiltration, l'évapotranspiration, ainsi que la collecte et la réutilisation des eaux de pluies dans l'environnement urbain (Zevenbergen, Fu, and Pathirana, 2018).

De manière générale, l'infiltration des eaux pluviales (EP) est une méthode qui permet de restaurer localement le cycle naturel de l'eau, en ré-infiltrant l'eau dans le sol tout en contribuant à la recharge des nappes. Les eaux usées traitées (EUTs) peuvent aussi contribuer à la recharge de nappe, ce qui permet de diminuer la pression sur la ressource en eau. En France, par exemple, le Plan Eau porté par l'Etat vise, entre autres, à simplifier les démarches de réutilisation des eaux usées traitées (REUTs) en particulier pour cette application. L'ambition de l'Etat est de multiplier par dix le volume d'eau réutilisée à horizon 2030. Néanmoins, la réutilisation des EUTs au travers de la recharge de nappe pose la question de la qualité des eaux et du transport des polluants, tout comme l'infiltration des eaux de ruissellement pluviales. En outre, les EUTs provenant des stations d'épuration peuvent être d'autant plus contaminées que leur traitement se concentre sur l'élimination des matières organiques en oubliant les autres types de polluants tels que les polluants émergents (micropolluants issus des médicaments) (Rabouli, 2022). Concernant les eaux pluviales urbaines, elles se chargent aussi en divers polluants issus de la circulation automobiles (ruissellement sur les infrastructures routières) mais aussi en lien avec les activités usuelles en villes (pollutions induites par les bassins-versants pavillonnaires, pollutions industrielles, etc.). Ainsi, polluants organiques (hydrocarbures, polluants organiques persistants, pesticides, etc.) et inorganiques (métaux lourds) incluant les polluants émergents peuvent se trouver en quantité non négligeables dans les eaux pluviales (Zgheib, Moilleron, and Chebbo, 2011).

L'aspect qualitatif est donc primordial et, lors de l'infiltration de l'eau, il faut s'assurer de la rétention de ces polluants dans les horizons supérieurs du profil de sol, dans un but de préservation de la qualité des nappes phréatiques. Il faut donc s'assurer que la zone non saturée des ouvrages d'infiltration remplisse à la fois un rôle d'infiltration de l'eau et un rôle de filtration des polluants. C'est dans un but de dimensionnement et de suivi de ces deux fonctions (infiltration et filtration) qu'il est important de développer des outils de modélisation efficaces qui prennent en compte les différents phénomènes physiques à l'œuvre, comme le mouvement de l'eau à travers le milieu poreux du sol et dans des zones d'écoulements préférentiels ainsi que le transport des divers polluants présents dans cette eau.

Des méthodes existent pour suivre dans le temps des phénomènes d'infiltration, certaines méthodes sont destructrices et d'autres non. C'est le cas des méthodes géophysiques. En effet, il s'agit de méthodes de sondage du sous-sol qui ne nécessitent pas de devoir excaver pour obtenir des résultats. La tomographie de résistivité électrique (TRE) fait partie des méthodes géophysiques. Elle permet de produire des cartes de résistivités électriques du sol et de remonter dans certains cas à la teneur en eau et à son évolution au cours de l'infiltration dans le sol. Cette méthode a, par exemple, été utilisée dans le suivi de réinjection de lixiviat dans un massifs de déchets par Audebert, 2015 et Clément, 2010.

La question est de savoir s'il est possible d'identifier des zones d'écoulements préférentiels à l'aide de la TRE dans un contexte d'essais d'infiltration. L'objectif de ce stage est donc d'apporter des éléments de réponse à cette question à l'aide de simulations numériques des écoulements dans le sol et des simulations d'acquisitions par la méthode géophysique de tomographie de résistivité électrique.

## 2 Revue bibliographique

### 2.1 Modèle d'infiltration en zone non saturée

#### 2.1.1 Eau dans le sol et écoulements : principes

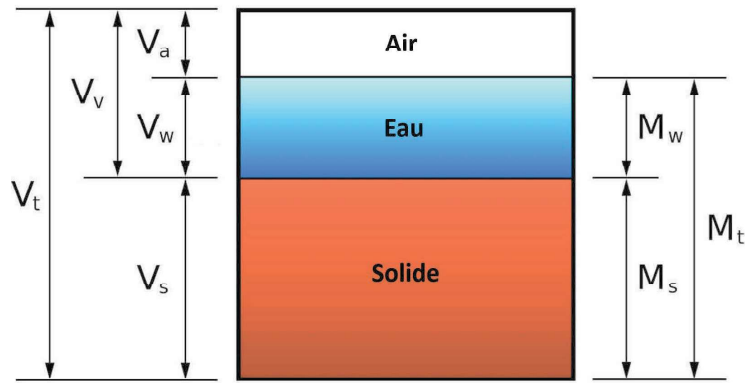


Figure 1: Les 3 phases de l'eau dans le sol

Le sol est constitué de trois phases : solide, liquide et gazeuse. En s'infiltrant dans le sol, l'eau va s'écouler dans les pores du sol en chassant une partie de l'air présent. Afin de quantifier la quantité d'eau se retrouvant dans le sol, on définit un ensemble de variables d'état. La Figure 1 permet de définir les notations qui seront utilisées par la suite.  $V_a$  est le volume d'air,  $V_w$  le volume d'eau,  $V_s$  le volume occupé par les particules solides.  $V_v$  est le volume de vide et  $V_t$  est le volume total.  $M_w$  est la masse d'eau,  $M_s$  la masse des particules solides et  $M_t$  est la masse totale de sol (la masse de l'air est négligée) (Angulo-Jaramillo, Bagarello, Iovino, et al., 2016, Hillel, 2004).

$$\theta = \frac{V_w}{V_t} \quad (1)$$

avec  $V_w$  le volume d'eau liquide [ $L^3$ ] dans un volume élémentaire représentatif, de volume  $V_t$  [ $L^3$ ]. Pour chaque sol, il existe une valeur maximale de teneur volumique en eau appelée teneur à saturation et notée  $\theta_s$ . Lorsque cette valeur est atteinte, le sol se trouve en état saturé. Pour les teneurs en eau plus faibles, le sol est en état non-saturé. Dans les zones saturées et non-saturées, des phénomènes d'écoulements différents se produisent. En zone saturée, l'écoulement de l'eau est régi par la loi de Darcy donnant le flux volumique par unité de surface  $\mathbf{q}$  (Hillel, 2004):

$$\mathbf{q} = -K_s \nabla H \quad (2)$$

avec  $\mathbf{q}$  le débit surfacique [ $LT^{-1}$ ],  $K_s$  la conductivité hydraulique à saturation [ $LT^{-1}$ ] et  $H$  la charge hydraulique [ $L$ ].

La charge hydraulique est donnée par l'expression suivante et comprend les potentiels liés à toutes les forces s'appliquant à l'eau inertielle et responsables de son déplacement :

$$H = \frac{V^2}{2g} + Z + \frac{P}{\rho_w g} \quad (3)$$

En zone non-saturée, nous devons prendre en compte la capillarité qui dépend de la capacité du sol à se saturer et qui détermine la teneur en eau,  $\theta$ , en fonction du potentiel de pression,  $h$ . Plusieurs modèles ont été proposés pour traduire cette relation. A partir de la relation  $\theta(h)$ , divers modèles capillaires permettent de construire la conductivité hydraulique en zone non saturée,  $K(\theta)$ . Les modèles de van Genuchten (Van Genuchten, 1980) et Mualem (Mualem, 1976) permettent la modélisation des relations  $\theta(h)$  et  $K(\theta)$  à travers les équations suivantes (Angulo-Jaramillo, Bagarello, Iovino, et al., 2016) :

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = [1 + |\alpha h|^n]^{-m} \quad (4a)$$

$$m = 1 - \frac{1}{n} \quad (4b)$$

$$K(S_e) = K_s S_e^l \left[ 1 - \left( 1 - S_e^{\frac{1}{m}} \right)^m \right]^2 \quad (4c)$$

avec  $S_e$  [-] le degré de saturation ;  $\theta_s$  la teneur volumique en eau à saturation [ $L^3/L^3$ ] ;  $\theta_r$  la teneur volumique en eau résiduelle [ $L^3/L^3$ ] ;  $h$  le potentiel de pression [ $L$ ] ;  $K_s$  la conductivité hydraulique à saturation [ $L.T^{-1}$ ] ;  $\alpha$  [ $L^{-1}$ ] et  $n$  [-] des coefficients empiriques qui rendent compte de la forme de la courbe de rétention. Le paramètre  $l$  relatif à la tortuosité est couramment pris égal à 0.5.

À partir de l'équation 4a, il est possible de tracer les courbes de rétention représentant le potentiel de pression en fonction de la teneur en eau. Voici le tableau des paramètres hydrodynamiques couramment considérés et tirés de Carsel and Parrish, 1988 (Tableau 1) ainsi que quelques courbes de rétention (Figure 2).

Table 1: Valeurs des paramètres de van Genuchten - Hydrus 2D/3D issues de Carsel and Parrish, 1988

	$\theta_r$	$\theta_s$	$\alpha$ [ $cm^{-1}$ ]	$n$	$K_s$ [ $cm/min$ ]
<b>Sable</b>	0.045	0.43	0.145	2.68	0.495
<b>Sable limoneux</b>	0.057	0.41	0.124	2.28	0.243194
<b>Limon sableux</b>	0.065	0.41	0.075	1.89	0.0736806
<b>Limon</b>	0.078	0.43	0.036	1.56	0,0173333

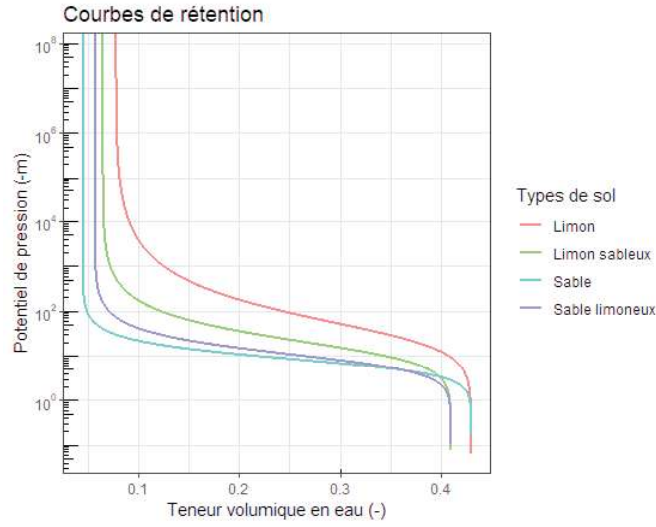


Figure 2: Exemples de courbes de rétention

L'équation 4c peut aussi s'écrire :

$$K(\theta) = K_s \left( \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^l \left[ 1 - \left( 1 - \left( \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^{\frac{1}{m}} \right)^m \right]^2 \quad (5)$$

La conductivité hydraulique non saturée intervient dans l'équation de Darcy généralisée :

$$\mathbf{q} = -K(\theta)\nabla H \quad (6)$$

Enfin, l'équation de Richards est utilisée pour caractériser le transfert de l'eau dans la zone non-saturée. Elle résulte de la combinaison entre l'équation de continuité :

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\nabla \mathbf{q} \quad (7)$$

et la loi de Darcy généralisée (équation 6), et s'écrit (Angulo-Jaramillo, Bagarello, Iovino, et al., 2016):

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \nabla \cdot [K(\theta)\nabla H] \quad (8)$$

Il est donc crucial de pouvoir choisir les paramètres intervenant dans l'équation 4a pour pouvoir modéliser de façon satisfaisante l'infiltration de l'eau dans le sol.

### 2.1.2 Modèle analytique de Haverkamp pour la modélisation de l'infiltration

Lors d'une infiltration la quantité d'eau infiltrée au cours du temps suit une évolution transitoire puis établie. Plusieurs modèles analytiques existent. Haverkamp et al., 1994, fournit une série d'expressions analytiques qui sont valables pour une infiltration à potentiel de pression constant en surface et un potentiel de pression homogène comme condition initiale. Initialement les expressions

modélisaient des infiltration 1D puis ont été généralisées à un modèle 3D pour une source circulaire de type anneau d'infiltration.

Dans les modèles 1D et 3D, plusieurs expressions analytiques sont disponibles mais ne sont valables, pour certaines, que sur un intervalle de temps restreint. Les trois modèles prennent les formes suivantes (Haverkamp et al., 1994) :

$$I_{1D}^{O(1)}(t) = S\sqrt{t} \quad (9a)$$

$$I_{1D}^{O(2)}(t) = S\sqrt{t} + \left( \frac{(2-\beta)}{3} \Delta K + K_0 \right) t \quad (9b)$$

$$I_{1D}^{+\infty}(t) = K_s t + \frac{1}{2(1-\beta)} \ln \left( \frac{1}{\beta} \right) \frac{S^2}{\Delta K} \quad (9c)$$

Les équations 9a, 9b et 9c sont respectivement valables pour les temps très courts, courts (régime transitoire) et enfin les temps longs (régime permanent). L'expression 9c correspondant donc au régime établi et sera qualifiée de SST (Steady State).

Ces expressions correspondent aux développements limités au voisinage de zéro ( $I_{1D}^{O(1)}$ ) et ( $I_{1D}^{O(2)}$ ) ou asymptotique  $I_{1D}^{+\infty}$  d'une formulation valable à tout temps. Cette formulation a été proposée par Haverkamp et al., 1994 :

$$\frac{2\Delta K^2}{S^2} t = \frac{1}{1-\beta} \left( \frac{2\Delta K}{S^2} (I_{QEI} - K_0 t) - \ln \left( \frac{e^{\frac{2\beta\Delta K}{S^2}(I_{QEI} - K_0 t)} + \beta - 1}{\beta} \right) \right) \quad (10)$$

Cette équation pour l'infiltration 1D  $I_{QEI}(t)$  porte aussi le nom de QEI pour modèle Quasi-Exact et Implicite. Le modèle est implicite dans la mesure où l'équation 10 doit être résolue pour chaque temps pour déterminer la quantité  $I_{QEI}$ . Pour toutes les équations précédentes,  $S$  correspond à la sorptivité,  $\Delta K$  correspond à  $K_s - K(\theta_0)$ , c'est-à-dire la différence entre la conductivité hydraulique à la surface du sol,  $K_s$ , et à la saturation initiale,  $K_0 = K(\theta_0)$ . La sorptivité est donnée par l'expression suivante (Angulo-Jaramillo, Bagarello, Iovino, et al., 2016) :

$$S^2 = 2 \int_{\theta_0}^{\theta_s} (\theta_s + \theta - 2\theta_0) D(\theta) d\theta \quad (11)$$

où  $D(\theta)$  correspond à la diffusivité hydraulique,  $D(\theta) = K(\theta) \frac{dh}{d\theta}$ .

Les expressions précédentes décrivent l'infiltration 1D. L'infiltration 3D au travers d'un anneau d'infiltration peut se déduire de l'infiltration 1D en rajoutant un terme pour prendre en compte le flux latéral. Smettem et al., 1994 ont mis en évidence que ce terme était proportionnel au temps. Ainsi, l'infiltration 3D au travers d'un anneau de rayon  $r_d$  s'écrit selon (Smettem et al., 1994):

$$I_{3D} = I_{1D} + \frac{\gamma S^2}{r_d \Delta \theta} t \quad (12)$$

Le paramètre (ou constante) d'infiltration  $\gamma$  est souvent considéré comme proche d'une valeur de 0.75 (Haverkamp et al., 1994). Il est censé prendre en compte l'effet géométrique du bulbe d'infiltration.

La concaténation de l'équation 9a-9c et de l'équation 10 avec l'équation de passage de 1D à 3D (équation 12) permet d'avoir l'expression des approximations pour les infiltrations cumulées 3D :

$$I_{3D}(t) = \frac{S^2}{2\Delta K} I_{QEI}(t) + \left( K_0 + \frac{\gamma S^2}{r_d \Delta \theta} \right) t \quad (13a)$$

$$I_{3D}^{O(1)}(t) = S\sqrt{t} \quad (13b)$$

$$I_{3D}^{O(2)}(t) = S\sqrt{t} + \left( \frac{(2-\beta)}{3} \Delta K + K_0 + \frac{\gamma S^2}{r_d \Delta \theta} \right) t \quad (13c)$$

$$I_{3D}^{+\infty}(t) = \left( K_s + \frac{\gamma S^2}{r_d \Delta \theta} \right) t + \frac{1}{2(1-\beta)} \ln \left( \frac{1}{\beta} \right) \frac{S^2}{\Delta K} \quad (13d)$$

La dérivation temporelle de ces expressions permet alors de déterminer les expressions analytiques explicites des approximations relatives au taux d'infiltration :

$$q_{3D}(t) = q_{QEI}(t) + \frac{\gamma S^2}{r_d \Delta \theta} \quad (14a)$$

$$q_{3D}^{O(1)}(t) = \frac{S}{2\sqrt{t}} \quad (14b)$$

$$q_{3D}^{O(2)}(t) = \frac{S}{2\sqrt{t}} + \left( \frac{(2-\beta)}{3} \Delta K + K_0 + \frac{\gamma S^2}{r_d \Delta \theta} \right) \quad (14c)$$

$$q_{3D}^{+\infty}(t) = K_s + \frac{\gamma S^2}{r_d \Delta \theta} \quad (14d)$$

Dans ce qui suit, nous reprenons une méthode de normalisation qui permet de simplifier la quantification et la présentation des équations présentées ci-dessus.

### Adimensionalisation du modèle analytique de Haverkamp

Varado et al., 2006 ont proposé une procédure de normalisation des modèles analytiques d'infiltration cumulée. C'est cette procédure qui a été appliquée dans ce qui suit pour simplifier la modélisation de l'infiltration. Elle permet, dans un premier temps, de quantifier les modèles adimensionnels puis dans un second temps, de dimensionnaliser. Cette procédure a aussi l'avantage de faire ressortir les paramètres de forme, c'est-à-dire qui jouent sur la forme de la courbe, ainsi que des

paramètres de normalisation (ou dimensionalisation). La relation entre les grandeurs dimensionnelles et adimensionnelles se fait par les équations 15a et 15b suivantes (Varado et al., 2006):

$$t = \frac{S^2}{2\Delta K^2} t^* \quad (15a)$$

$$I = \frac{S^2}{2\Delta K} I^* + K_0 t \quad (15b)$$

Lassabatere, Angulo-Jaramillo, et al., 2009 ont proposé une relation complémentaire pour la normalisation de la différence  $I_{3D} - I_{1D}$  :

$$\Delta I = \frac{S^4}{2\Delta K^2 r_d \Delta \theta} \Delta I^* \quad (16)$$

Ces équations de normalisation permettent ainsi de simplifier les modèles analytiques en faisant apparaître des relations plus simples entre les grandeurs adimensionnelles et en découplant les effets des facteurs d'échelles des constantes affectant la forme des courbes.

L'application des équations de normalisation au modèle QEI permet d'obtenir les relations suivantes reliant l'infiltration cumulée adimensionnelle  $I_{QEI}^*$ , au temps adimensionnel  $t^*$  (e.g., Lassabatere, Angulo-Jaramillo, et al., 2009) :

$$t^* = \frac{1}{1-\beta} \left[ I_{QEI}^* - \ln \left( \frac{\exp(\beta I_{QEI}^*) + \beta - 1}{\beta} \right) \right] \quad (17)$$

Cette équation peut être complétée par les approximations aux temps courts ou longs obtenues par application des équations de normalisation (équations 15) à leurs formulations dimensionnelles (équations 13):

$$I_{O(1)}^*(t^*) = \sqrt{2t^*} \quad (18a)$$

$$I_{O(2)}^*(t^*) = \sqrt{2t^*} + \frac{2-\beta}{3} t^* \quad (18b)$$

$$I_{+\infty}^*(t^*) = t^* + \frac{1}{1-\beta} \ln \left( \frac{1}{\beta} \right) \quad (18c)$$

Les relations correspondant aux taux d'infiltration peuvent être déduites par dérivation temporelle. Ainsi, le taux d'infiltration adimensionnel se calcule à partir des expressions suivantes en fonction, lui aussi, de son domaine temporel de validité :

$$q_{O(1)}^*(t^*) = \frac{1}{\sqrt{2t^*}} \quad (19a)$$

$$q_{O(2)}^*(t^*) = \frac{1}{\sqrt{2t^*}} + \frac{2-\beta}{3} \quad (19b)$$

$$q_{+\infty}^*(t^*) = 1 \quad (19c)$$

En outre, le caractère stationnaire se définit par rapport à la constance du taux d'infiltration.

Enfin, concernant la différence  $I_{3D} - I_{1D}$ , la normalisation de la relation ci-dessous se traduit par simple relation linéaire :

$$\Delta I^* = \gamma t^* \quad (20)$$

### Dimensionalisation du modèle analytique de Haverkamp

Une fois  $I^*$  déterminée par l'application d'une des formulations normalisée, il est possible de remonter aux valeurs dimensionnelles de l'infiltration cumulée en 1D par la formule suivante :

$$I_{1D} = \frac{S^2}{2\Delta K} I^* + K_0 t \quad (21)$$

Ensuite, l'infiltration dimensionnelle 3D peut être déduite aisément par la formulation suivante :

$$I_{3D} = I_{1D} + \frac{S^4}{2\Delta K^2 r_d \Delta \theta} \Delta I^* \quad (22)$$

#### 2.1.3 Zones d'écoulements préférentiels

Toutes les équations précédentes ont été développées pour le cas d'écoulements homogènes, c'est-à-dire avec un seul compartiment d'écoulement de type matriciel. Or, les écoulements préférentiels sont relativement courants (Vereecken et al., 2019). C'est le cas notamment des réseaux de macropores, fissures et fractures (Figure 3) qui se traduisent par la présence d'un écoulement rapide en même temps que l'écoulement dans la matrice du sol.

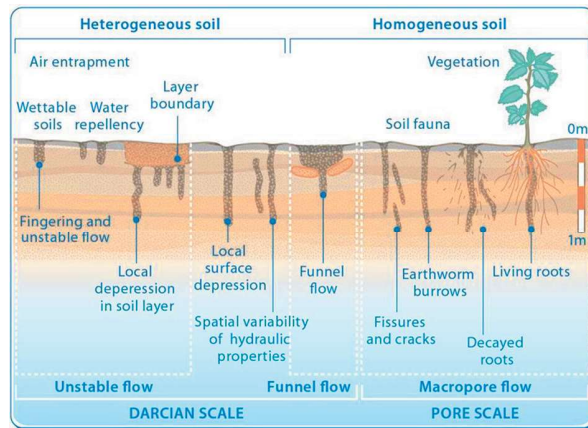


Figure 3: Différents types de zones d'écoulements préférentiels (Vereecken et al., 2019).

Différents modèles existent pour prendre en compte ce phénomène, comme les modèles à double perméabilité ou à double porosité (Šimůnek et al., 2003). Dans le cas des modèles de double perméabilité, le sol comprend deux compartiments : matrice et macropore/fracture, chaque compartiment étant décrit comme un milieu poreux darcéen. La teneur en eau ( $\theta_{2K}$ ), la conductivité hydraulique ( $K_{2K}$ ) et le flux ( $q_{2K}$ ) au niveau global peuvent être décrits à partir des valeurs dans chaque compartiment (Gerke et van Genuchten, 1993) :

$$\theta_{2K} = w_f \theta_f + (1 - w_f) \theta_m \quad (23a)$$

$$K_{2K} = w_f K_f(\theta_f) + (1 - w_f) K_m(\theta_m) \quad (23b)$$

$$q_{2K} = w_f q_f + (1 - w_f) q_m \quad (23c)$$

où les variables d'état ont été définies ci-dessus et les indices «m» et «f» font référence respectivement à la matrice et au compartiment macropore/fracture.  $w_f$  correspond à la fraction volumique occupée par le compartiment macropore/fracture :

$$w_f = \frac{V_f}{V_{tot}} \quad (24)$$

Le modèle d'écoulement à double perméabilité prend en compte les écoulements dans les deux compartiments : des écoulements préférentiels dans le compartiment macropore/fracture et un écoulement matriciel dans la matrice du sol. Ce modèle prend aussi en compte les flux à l'interface entre les deux compartiments. Les équations sont donc les suivantes (Gerke & Van Genuchten, 1993) :

$$\frac{\partial \theta_f}{\partial t} = \nabla \cdot [K_f(\theta_f) \nabla H_f] + \varphi_{w_f} - \frac{\Gamma_w}{w} \quad (25a)$$

$$\frac{\partial \theta_m}{\partial t} = \nabla \cdot [K_m(\theta_m) \nabla H_m] + \varphi_{w_m} + \frac{\Gamma_w}{1 - w} \quad (25b)$$

$$\Gamma_w = \alpha_w (h_f - h_m) \quad (25c)$$

$\alpha_w [T^{-1}L^{-1}]$  est le coefficient de transfert de masse du premier ordre. Il se caractérise par l'expression suivante :

$$\alpha_w = \frac{\beta_a}{d^2} K_{s,a} \gamma_w \quad (26)$$

avec  $\beta_a$  et  $\gamma_w$  des facteurs de forme,  $d [L]$  une longueur caractéristique de la matrice,  $K_{s,a} [LT^{-1}]$  la conductivité hydraulique de l'interface entre la matrice et la zone d'écoulements préférentiels qui s'exprime par l'expression :

$$K_{s,a} = \frac{1}{2} [K_{s,a}(h_f) + K_{s,a}(h_m)] \quad (27)$$

Cette approche permet de prendre en compte le phénomène d'écoulements préférentiels, sans pour autant devoir définir de façon arbitraire la position d'une zone d'écoulements préférentiels dans le domaine numérique d'étude. Néanmoins, cela entraîne un besoin en ressource numérique supplémentaire. Dans le cadre de ce travail de fin d'études, le modèle de double perméabilité ne sera pas utilisé. La définition arbitraire d'une zone d'écoulements préférentiels à géométrie simple a été privilégiée. Nous avons donc choisi de résoudre l'équation de Richards (équation 8) en divisant le domaine numérique entre la matrice qui occupe la grande majorité du domaine, et une petite zone avec une perméabilité augmentée correspondant à la zone d'écoulements préférentiels.

Les paramètres  $\alpha_f$  et  $K_{s,f}$  de la zone d'écoulements préférentiels (fracture) peuvent être reliés à la taille des pores en utilisant l'équation de Young- Laplace telle que décrite dans (Kutílek and Nielsen, 1994) :

$$\alpha_f = \frac{r_f}{\zeta} \quad (28)$$

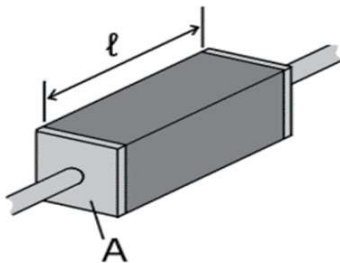
$$\zeta = \frac{2\sigma_{aw} \cos(\beta_c)}{\rho_w g} \quad (29)$$

avec  $\sigma_{aw}$  [ $MT^{-2}$ ] la tension superficielle à l'interface entre l'air et l'eau,  $\beta_c$  [-] l'angle de contact,  $\rho_w$  [ $ML^{-3}$ ] la masse volumique de l'eau,  $g$  [ $LT^{-2}$ ] l'accélération de pesanteur. D'autre part, la conductivité hydraulique à saturation décroît linéairement avec le carré de la taille des pores selon la loi de Poiseuille (Bear, 1988). C'est pourquoi le choix des valeurs de  $\alpha_f$  et de  $K_{s,f}$  pour une zone d'écoulements préférentiels peut se faire à l'aide d'un coefficient multiplicatif  $x$ , de telle sorte que les valeurs de  $\alpha_f$  et  $K_{s,f}$  sont exprimées à l'aide des valeurs de  $\alpha_m$  et  $K_{s,m}$  de la matrice en les multipliant par  $x$  pour  $\alpha_f$  et  $x^2$  pour  $K_{s,f}$ . Cette méthode a été proposée par plusieurs auteurs pour étudier l'infiltration préférentielle dans les milieux à double perméabilité (Lassabatere, Yilmaz, et al., 2014 Watson and Luxmoore, 1986, Timlin, Ahuja, and Ankeny, 1994).

## 2.2 Méthode géophysique : Tomographie de Résistivité Electrique (TRE)

### 2.2.1 Tomographie de résistivité électrique

La résistivité électrique du sol est exprimée en  $\Omega.m$ , elle est l'inverse de la conductivité électrique, exprimée, elle, en S.m. Pour un élément de sol de longueur  $l$  (m) et de section  $A$  ( $m^2$ ) se trouvant entre deux électrodes planes par lesquelles circulent un courant  $I$  (A) et dont la différence de potentiel entre les deux électrodes est  $U$  (V), la résistivité  $\rho$  de cet élément de sol est donnée par l'équation 30 :



$$\rho = \frac{AU}{lI} \quad (30)$$

Figure 4: Échantillon de sol schématisé

Le tableau suivant donne un aperçu des valeurs de résistivité électrique de plusieurs fluides et matériaux.

Table 2: Valeurs de resistivité exprimées en  $\Omega.m$  (Knödel, Voigt, and Lange, 2007)

Matériaux et fluides	Résistivité ( $\Omega.m$ ) minimum	Résistivité ( $\Omega.m$ ) maximum
Gravier	50 (saturé en eau)	$> 10^4$ (sec)
Sable	50 (saturé en eau)	$> 10^4$ (sec)
Limon	30	100
Argile (humide)	5	30
Argile (sèche)		$> 1000$
Eau douce	10	300
Eau de mer (35 ‰ NaCl)	0.25	

La TRE permet de réaliser des cartographies 2D ou 3D de variations de la résistivité électrique  $\rho$  du sous-sol. La résistivité ( $\Omega.m$ ) est définie comme la résistance électrique du milieu par unité de longueur. La mesure de la résistivité électrique d'un sol consiste à faire circuler artificiellement un courant continu à travers deux électrodes d'injection (A et B, en rouge sur la Figure 5). Une différence de potentiel  $\Delta V$ , en volts, est alors mesurée entre deux autres électrodes dites «de mesure de potentiel» (M et N, en bleu sur la Figure 5).

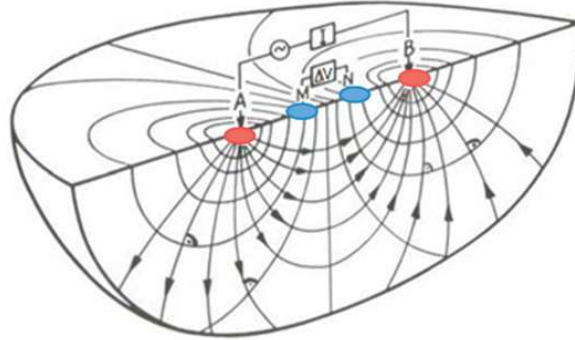


Figure 5: Dispositif en quadripôle de la méthode TRE (Knödel, Voigt, and Lange, 2007) : en rouge (A et B) les électrodes servant à l'injection du courant, en bleu (M et N) celles servant à la mesure de potentiels.

La résistivité apparente se calcule à partir de la différence de potentiels mesurés entre les électrodes M et N  $\Delta V$ , du courant injecté  $I$  et d'un facteur géométrique  $K$  selon l'équation suivante.

$$\rho_{app} = K \cdot \frac{\Delta V}{I} \quad (31)$$

Le facteur géométrique  $K$  dépend de la configuration du quadripôle (Tableau 3). Il est calculé dans un demi-espace par les équations de Neumann :

$$K = \frac{1}{2\pi} \left[ \left( \frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right) - \left( \frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right) \right] \quad (32)$$

La résistivité est alors déterminée à l'aide de la loi d'Ohm et d'un coefficient géométrique tenant compte de la position des électrodes. Les quatre électrodes en surface du sol forment un quadripôle.

Table 3: Exemples de coefficients géométriques pour différents dispositifs de quadripôles.

Dispositifs	Configuration des électrodes	Coefficient géométrique
Wenner-alpha		$K = 2\pi a$
Wenner-Schlumberger		$K = \pi n(n + 1)a \quad n > 3$
Dipôle-dipôle		$K = 2\pi n(n + 1)(n + 2)a$
Pôle-Dipôle		$K = 2\pi n(n + 1)a$

En écartant les électrodes d'injection A et B, il est possible de créer des circulations de courant de plus en plus profondes (Figure 6). Ainsi, l'information collectée dépend de l'agencement des électrodes (Dahlin, 2001).

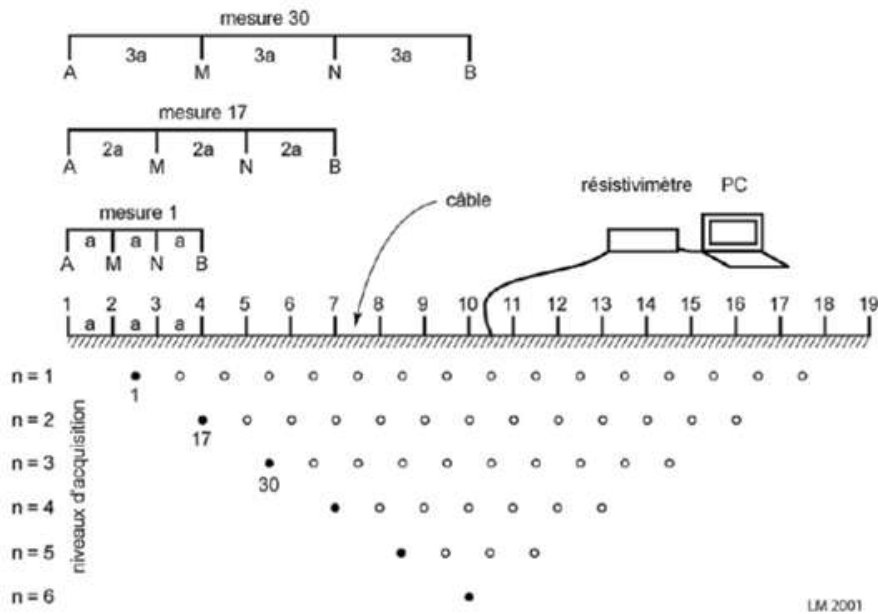


Figure 6: Schéma explicatif de l'acquisition d'une pseudo-section 2D (Loke and Barker, 1996)

Pour la modélisation de l'acquisition TRE, c'est l'équation de Poisson qui régit le champ électrique qui est résolue :

$$\nabla \cdot \left[ \frac{1}{\rho(\mathbf{r})} \nabla V(\mathbf{r}) \right] = -\nabla \cdot \mathbf{j}(\mathbf{r}) \quad (33)$$

avec  $\mathbf{r}$  le vecteur position,  $\rho$  la résistivité électrique [ $\Omega.m$ ],  $V$  le potentiel électrique [ $V$ ] et  $\mathbf{j}$  la densité de courant [ $A.m^{-2}$ ].

La TRE a fait ses preuves pour la détection de variation temporelle de teneur en eau dans le sol pour des applications diverses comme les suivis d'infiltrations dans les versants (Scaini et al., 2017) ou encore le suivi de l'évolution d'infiltration dans des surfaces d'infiltration d'eaux usées traitées (Delgado-Gonzalez et al., 2023). Pour suivre l'infiltration par TRE, il faut connaître la relation entre la teneur en eau du sol et la résistivité électrique. Pour cela, plusieurs modèles existent : le modèle le plus connu est la loi d'Archie, généralisée par Campbell, qui relie teneur en eau et porosité à la résistivité électrique pour les milieux non saturés selon l'expression suivante :

$$\rho = \rho_w a_A \Phi^{-m_A} S_e^{-n_A} \quad (34)$$

avec  $\rho_w$  la résistivité électrique de l'eau d'imbibition [ $\Omega.m$ ],  $a_A$  un facteur qui dépend de la lithologie [m],  $\Phi$  la porosité,  $m_A$  un facteur de cimentation,  $S_e$  le degré de saturation et l'exposant  $n_A$  qui varie peu et vaut environ 2. Les paramètres  $m_A$  et  $n_A$  ne doivent pas être confondus avec les paramètres  $m$  et  $n$  de van Genuchten.

Si la loi d'Archie est une loi empirique très utilisée pour relier la résistivité électrique du sol et la teneur en eau, elle n'est valable que pour les sols contenant moins de 20% d'argile. D'autres lois de types polynomiales, puissances ou exponentielles sont également utilisées.

Pour caractériser des chemins d'écoulements préférentiels par la TRE, l'ajout d'un traceur salin à l'eau est souvent privilégié pour accentuer le contraste. Néanmoins, la détection de chemins préférentiels via des macropores s'avère complexe en raison de la taille des chemins préférentiels trop petits pour certains d'entre eux, ceux-ci ne pouvant être clairement identifiables à la TRE.

### 2.2.2 Modélisation numérique directe des données TRE

La modélisation numérique des données TRE permet de générer des résistivités apparentes à partir d'un modèle de résistivités vraies générées numériquement. Dans ce travail de fin d'études, le code Matlab F3DM (Forward 3D Modelling) a été utilisé. Ce code couple Matlab et COMSOL Multiphysics et permet ainsi d'obtenir les données TRE sur des géométries pouvant être complexes, discrétisées en éléments finis. Un exemple de section de résistivités apparentes obtenues à l'aide de F3DM est représentée par la figure 7.

Il s'agit d'une distribution de résistivités vraies comportant une hétérogénéité rectangulaire d'une résistivité de  $500 \Omega.m$  dans une matrice de résistivité de  $10 \Omega.m$  (Figure 7a) et de la pseudo-section des résistivités mesurées par la TRE (Figure 7a). Cela illustre le fait que, ne connaissant pas les résistivités vraies dans les essais de terrain, les résistivités apparentes, mesurée par la TRE, ne suffisent pas pour établir une interprétation de ces résultats. L'utilisation de processus d'inversion entre alors en jeu pour pouvoir exploiter les résistivités apparentes.

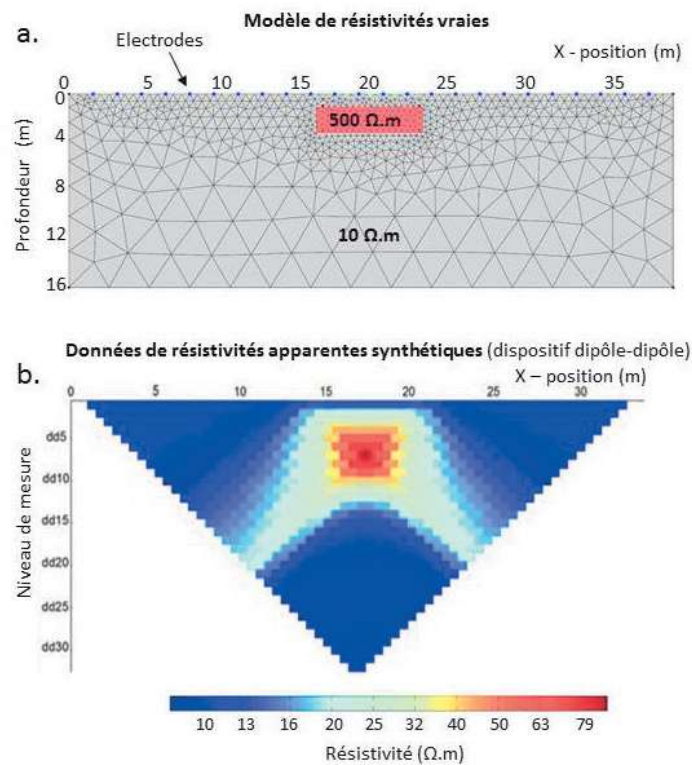


Figure 7: Exemple de simulation d'acquisition TRE avec F3DM. a. Modèle de résistivités vraies créé avec COMSOL Multiphysics b. Section de résistivités apparentes suite à la simulation de l'acquisition (Audebert, 2015)

### 2.2.3 Inversion des données TRE : principes

Avant toute interprétation, les données TRE doivent donc subir un processus d'inversion. En effet, les données brutes mesurées ne reflètent pas les paramètres réels du terrain. Il existe un certain nombre de méthodes d'inversion de données géophysiques mais le principe général reste le même. Dans le cas de la TRE, il s'agit de générer une carte de résistivités interprétées à partir des tensions mesurées sur le terrain, le but étant d'obtenir des résistivités interprétées les plus proches possibles des résistivités vraies du sol qui sont inconnues. Les résistivités interprétées sont calculées à partir de modélisations directes basées sur la résolution de l'équation de Poisson. En effet, l'inversion se base sur un maillage en éléments finis. À chaque élément est attribuée une valeur de résistivité, puis un calcul direct de résistivité apparente est mené à partir de cette distribution. Ces résistivités apparentes obtenues ainsi par simulation sont comparées aux résistivités qui doivent être inversées. Cette comparaison mène à un ajustement des résistivités attribuées à chaque élément. Ainsi, le processus d'inversion consiste à minimiser une fonction objectif par itérations successives. Cette fonction objectif mesure la différence entre les résistivités apparentes mesurées et les résistivités interprétées. Les résistivités interprétées sont donc actualisées à chaque itération afin de minimiser la fonction objectif. La figure suivante illustre ce principe.

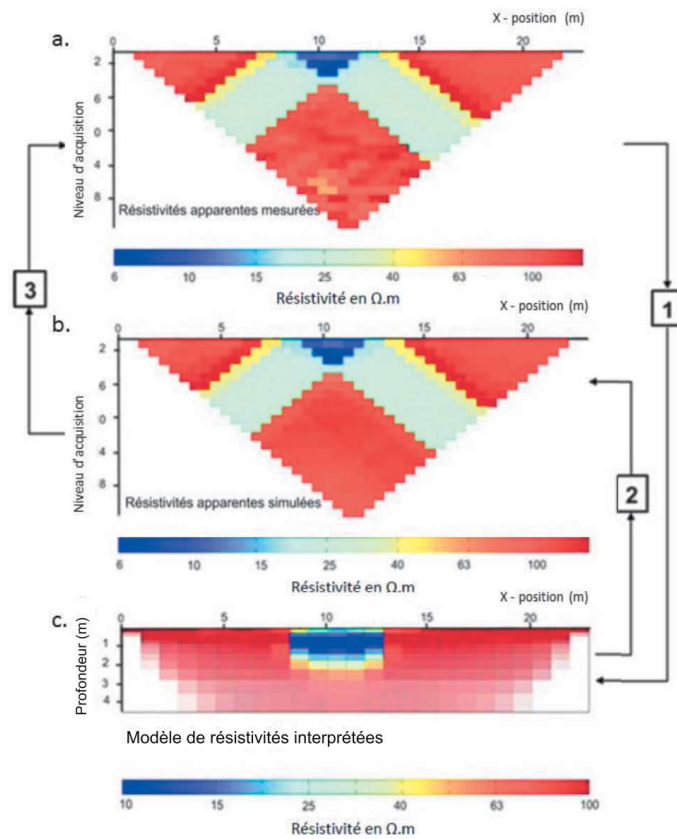


Figure 8: Principe itératif d'une inversion TRE (Clément, 2010). [1] Calcul du modèle de résistivités. [2] Calcul du modèle de résistivités apparentes simulées. [3] Comparaison du modèle de résistivités apparentes mesurées sur le terrain et simulées.

### 2.2.4 Inversion des données TRE en suivi temporel (time-lapse)

Le principal objectif de l'inversion en suivi temporel, *time-lapse* en anglais, est d'obtenir les dynamiques de changements de résistivité dans le sous-sol sous la forme de séries temporelles de résistivités. Cette technique se prête particulièrement bien à la détection d'infiltration car elle permet de surveiller de manière non invasive les variations subtiles dans le sous-sol causées par des phénomènes tel que l'écoulement de l'eau. Cette méthode a notamment été utilisée par Clément, 2010 et Audebert, 2015 dans l'étude de ré-injection de lixiviat dans un massif de déchets. La méthode TRE time-lapse est basée sur l'acquisition de données de résistivité électrique à différents moments, au même endroit et avec la même séquence de quadripôles. Ces données sont ensuite traitées et inversées pour obtenir des images de la distribution de la résistivité dans le sous-sol au cours du temps. Il existe plusieurs méthodes d'inversion time-lapse mais la plupart se base sur la comparaison des données acquises à un instant  $t$  par rapport à l'instant initial. Cet instant initial peut être considéré comme une référence pour être comparé aux autres instants ou bien l'inversion peut être faite non pas sur les données de résistivités mais sur la différence entre les résistivités aux autres instants et la résistivité initiale. Enfin, une autre méthode consiste à initialiser la première itération du processus d'inversion par les données de résistivités interprétées obtenues à partir de l'instant initial. Dans tous les cas, les inversions time-lapse ne sont pas indépendantes et se basent d'une manière ou d'une autre sur la comparaison avec des données obtenues à d'autres instants.

## 3 Matériels & Méthodes

### 3.1 Méthodologie générale

Dans cette partie, nous décrivons les approches utilisées pour la modélisation des processus d'écoulements (dans un contexte d'infiltration) et de la tomographie de résistivité électrique (TRE) (comme méthode d'observation de l'infiltration). Pour rappel, l'objectif final est de voir, par une approche de modélisation, si la TRE permet de déterminer précisément les zones humidifiées au cours de l'infiltration. Néanmoins, la modélisation se fait pas à pas, en procédant en premier lieu à la modélisation de l'infiltration de l'eau dans le sol, avant de modéliser l'acquisition par TRE pour une infiltration donnée. La modélisation de l'infiltration fait l'objet d'un soin particulier, avec une étape de validation de la modélisation par l'outil COMSOL.

Pour procéder à la validation des données de modélisation COMSOL, nous avons produit les modélisations suivantes :

- L'infiltration a été modélisée pas à pas en 1D, en 2D axisymétrique (avec des mailles rectangulaires et triangulaires) et en 3D (bloc de sol avec des mailles tétraédriques).
- Les données de modélisation COMSOL sont réalisées pour plusieurs finesses de maillage : nous testons l'évolution des résultats, notamment la quantité infiltrée en surface (infiltration cumulée) en fonction du maillage. Cela permet d'avoir une idée de la maille la plus fine nécessaire pour avoir une bonne description des processus.
- L'infiltration cumulée obtenue par COMSOL a été modélisée en fonction des conditions initiales (et aussi du maillage) et ainsi étudiée au regard des principes de la physique du sol.
- Les infiltrations cumulées obtenues par COMSOL sont comparées à des données numériques de référence obtenues avec un logiciel dédié à la modélisation des écoulements en zone non saturée, i.e., Hydrus. Les données qui servent de référence ont déjà été validées et publiées.
- Enfin, les infiltrations cumulées 3D obtenues ont été comparées au modèle analytique d'Haverkamp, qui sert aussi fréquemment de référence (ref).

Pour les sols uniformes, une fois la modélisation de l'infiltration validée et bien étudiée, un écoulement hétérogène a été modélisé en considérant une zone de perméabilité accentuée (et capillarité réduite) dans le domaine numérique. Cela a permis de modéliser le scénario d'écoulements préférentiels.

La modélisation de l'infiltration correspond finalement à une grande partie des travaux réalisés. Une fois ce volet effectué, la partie TRE a été abordée. La modélisation de la TRE nécessite une approche 3D complexe. Ainsi, les étapes précédentes ont permis de valider l'approche de modélisation des écoulements pas à pas (par validation successives des approches 1D, 2D axisymétrique et 3D). La modélisation 3D des écoulements est donc considérée comme acquise. Dans ce contexte, les cartes de teneur en eau ont été utilisées à différents temps pour déduire la résistivité vraie du milieu et pour modéliser la résistivité électrique apparente pour plusieurs configurations d'acquisition (espacement des électrodes, temps d'acquisition, méthode de traitement, etc...). Les cartes de résistivités électriques ainsi obtenues ont été inversées pour avoir les cartes de résistivités interprétées. Ces dernières correspondent au produit de l'application de la TRE sur le terrain. Ainsi, nous avons comparé, pour valider l'approche TRE, les cartes de résistivités interprétées aux cartes réelles de teneur en eau dans le sol pour le cas d'un bloc de sol homogène et d'un bloc de sol sujet à un écoulement préférentiel.

## 3.2 Modélisations de l'infiltration par COMSOL

### 3.2.1 Présentation des logiciels Hydrus 1D/3D et COMSOL Multiphysics

Dans ce travail de fin d'études, deux logiciels de modélisation pour l'infiltration ont été utilisés, Hydrus 1D et 3D d'une part et COMSOL Multiphysics d'autre part.

Hydrus est un environnement de modélisation conçu pour simuler l'écoulement de l'eau et le transport de solutés dans des milieux poreux tels que les sols. Il fonctionne sous Microsoft Windows et permet de produire des modélisations pour des applications 1D, 2D et 3D. C'est donc un outil très polyvalent qui est largement utilisé dans les domaines tels que l'agriculture, l'hydrologie et plus largement en environnement. Pour la résolution des problèmes d'infiltration, Hydrus 1D et 3D utilisent une méthode des éléments finis pour résoudre l'équation de Richards. La méthode des éléments finis permet de subdiviser spatialement le domaine en éléments de dimensions inférieures; cela permet de résoudre localement les équations sur chaque élément. Plus les éléments sont de petite taille, plus la précision de la solution sera bonne. Néanmoins, plus les éléments sont petits, plus leur nombre sera grand et donc le temps de calcul conséquent. Tout l'enjeu est de trouver le bon compromis entre précision souhaitable et temps de calcul raisonnable. De plus, les équations régissant l'écoulement et le transport sont résolues numériquement en utilisant des schémas d'éléments finis linéaires de type Galerkin pour l'approximation des dérivées spatiales. Quant à l'intégration dans le temps, elle est réalisée à l'aide d'un schéma de différences finies implicites (backward) en conditions saturées et non saturées. Le schéma implicite temporel permet notamment de garantir la stabilité numérique lors de la simulation des problèmes transitoires. Afin d'améliorer l'efficacité de la solution pour les problèmes en régime transitoire, l'ajustement automatique du pas de temps a été implémenté dans Hydrus.

Quant à COMSOL, il s'agit d'un logiciel de simulation polyvalent pour la modélisation et la simulation de diverses applications en physique et en ingénierie. Il offre en particulier des possibilités de modélisations multi-physiques entièrement couplées, permettant le développement de modèles dans de nombreux domaines comme en électricité, en mécanique, en chimie et en dynamique des fluides. COMSOL dispose d'un environnement de développement qui comprend des outils pour la création de modèles ou encore l'application de simulation avec des paramètres personnalisés. Les différentes physiques disponibles sont ajoutées via des modules complémentaires. Par exemple, l'équation de Richards qui régit les écoulements de l'eau à travers le sol, se trouve dans le module « Subsurface flow ». Tout comme Hydrus, COMSOL utilise également les éléments finis pour la discrétisation spatiale des problèmes à résoudre. Comme dit précédemment, les méthodes des éléments finis (FEM) permettent de diviser le domaine en éléments plus petits, ce qui permet d'obtenir une plus grande précision dans la résolution de l'écoulement des fluides dans des milieux homogènes ou hétérogènes et de modéliser des géométries complexes telles que des topographies complexes pour les modélisations des essais de terrain.

Les différentes géométries d'éléments 3D disponibles sont données sur la figure suivante, avec, de gauche à droite, tétraèdre, brique, prisme et enfin pyramide.

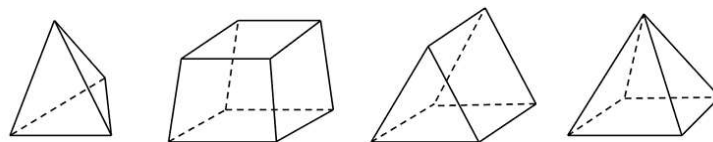


Figure 9: Les quatre types d'éléments 3D disponibles dans COMSOL

COMSOL propose plusieurs méthodes pour mesurer la qualité des éléments du maillage. Dans tous les cas, il s'agit d'une quantité sans dimension comprise entre 0 et 1, où 1 représente un élément parfaitement régulier dans la mesure de qualité choisie, et 0 représente un élément dégénéré. COMSOL utilise par défaut la mesure de l'asymétrie des éléments (*skewness*) comme mesure de qualité. Cette quantité est calculée par la formule :

$$1 - \max\left(\frac{\theta - \theta_e}{180 - \theta_e}, \frac{\theta_e - \theta}{\theta_e}\right) \quad (35)$$

avec  $\theta$  l'angle au niveau d'un sommet (2D) ou d'une arête (3D) de l'élément,  $\theta_e$  l'angle de l'arête ou du sommet correspondant dans un élément idéal. Le minimum est ensuite pris sur tous les sommets (2D) ou arêtes (3D) de l'élément.

Du côté de la résolution temporelle, l'interface relative au solveur de COMSOL permet de paramétrer différents schémas de résolution temporelle faisant partie des méthodes implicites Backward Differentiation Formula (BDF) ou encore de la famille des méthodes explicites Runge-Kutta. Les méthodes implicites BDF sont utilisées depuis longtemps et sont connues pour leur stabilité. COMSOL utilise ce solveur par défaut et c'est celui qui a été utilisé lors des simulations. Pour ce qui est de la résolution non-linéaire à chaque pas de temps, c'est la méthode de Newton qui est utilisée. Il est possible de choisir une mise à jour de la Jacobienne à chaque itération ou bien une seule fois par pas de temps. Le choix de mettre à jour la Jacobienne à chaque itération peut améliorer la convergence dans certains cas, mais demande plus de ressources de calcul. Dans ce travail de fin d'études, cela n'a été que rarement utilisé. Enfin, tout comme Hydrus, il est possible de paramétrer la mise à jour automatique du pas de temps de la résolution temporelle. Cette stratégie permet d'augmenter le pas de temps au cours de la simulation tout en maintenant la stabilité numérique et donc, in fine, de gagner en temps de calcul.

L'utilisation de COMSOL pour ce travail de fin d'études était opportun de par l'aspect multiphysique des modélisations possibles. Cependant, d'autres logiciels existent et ont été spécifiquement développés pour des modélisations d'infiltration, comme c'est le cas du logiciel Hydrus. En effet, Hydrus 1D et 3D sont des logiciels fiables en ce qui concerne la modélisation de l'infiltration et du transfert de polluants. L'idée était donc, dans un premier temps, de comparer les résultats obtenus à la suite de simulation COMSOL et Hydrus avec des domaines et des conditions identiques. Cela permet de valider les modélisations obtenues avec COMSOL en les comparant aux résultats obtenus avec Hydrus. Ce dernier logiciel a été utilisé maintes fois pour la modélisation de l'infiltration dans le sol et validé dans ce contexte. Les fichiers de modélisation Hydrus avaient été mis au point et validés en amont par des études précédentes Lassabatere, Angulo-Jaramillo, et al., 2009. Enfin, toutes les simulations ont été effectuées sur un PC portable équipé d'un processeur à 10 cœurs Intel Core i7-1255U.

### 3.2.2 Modélisation de l'infiltration 1D

Pour la validation des modèles 1D, le sol choisi pour cet étude est un limon dont les paramètres hydrodynamiques de van Genuchten sont ceux proposés par Hydrus dans la table des valeurs prédéfinies (Tableau 4).

Le limon a été choisi comme type de sol pour toute cette étude car ses propriétés hydrodynamiques sont intermédiaires, entre sols très fins et sols à contrario très grossiers (Carsel and Parrish, 1988). Le limon se situe entre les sols sableux à infiltration rapide et les sols argileux à infiltration lente. Dans le cas de modélisation d'infiltration, les sables peuvent poser des problèmes de convergence avec de plus fort gradients de teneur en eau. En outre, les sols argileux ne permettent pas d'appliquer

Table 4: Valeurs des paramètres de van Genuchten d'un limon - Hydrus 2D/3D

	$\theta_r$	$\theta_s$	$\alpha [cm^{-1}]$	$n$	$K_s [cm/min]$
<b>Limon</b>	0.078	0.43	0.036	1.56	0,0173333

la loi d'Archie qui fait le lien entre la résistivité du sol en fonction de sa teneur en eau et qui est nécessaire pour coupler infiltration et tomographie de résistivité électrique. L'utilisation de cette loi sera détaillée ultérieurement.

La géométrie du domaine, quant à elle, est un profil de 1m de profondeur (Figure 10). La surface du sol correspond à l'abscisse  $z = 0$ . Les deux conditions aux limites, en surface et en bas du domaine, sont respectivement une condition de Dirichlet avec un potentiel de pression nul et un drainage libre correspondant à une condition de Neumann nulle.

Ce choix de condition de surface correspond à un essai d'infiltration de type Beerkan (Lassabatere, Angulo-Jaramillo, et al., 2009, Braud et al., 2005, Lassabatère et al., 2006).

Lors d'un essai de type Beerkan, l'opérateur met dans un anneau d'infiltration une petite quantité d'eau (dont le volume est connu), attend que cette dernière s'infilte complètement puis verse de nouveau la même quantité d'eau. À chaque infiltration, le temps est mesuré. L'essai s'arrête lorsque le temps entre deux volumes versés est le même. En terme de conditions limites, on néglige les oscillations liées à l'apport de chaque volume d'eau et on considère que le potentiel de pression est quasi constant et nul (Lassabatere, Angulo-Jaramillo, et al., 2009).

Quant à la condition de drainage libre, il s'agit de permettre à l'infiltration de ne pas être influencée par la condition basse. Ce type de condition est souvent utilisée pour la modélisation des flux d'eau dans les horizons supérieurs du sol et en condition de nappe phréatique profonde (Šimůnek et al., 2003).

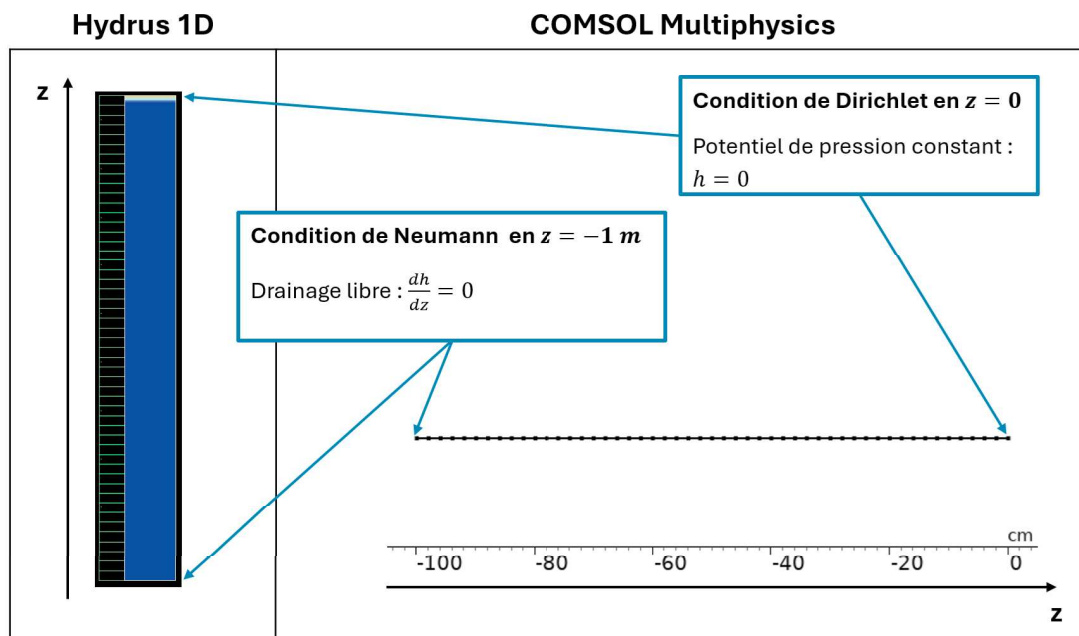


Figure 10: Exemples de modèles 1D, Hydrus et COMSOL

En terme de conditions initiales, nous avons considéré des valeurs de potentiels de pression

(et donc de teneur en eau) uniformes sur tout le domaine numérique. Une fois de plus, c'est le protocole habituel de modélisation de l'infiltration, correspondant à des conditions de sols drainés. Ce protocole s'applique bien dans la majorité des cas.

La condition de Dirichlet nulle en surface a tout de suite posé des problèmes de convergence des modèles COMSOL, conduisant parfois à des messages d'erreur faisant référence à une division par zéro. Ainsi, il a été décidé de procéder à une étude de sensibilité des modèles COMSOL à la valeur du potentiel de pression constant en surface. Cela a été défini dans le but de remplacer la valeur nulle par une valeur la plus proche de zéro permettant au modèle de converger tout en limitant l'erreur commise par cette valeur non nulle. Une étude de sensibilité a également été effectuée sur la précision du maillage et le respect de la condition de Neumann en  $z = -1$  m. Cette dernière étude de sensibilité à la finesse du maillage est complétée par l'influence sur l'infiltration cumulée et le taux d'infiltration. Enfin, plusieurs scénarios de valeurs initiales homogènes ont également été testés et les résultats entre Hydrus et COMSOL ont été comparés. Certaines comparaisons entre les modèles COMSOL et Hydrus utilisent l'erreur relative entre les infiltrations cumulées obtenues. Cette erreur relative se calcule via l'expression suivante :

$$Err(t, I) = \frac{I_{ref}(t) - I(t)}{I(t)} \quad (36)$$

avec  $I(t)$  l'infiltration cumulée d'un modèle à l'instant  $t$  et  $I_{ref}(t)$  l'infiltration cumulée du modèle de référence par rapport auquel l'erreur relative veut être calculée. Une valeur positive signifie que le modèle surestime le modèle de référence et inversement, des valeurs négatives indiquent une sous-estimation. Les différentes études de sensibilité et tests de validité des modèles COMSOL en 1D ont permis de poser les bases des modèles d'infiltration en dimension supérieure avec COMSOL.

### 3.2.3 Modèles 2D axisymétriques avec éléments carrés

Avant de se diriger vers une comparaison des modèles 3D entre COMSOL et Hydrus, il a semblé intéressant de passer d'abord par des modèles 2D axisymétrique. En effet, ces modèles se prêtent particulièrement bien à des infiltrations à travers un anneau en milieu homogène de par la géométrie cylindrique du problème physique traité. Les conditions initiales et conditions aux limites n'ont pas été changées, ni la nature du sol et ses propriétés hydrodynamiques (Figure 11). Les maillages ont été pris identiques afin de permettre une comparaison des deux modèles COMSOL et Hydrus. Le maillage dans Hydrus se fait, par défaut, par éléments rectangulaires ; c'est donc également ce type de maillage qui a été appliqué aux modèles COMSOL dans un premier temps. Néanmoins, les discrétisations horizontale et verticale ont été prises identiques : ainsi, les éléments sont en fait carrés dans tous les modèles. Les côtés d'éléments carrés qui ont été testés sont, 2 cm, 0.5 cm et 0.2 cm. Ces valeurs correspondent respectivement à un nombre d'éléments de 2500, 40 000 et 250 000. Les comparaisons portent sur l'infiltration cumulée et le taux d'infiltration qui sont des variables intégratives, et cela à plusieurs moments de l'infiltration.

Dans cette partie, l'anneau d'infiltration choisi mesure 10 cm de diamètre, ce qui correspond à une taille standard pour un anneau d'infiltration (Angulo-Jaramillo, Bagarello, Di Prima, et al., 2019). Dans la partie suivante (modélisation 3D), nous utiliserons un anneau plus grand correspondant à un prototype en développement dans le laboratoire. L'objectif de cette étude était d'identifier une éventuelle taille d'élément susceptible d'obtenir des résultats similaires entre COMSOL et Hydrus. Les données numériques de COMSOL ont aussi été validées avec le modèle analytique d'Haverkamp. En effet, ce modèle s'applique au cas des essais Beerkan (avec utilisation d'un anneau comme source et donc une géométrie circulaire).

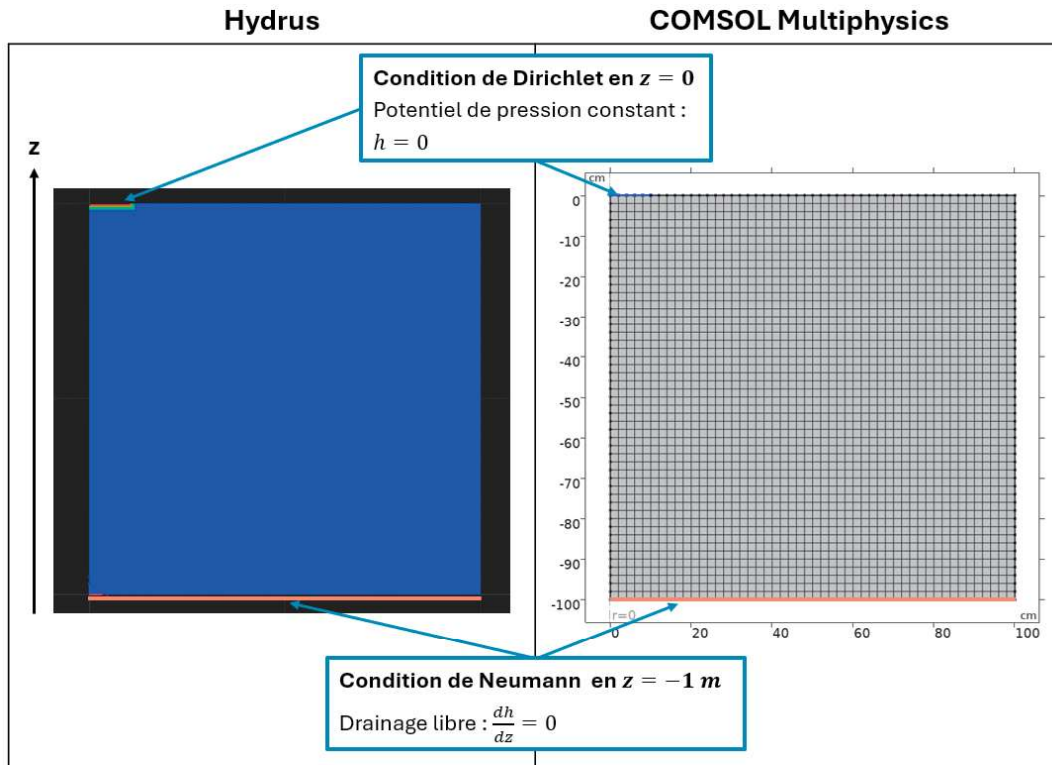


Figure 11: Exemples de modèles 2D axisymétriques avec éléments carrés, Hydrus et COMSOL.

### 3.2.4 Modèles 2D axisymétriques avec éléments triangulaires

Dans les modèles 3D qui suivront, les éléments utilisés seront tétraédriques. En effet, ces éléments sont beaucoup utilisés car ils permettent une meilleure précision en présence de géométries hétérogènes comme c'est le cas sur les essais de terrain avec des configurations complexes (topographie, sols stratifiés ou contenant des inclusions, etc...). Même si, dans ce travail de fin d'études, la topographie est plane, ces modèles pourront servir à l'avenir pour des modélisations d'essais de terrain où elle ne le sera pas forcément. Ainsi, dans le but de se rapprocher des modèles 3D ultérieurs tout en limitant le temps de calcul, nous avons étudié la capacité de la modélisation de type 2D axisymétrique avec des éléments triangulaires afin de modéliser l'infiltration dans le sol. En outre, il est attendu que ce type d'approche avec des éléments triangulaires se rapproche le plus, en 2D, des éléments tétraédriques en 3D. Comme pour les modélisations précédentes, le sol est toujours un limon homogène. Nous avons pris en compte des conditions initiales et des conditions aux limites comparables aux scénarios de modélisations 1D et 2D axisymétriques. Nous avons pu comparer l'infiltration cumulée obtenue pour plusieurs maillages plus ou moins fins. Après changement, l'anneau d'infiltration mesure 25 cm de rayon et les paramètres hydrodynamiques du limon sont ceux utilisés dans les modélisations Hydrus. Dans un premier temps, un maillage grossier a été choisi afin de voir le comportement de l'infiltration jusqu'à 48h, délais suffisamment longs pour englober tous les scénarios étudiés par la suite. La géométrie modélise 1 m de profondeur de sol sur un rayon de 1 m (Figure 12b).

Afin d'avoir une référence d'infiltration fiable pour valider les modèles 3D homogènes, un modèle 2D axisymétrique avec un maillage le plus fin possible a été utilisé. Puis la formulation QEI (Quasi-Exact Implicit), qui correspond au modèle d'Haverkamp, a été prise comme référence analytique après optimisation. Cette optimisation consiste en fait à déterminer les paramètres  $\beta$  et  $\gamma$  pour que

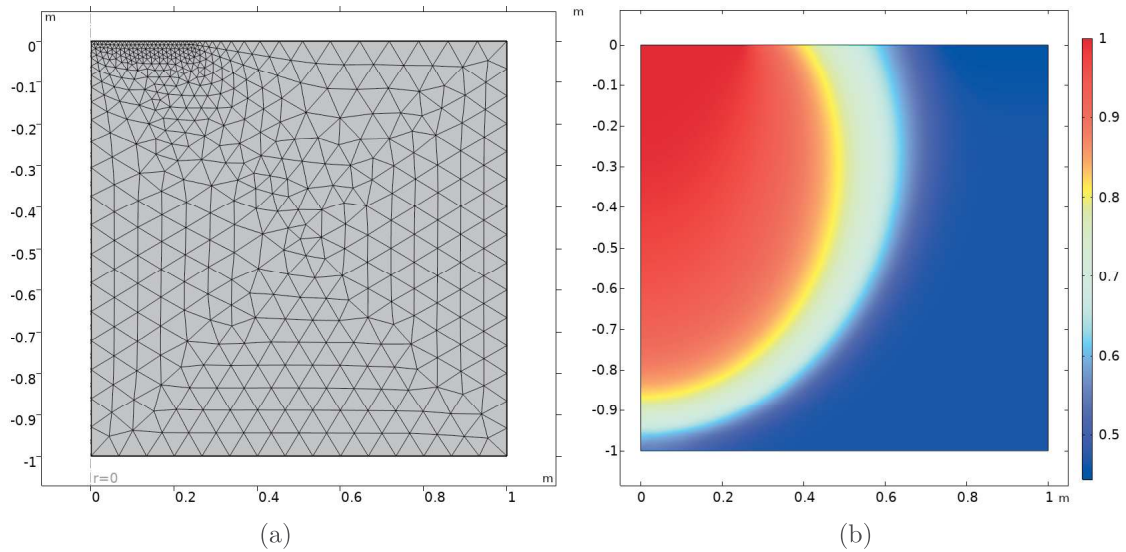


Figure 12: Exemples de modèles 2D axisymétriques avec éléments triangulaires dans COMSOL Multiphysics. (a) Maillage triangulaire avec raffinement au niveau de l'anneau d'infiltration. (b) Degrés de saturation obtenus au bout de 48h d'infiltration

le modèle analytique et le modèle numérique soient les plus proches possibles. Après optimisation, le modèle QEI représente une référence affranchie des oscillations numériques qui seront illustrées dans la partie résultat de ce rapport.

Pour identifier un modèle 2D axisymétrique le plus précis possible, le raffinement du maillage a été fait au niveau de la surface d'infiltration. Comme cela a déjà été dit, COMSOL propose des paramètres de maillages prédéfinis en fonction de la précision voulue. Néanmoins, nous voulions aller plus loin que le niveau le plus fin proposé par COMSOL. Ainsi, des modèles de régressions non-linéaires ont été produits pour chaque paramètre, à savoir taille maximale et minimale des éléments, facteur d'agrandissement, facteur de courbure et enfin résolution de régions étroites. Ce dernier paramètre permet de contrôler le nombre de couches d'éléments créées dans les régions étroites. Les régressions ont permis d'extrapoler les valeurs pour chaque paramètre tout en gardant une cohérence avec les niveaux de maillages prédéfinis moins fins. Des essais préliminaires ont montré que l'utilisation de ces valeurs de paramètres extrapolés favorisait la convergence des modèles plutôt que de modifier les valeurs de façon arbitraire et indépendante pour chaque paramètre. Les graphiques des différentes valeurs de paramètres extrapolées sont données en ANNEXES. Les niveaux de finesse de maillage prédéfinis par COMSOL sont numérotés de 1 à 9, où 1 représente le maillage le plus grossier et 9 le plus fin. À partir des modèles obtenus, les valeurs des paramètres sont données jusqu'au niveau extrapolé de précision 20 (Tableau 5).

De fait, les finesses de maillage ont été testées jusqu'au niveau extrapolé 20 afin d'obtenir le résultat le plus précis possible. Tous les modèles n'ont pas convergé et c'est à partir du meilleur modèle convergent que les paramètres  $\beta$  et  $\gamma$  du modèle analytique ont été optimisés. En effet, ce modèle QEI 3D optimisé à partir d'un modèle 2D axisymétrique très fin servira ensuite de référence pour la validation des modèles COMSOL 3D homogènes. Un code R a été créé pour l'optimisation du modèle analytique. Le principe de balayage des valeurs de  $\beta$  et  $\gamma$  a été choisi. Toutes les valeurs de  $\beta$  et  $\gamma$  entre 0.1 et 2 avec un pas de 0.01 ont été testées. C'est le critère de minimisation du RMSE (*Root Mean Square Error*) qui a été retenu pour l'optimisation du couple  $\beta$  et  $\gamma$ .

Table 5: Valeurs des paramètres du maillage en fonction du niveau de précision voulu

Niveau maillage	Niveau de finesse	Taille max de l'élément	Taille min de l'élément	Facteur d'agrandissement	Facteur de courbure	Résolution de régions étroites
Extremely coarse	1	0.33	0.05	2	1	0.9
Extra coarse	2	0.2	0.016	1.8	0.8	1
Coarser	3	0.13	0.006	1.5	0.6	1
Coarse	4	0.1	0.002	1.4	0.4	1
Normal	5	0.067	3.0E-04	1.3	0.3	1
Fine	6	0.053	3.0E-04	1.3	0.3	1
Finer	7	0.037	1.25E-04	1.25	0.25	1
Extra fine	8	0.02	7.50E-05	1.2	0.25	1
Extremely fine	9	0.01	2.0E-05	1.1	0.2	1
	10	8.26E-03	2.26E-06	1.09	0.11	1
	12	3.67E-03	2.45E-07	1.05	6.77E-02	1
	14	1.63E-03	2.65E-08	1.03	4.16E-2	1
	16	7.21E-04	2.87E-09	1.02	2.56E-2	1
	18	3.20E-04	3.11E-10	1.01	1.57E-2	1
	20	1.420E-04	3.36E-11	1.006	9.65E-3	1

### 3.2.5 Modélisation 3D de l'infiltration avec COMSOL Multiphysics

Dans cette partie, nous présentons les méthodes relatives à la modélisation numérique de l'écoulement et au domaine numérique complexe. Ce domaine comprend à la fois les éléments nécessaires à la modélisation des écoulements préférentiels (inclusion d'une zone de perméabilité accrue) mais aussi des éléments nécessaires à la modélisation de la TRE. Ainsi, le domaine numérique est déjà adapté à la modélisation de la TRE détaillée plus bas.

#### Modèles 3D : exemple de sol homogène

Les modèles 3D d'un sol homogène, c'est-à-dire sans zone d'écoulements préférentiels, ont été validés par comparaison avec le modèle analytique précédemment optimisé à l'aide du modèle en 2D axisymétrique. Cela permet la comparaison avec les résultats du modèle 2D axisymétrique. Par la suite, ces modèles seront complétés par une zone d'écoulements préférentiels et seront utilisés pour les simulations d'acquisition TRE. C'est la raison pour laquelle la géométrie des modèles homogènes contient également les points correspondant à la position des électrodes. Les maillages sont générés de sorte à avoir un maillage fin au niveau de la frontière correspondant à l'anneau d'infiltration et au niveau des électrodes. Pour le processus d'infiltration, un maillage fin au niveau des électrodes n'était pas indispensable ; c'est le cas en revanche pour la simulation de l'acquisition TRE des injections de courant. En effet, de forts gradients de potentiels électriques vont apparaître au niveau des éléments du maillage proches des électrodes, d'où le choix d'un maillage fin le long de la ligne d'électrodes.

Les modèles 3D sont constitués d'une géométrie de type bloc ; la base de ce bloc est un carré dont la mesure du côté permet de contenir toute la ligne d'électrodes. La taille du carré dépend donc du nombre d'électrodes ainsi que de l'espacement choisi entre chaque électrode. La profondeur a d'abord été fixée à 1 m, comme pour les modèles 1D et 2D axisymétriques, puis a évolué en fonction du nombre et de l'espacement des électrodes pour finalement être fixée à 0.75 m. En effet, le but des simulations d'infiltration est ensuite de créer des données de résistivités vraies à partir des teneurs en eau simulées. Or, l'inversion des données TRE est contrainte par la robustesse des résultats obtenus après le processus d'inversion. La profondeur des résultats considérés comme robustes est donnée dans le tableau 7 à partir des inversions réalisées.

Ainsi, il n'est pas nécessaire de simuler des infiltrations plus profondes que la limite de robustesse des inversions TRE puisque, au-delà de cette limite, les données de résistivités inversées ne sont de toute façon pas considérées comme fiables. Cette profondeur dépend de l'espacement et du nombre d'électrodes. L'espacement inter-électrode maximal qui sera testé est de 10 cm pour 64 électrodes. D'après le tableau 7, cela donne une profondeur de 0.67 m. Ainsi, la profondeur retenue de 0.75 m permet d'englober tous les scénarios d'espacement entre électrodes qui seront testés par la suite.

À l'intérieur du bloc principal a été créé un cylindre mesurant 1 m de rayon et de même hauteur que le bloc (Figure 13a). Ce cylindre est centré au niveau de l'anneau d'infiltration. En effet, des simulations grossières ont permis de montrer que l'infiltration à travers l'anneau de 25 cm de rayon et à travers un sol de type limon ne dépassait pas, latéralement, ce cylindre de 1 m de rayon au bout de 48h (Figure 12b). Ce cylindre permet de créer une zone où le maillage peut être raffiné tout en gardant un maillage plus grossier pour le reste du bloc principal (Figure 13b). En effet, COMSOL génère des maillages pour chaque domaine géométrique du modèle selon les choix de l'utilisateur. La création de ce cylindre est particulièrement utile pour les modèles de grande taille, à savoir pour un grand nombre d'électrodes ou un grand espacement inter-électrodes. Cela permet ainsi d'économiser un nombre conséquent d'éléments dans le modèle et de gagner en temps de calcul lors des simulations.

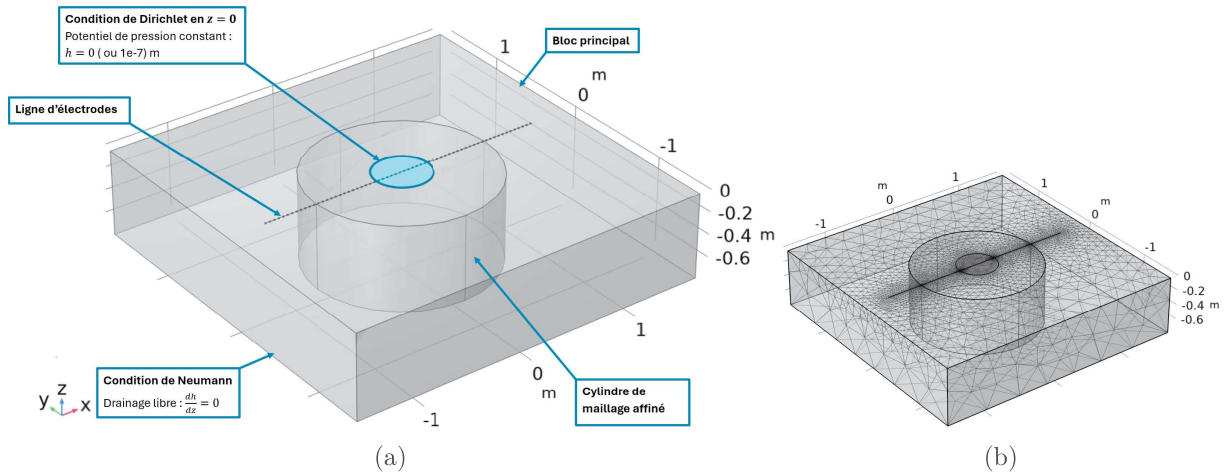


Figure 13: Exemple de modèle (a) et de maillage (b) 3D homogène pour 64 électrodes espacées de 4 cm, profondeur 0.75 m.

Plusieurs niveaux de finesse du maillage ont été testés pour la surface d'infiltration de l'anneau dans le but d'évaluer l'influence du maillage sur la précision de la donnée modélisée et son écart par rapport au modèle analytique. Cela permet ainsi de valider ou non le modèle pour son utilisation à venir en présence d'une zone d'écoulements préférentiels et pour la simulation d'acquisition TRE.

### Modèles 3D en présence d'une zone d'écoulements préférentiels

La zone d'écoulements préférentiels a été modélisée par une géométrie cylindrique de même hauteur que le bloc principal et d'un rayon minimal de 1 cm. Cette zone peut correspondre, par exemple, à une partie d'un réseau racinaire et de sa zone d'influence. Le centre de la zone d'écoulements préférentiels est décalé et positionné au 2/3 de la taille du rayon de l'anneau d'infiltration afin de créer une asymétrie dans le bulbe d'infiltration. Cette zone d'écoulements rapides fait l'objet d'un maillage fin qui lui est propre pour tenir compte de sa petite taille relativement à la géométrie du modèle global.

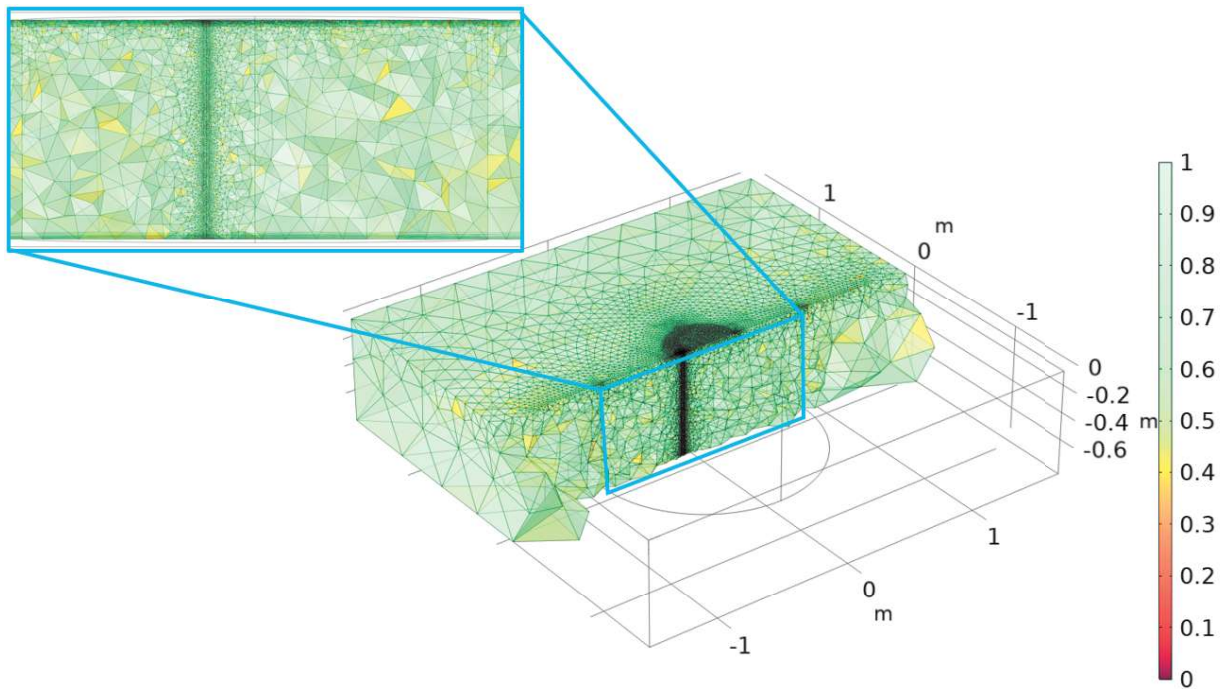


Figure 14: Exemples de maillage 3D avec écoulements préférentiels et qualité des éléments (skewness).

Dans le modèle COMSOL, les paramètres hydrodynamiques de la zone d'écoulements préférentiels sont définis par rapport à ceux de la zone matricielle occupant le reste du domaine numérique. Les paramètres de la zone d'écoulements préférentiels sont notés avec un indice  $f$  pour «fracture» (par exemple la conductivité hydraulique et le coefficient  $\alpha$  sont notés respectivement  $K_{s,f}$  et  $\alpha_f$ ). La conductivité hydraulique  $K_{s,f}$  est définie à partir de celle de la matrice, de type limon, en la multipliant par un coefficient  $x^2$ . Initialement, le paramètre  $\alpha_f$  devait aussi être multiplié mais par le coefficient  $x$  afin de suivre l'équation de Young-Laplace, relation entre  $\alpha$  et le rayon des pores tel que proposé par Lassabatere, Yilmaz, et al., 2014. Mais des problèmes de convergence avec ces valeurs de paramètres ont empêché d'utiliser cette méthode. À la place, le choix a été fait de ne modifier que la valeur de la conductivité hydraulique à saturation, en prenant une valeur 100 fois plus grande que celle de la matrice du sol. Cette valeur est utilisée pour simuler le comportement d'un écoulement rapide.

### 3.3 Couplage infiltration / acquisition TRE

#### 3.3.1 Résistivités vraies

Dans le cadre de ce travail de fin d'études, les résistivités vraies ont été générées numériquement. Le principe général est resté le même pour toutes les acquisitions TRE : une infiltration d'eau est d'abord simulée avec COMSOL. Puis, aux différents temps voulus, il est possible d'exporter avec COMSOL les résistivités correspondant aux teneurs en eau de chaque élément du modèle. En effet, COMSOL génère les données de teneur en eau via une variable qu'il est ensuite possible de transformer en résistivité vraie grâce à la loi d'Archie. Cela permet d'obtenir des données de résistivité 3D de chaque modèle et pour les instants voulus. Néanmoins, avant d'être utilisée, la loi d'Archie doit être calibrée. Il s'agit de déterminer les différents coefficients de la loi, à savoir  $a_A$ ,  $m_A$  et  $n_A$ . Pour les coefficients  $m_A$  et  $n_A$ , il a été décidé de prendre pour valeurs celles déterminées par Brunet, Clément, and Bouvier (2010) dans leur étude (Figure 15) car le sol pour lequel ils ont calibré la loi d'Archie est relativement proche d'un limon, sol qui, rappelons-le, a été utilisé pour toutes les simulations numériques de ce TFE. Dans cet article, les auteurs ont calibré la loi d'Archie à l'aide de deux échantillons d'un même sol mais avec une résistivité d'eau d'infiltration  $\rho_w$  différente. C'est pourquoi c'est la relation entre  $\rho/\rho_w$  et le degré de saturation en eau qui est représentée sur la figure.

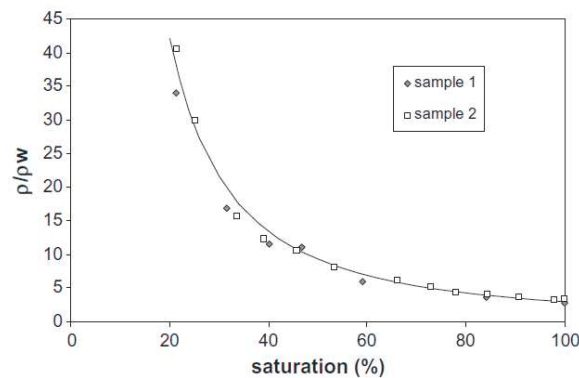


Figure 15: Relation entre résistivité électrique et saturation en eau. La loi d'Archie calibrée donne la relation :  $\rho/\rho_w = 0.42^{-1.25} * S^{-1.65}$

Ainsi, les valeurs  $m_A = 1.25$  et  $n_A = 1.65$  ont été retenues. Dans l'article cité précédemment, le paramètre  $a_A$  a été choisi égal à 1. Or, ici, il convient d'ajuster la valeur de  $a_A$ . En effet, d'après Knödel, Voigt, and Lange, 2007, la résistivité électrique d'un limon va de  $30 \Omega.m$  à  $100 \Omega.m$ . Il n'est pas possible de faire correspondre une saturation nulle à une valeur de résistivité, celle-ci tendant vers une valeur infinie. Les degrés de saturation choisis pour correspondre à  $100 \Omega.m$  et  $30 \Omega.m$  sont respectivement 20% et 80%. Il suffit ensuite d'optimiser la valeur de  $a_A$  en minimisant l'erreur avec les points correspondants à une résistivité de  $100 \Omega.m$  pour une saturation basse de 20% et une résistivité de  $30 \Omega.m$  pour une saturation haute de 80%. L'optimisation a été effectuée par la fonction `scipy.optimize.curve_fit` de la bibliothèque Python, SciPy. Cette fonction ajuste les paramètres d'une fonction en minimisant la somme des carrés des résidus entre les valeurs d'observation et les valeurs du modèle à ajuster. Après optimisation par cette méthode (Figure 16), la valeur retenue est  $a_A = 1.25e - 3$ . Enfin, la conductivité électrique (inverse de la résistivité) de l'eau d'infiltration  $\rho_w$  a été choisie égale à  $0.5 mS/m$ . Cette valeur se situe dans la plage des valeurs de résistivité de l'eau de pluie. La porosité est celle définie par Hydrus pour un limon, à savoir  $\Phi = 0.43$ .

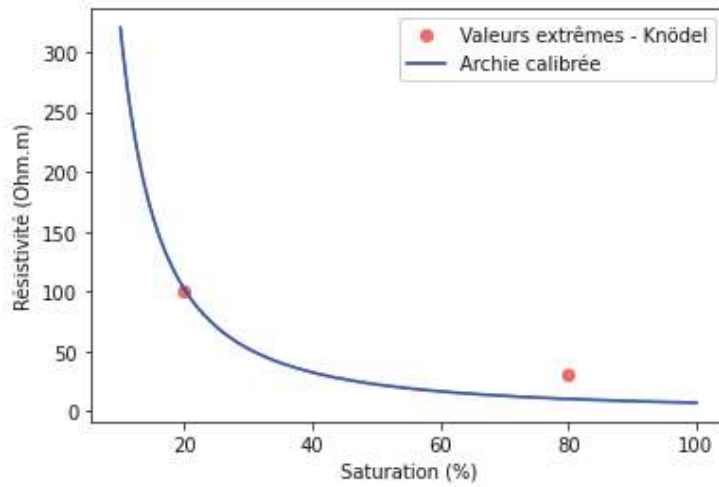


Figure 16: Calibration de la loi d'Archie

Finalement, la loi d'Archie obtenue est alors donnée par l'équation suivante :

$$\rho = \rho_w a_A 0.43^{-1.25} S_e^{-1.65} \quad (37)$$

Une fois cette loi d'Archie calibrée, il a été possible de l'appliquer aux teneurs en eau obtenues au cours des simulations d'infiltration et d'extraire des données de résistivités vraies utilisables pour les simulations d'acquisitions TRE. Nous obtenons ainsi un modèle de résistivité électrique du sol qui varie au cours du temps avec l'infiltration de l'eau sous l'anneau.

### 3.3.2 Résistivités apparentes

Après avoir extrait les données de résistivités numériques vraies d'un modèle, l'étape suivante consiste à simuler une acquisition TRE sur un domaine ayant cette distribution de résistivités vraies. Il faut modéliser en premier lieu l'acquisition TRE. Le principe est de créer, dans COMSOL, un domaine plus grand qui englobe le domaine numérique utilisé pour simuler l'infiltration. Ce nouveau domaine permettra de simuler les acquisitions TRE en limitant les effets de bords susceptibles de fausser les résultats en déformant les lignes de courant électrique. Le code Matlab F3DM permet de générer ce domaine et de simuler cette acquisition TRE. F3DM a besoin des coordonnées des électrodes ainsi que de la séquence d'acquisition TRE des données de résistivités. Une ligne de la séquence correspond aux quatre numéros des électrodes qui composent le quadripôle d'acquisition ; les deux premiers numéros correspondent aux électrodes A et B d'injection du courant et les deux autres aux électrodes M et N de mesure du potentiel (Voir en ANNEXES pour la séquence à 64 électrodes). Pour créer la géométrie en pavé droit sur laquelle sera appliquée les mesures TRE, il faut préciser les dimensions de ce pavé. Il est possible de choisir de créer des frontières infinies dans COMSOL mais le choix a plutôt été fait de construire un domaine très grand par rapport au modèle COMSOL d'infiltration. Le tableau 6 donne les dimensions choisies pour le modèle d'acquisition TRE en fonction du nombre d'électrodes et de leur espacement. Les dimensions du modèle 3D de l'infiltration correspondantes sont également données.

Table 6: Dimensions des géométries pour 64 électrodes en fonction de l'espacement inter-électrodes

Espace entre électrodes	2 cm	4 cm	10 cm
Côté base carrée (Modèle infiltration 3D)	1.88 m	3.2 m	7.16
Hauteur (Modèle infiltration 3D)	0.75	0.75 m	0.75
Côté base carrée (Modèle F3DM)	10 m	20 m	50 m
Hauteur (Modèle F3DM)	6 m	12 m	30 m

À ces informations demandées par F3DM s'ajoute un niveau de maillage entre 1 et 9 correspondant aux niveaux de finesse prédéfinis par COMSOL. Le niveau de maillage est appliqué au bloc global et un niveau de finesse plus fin est automatiquement appliqué sur la ligne d'électrodes. Comme il a déjà été dit, il est important de raffiner le maillage autour des électrodes à cause des forts gradients de potentiels générés lors de la simulation des injections de courant. Enfin, il est demandé à l'utilisateur de préciser le courant appliqué pour les injections en ampères ainsi qu'une valeur de résistivité. À partir de ces informations, le code F3DM génère avec COMSOL une géométrie et un maillage auquel est appliquée la résistivité précédemment évoquée et entrée par l'utilisateur. Dans notre étude, la résistivité est déduite de la loi d'Archie par la teneur en eau initiale, elle-même déterminée par la condition initiale en potentiel de pression. Lorsque cette géométrie est créée, la résistivité est donc homogène sur tout le domaine (Figure 17). Le courant d'injection  $a$ , quant à lui, été choisi égal à 1 ampère pour toutes les simulations.

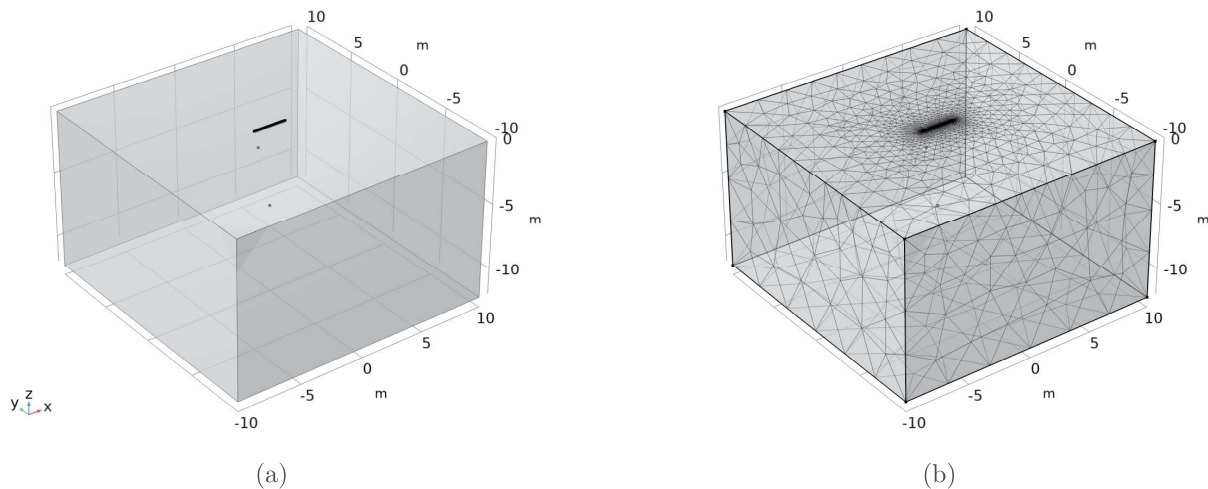


Figure 17: Géométrie et maillage 3D générés par F3DM.

Une fois le domaine COMSOL généré par F3DM, l'étape suivante consiste à créer un bloc plus petit correspondant aux dimensions du modèle 3D utilisé précédemment pour la modélisation de l'infiltration dans COMSOL (Figure 18). Les maillages correspondants à la zone d'infiltration dans le modèle F3DM et celui du modèle pour l'infiltration ne sont pas exactement les mêmes. Le maillage du modèle F3DM est plus grossier malgré des éléments relativement fins pour les électrodes. Ainsi, les valeurs des résistivités obtenues avec le modèle de l'infiltration seront interpolées pour être prises en compte dans le modèle F3DM pour le calcul des potentiels mesurés lors des simulations d'acquisition TRE.

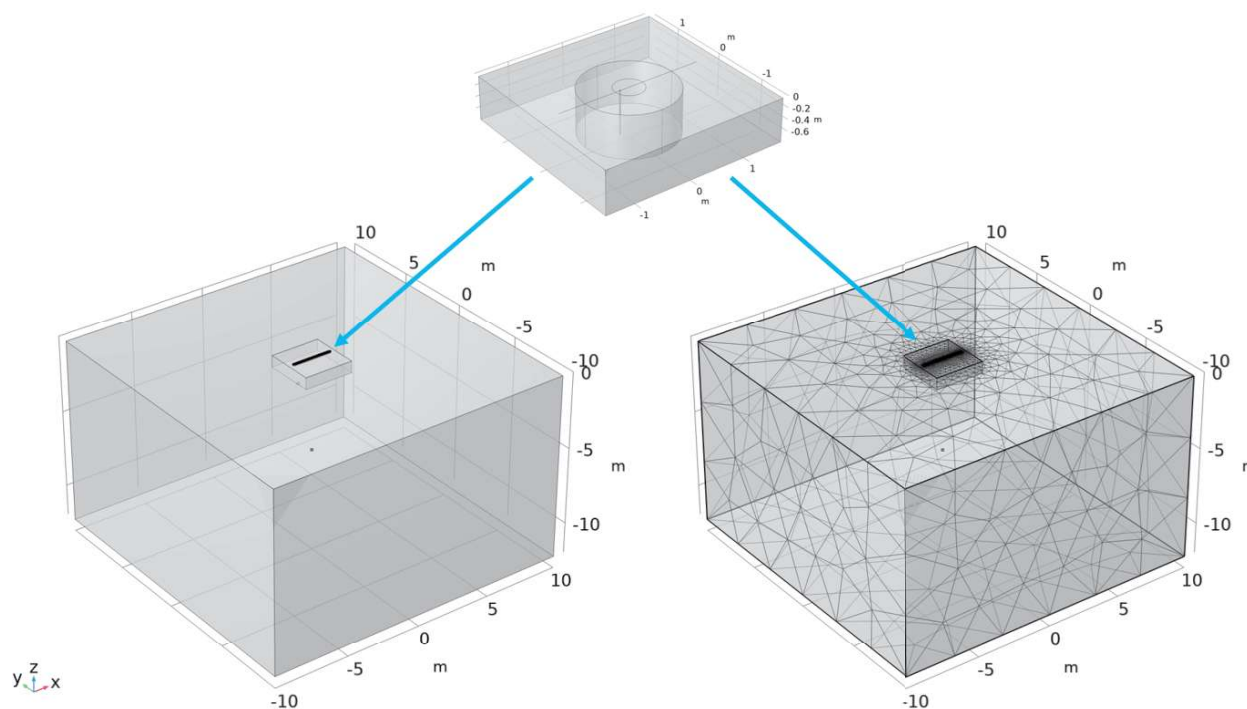


Figure 18: Modèle F3DM avec ajout du domaine du modèle utilisé pour l'infiltration.

Dans un deuxième temps, toujours à l'aide du code F3DM, il faut simuler les mesures TRE sur le modèle précédent en prenant en compte les résistivités vraies obtenues à la suite des modélisations d'infiltration. Pour chaque simulation d'acquisition TRE, F3DM demande, en plus des coordonnées des électrodes et de la séquence d'acquisition, le nouveau modèle F3DM modifié avec le bloc intérieur (Figure 18) ainsi que la liste des fichiers de données des résistivités extraites de COMSOL. Chaque fichier correspond aux résistivités vraies à un instant donné. F3DM simule alors l'acquisition pour chaque fichier de données de résistivité et génère des fichiers de résultats des mesures de potentiels. C'est le format BERT (*Boundless Electrical Resistivity Tomography*) qui a été choisi. Les résultats sont donnés pour chaque combinaison de quadripôle de la séquence TRE. En effet, chaque ligne de résultats se compose de sept valeurs : les quatre numéros des électrodes A et B (injection de courant) et M et N (mesure de potentiels) du quadripôle, le potentiel mesuré en M, celui mesuré en N, la différence entre ces deux potentiels et enfin le courant, en ampère, appliqué pour l'injection (Voir en ANNEXES pour un exemple de données de mesures TRE au format BERT). Pour le traitement des données de mesures TRE, le choix s'est porté sur le logiciel ResIPy. Il s'agit d'un logiciel open source spécialement conçu pour le traitement, l'inversion et la modélisation de données géophysiques telle que la TRE. Ainsi, à partir d'un fichier de résultat de F3DM au format BERT, ResIPy génère une pseudo-section des valeurs de résistivités apparentes. En réalité, ResIPy n'a besoin que de la différence de potentiel et du courant associé à chaque quadripôle pour générer cette pseudo-section.

La figure 20c est un exemple de pseudo-section de résistivités apparentes obtenue pour un dispositif TRE à 64 électrodes espacées de 2 cm, après une minute d'infiltration à travers un anneau de 25 cm de rayon et en présence d'une zone d'écoulements préférentiels de 1 cm de rayon et de conductivité hydraulique égale à cent fois celle de la matrice. Les figures 20a et 20b permettent de comparer le profil de teneurs en eau et le profil de résistivités vraies à partir duquel ces pseudo-sections ont été obtenues.

### 3.3.3 Résistivités interprétées : inversion avec ResIPy

Une fois les données de résistivités apparentes importées dans ResIPy, il est nécessaire de passer par le processus d'inversion afin d'obtenir un résultat de résistivités interprétées qui doivent refléter au mieux les résistivités vraies. Pour procéder à l'inversion, un maillage doit d'abord être généré. ResIPy propose plusieurs paramètres afin de générer le maillage 2D utilisé ensuite pour l'inversion. Peuvent être choisis le nombre d'éléments entre deux électrodes consécutives, la finesse globale du maillage ainsi que le coefficient d'agrandissement. Le nombre d'éléments entre les électrodes a semblé limité à 1 à partir d'un certain espacement inter-électrodes. Dans ces cas-là, tous les paramètres ont été choisis au niveau de finesse maximal. Le maillage obtenu dans ces cas-là est donné en figure 19.

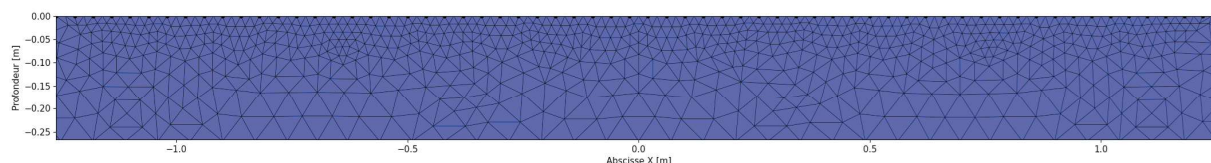


Figure 19: Exemple de maillage généré par ResIPy pour l'inversion de données TRE.

Pour l'inversion, il est possible de choisir de procéder à une inversion simple ou en suivi temporel (*time-lapse*). Les inversions de type suivi temporel ont été privilégiées car elles sont mieux adaptées au suivi de phénomènes transitoires comme l'infiltration. Le pas de temps d'acquisition pour les inversions *time-lapse* doit être choisi en fonction de la vitesse du phénomène étudié. Afin d'optimiser ce pas de temps, les résultats d'inversion avec les pas de temps de 10 minutes et de 1 minute ont été comparés. La profondeur de la section 2D des résistivités inversées dépend du nombre d'électrodes et de l'espacement entre elles. L'inversion prend en compte toutes les mesures TRE mais ResIPy n'affiche, par défaut, qu'un zoom sur la partie où l'inversion est la plus robuste. Le tableau 7 récapitule les profondeurs affichées par ResIPy après inversion en fonction de l'espacement inter-électrodes pour 64 électrodes.

Table 7: Profondeur d'inversion robuste pour 64 électrodes en fonction de l'espace inter-électrode

<b>Espaces inter-électrode</b>	2 cm	4 cm	10 cm
<b>Profondeur ResIPy</b>	0.133 m	0.267 m	0.667 m

L'espace inter-électrodes maximal testé est 10cm. Pour 64 électrodes, la profondeur maximale affichée est de 0.667 m, et, comme nous l'avons déjà dit, la profondeur des modèles d'infiltration a été fixé à 0.75 m de façon à englober tous les cas possibles. Un ajustement aurait pu être mené afin de réduire cette profondeur pour les espacements inférieurs à 10 cm pour optimiser le rapport entre nombre d'éléments et temps de calcul pour les modèles d'infiltration mais cela n'a pas été fait par manque de temps. Enfin, la figure 20 résume les différentes étapes de la démarche, depuis les teneurs en eau jusqu'aux résistivités interprétées obtenues après inversion.

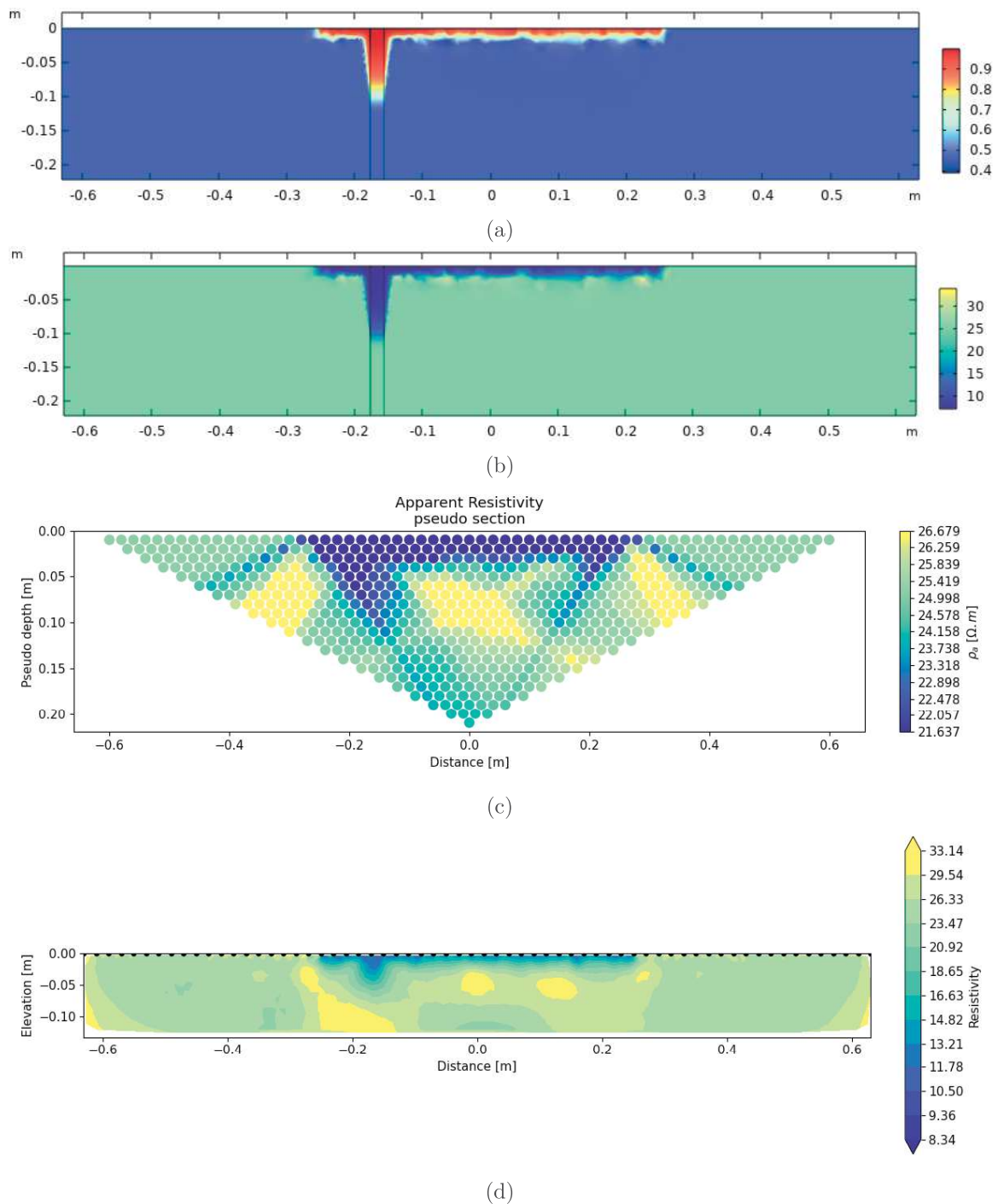


Figure 20: Étapes des traitements des données d'infiltration et de TRE pour . Exemple de profil de teneur en eau (COMSOL) et de pseudo-section des résistivités apparentes obtenues (ResIPy) à partir de données au format BERT. (a) Profil de teneurs en eau utilisées pour extraire les résistivités vraies. (b) Résistivités vraies associés aux teneurs en eau par la loi d'Archie. (c) Points de mesure de résistivités apparentes. (d) Résistivités interprétés obtenues après inversion (time-lapse dans ce cas).

## 4 Résultats

### 4.1 Modélisation COMSOL de l'infiltration 1D et validation

#### 4.1.1 Sensibilité de la condition de Neumann (drainage libre) au maillage

Les résultats suivants montrent, dans une première approche, l'évolution du profil de pression au niveau de la frontière à  $z = -1$  m pour les instants entre 990 minutes et 1040 minutes en fonction du nombre d'éléments, c'est-à-dire en fonction de la précision du maillage (Figure 21). Pour rappel, la condition limite au niveau de cette frontière est une condition de drainage libre se caractérisant par  $\frac{dh}{dz} = 0$ .

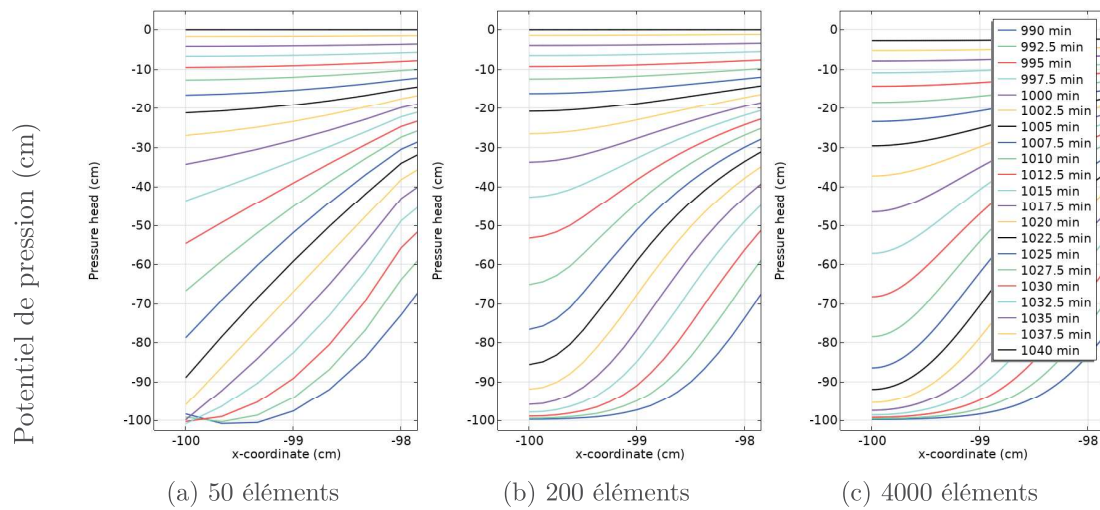


Figure 21: Profil de potentiels de pression en  $z = -1$  m

Il apparaît que, pour un maillage grossier de 50 éléments, la condition n'est pas respectée. Comme attendu, avec un maillage plus fin, cela semble ne plus être le cas. Afin de mieux quantifier ce phénomène, les taux d'accroissement en  $z = -1$  m du potentiel de pression ont été tracés pour des maillages allant de 50 à 8000 éléments (Figure 22).

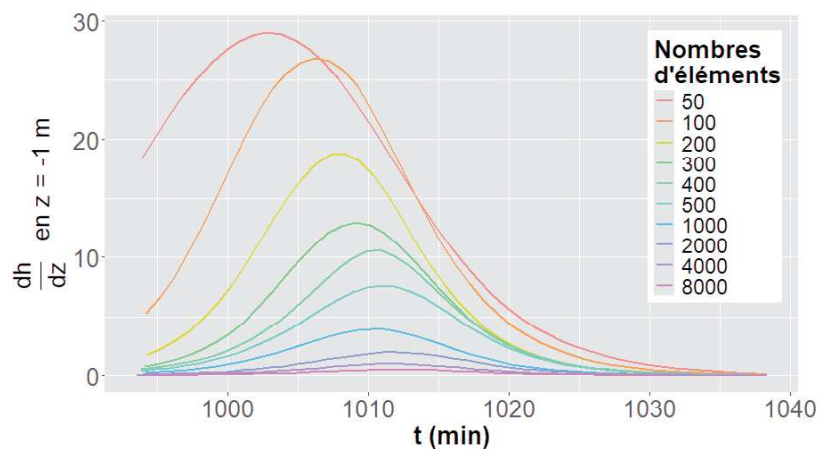


Figure 22: Taux d'accroissement à  $z = -1$  m en fonction du maillage

Il apparaît que l'augmentation du nombre d'éléments dans le maillage se traduit par des profils plus lisses avec moins d'aberrations numériques. Par exemple à 50 éléments, les derniers profils recoupent les profils précédents. Cette aberration disparaît à partir de 200 éléments. Néanmoins, on note que la condition limite inférieure est moyennement respectée. La condition de drainage libre  $\frac{dh}{dz} = 0$  doit se traduire par une pente verticale (et donc horizontale dans la figure 21). Ce n'est le cas que pour le nombre d'éléments le plus élevé. Pour étudier le respect de cette condition, le taux d'accroissement a été tracé en fonction du temps en condition limite inférieure. Ce taux devient quasi nul pour un nombre d'éléments supérieur à 4000. En revanche, pour un nombre d'éléments inférieur à 500, ce taux devient significatif, indiquant que la condition limite n'est pas respectée.

#### 4.1.2 Sensibilité à la condition limite de surface ( $z=0$ )

Pour rappel, l'étude de sensibilité à la valeur de la condition limite de surface a été menée à cause des problèmes de convergence rencontrés lorsque la valeur de cette condition limite était fixée à 0 (potentiel de pression constant en surface) et parce que, sur le terrain, lors d'un essai Beerkan, la pression peut varier entre des valeurs positives (versement de l'eau dans l'anneau) à des valeurs négatives (désaturation du sol en surface avant le versement suivant).

La figure 23 montre les valeurs de l'infiltration cumulée obtenues au bout de 30, 60, 120 et 300 minutes en fonction de la valeur de la condition limite fixée. Les valeurs de la condition limite varient entre  $-9\text{cm}$  et  $9\text{cm}$  avec des valeurs plus nombreuses autour de 0. Quant à la figure 24, elle représente les courbes d'infiltrations cumulées jusqu'à 300 minutes pour certaines valeurs de condition de surface.

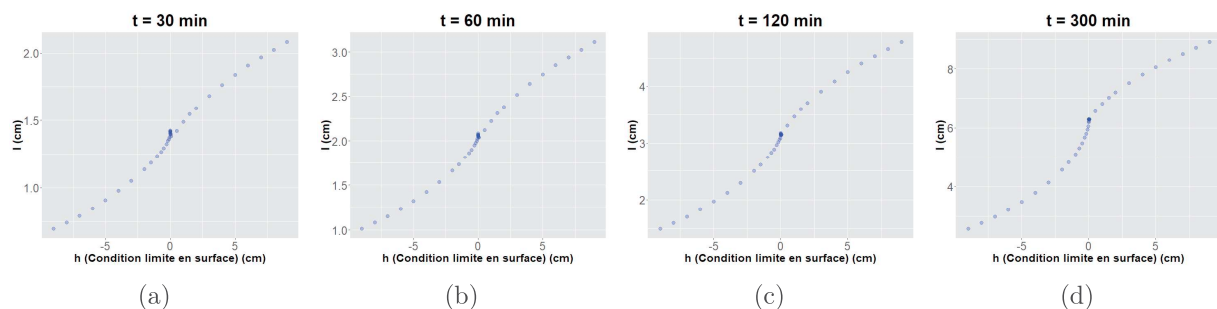


Figure 23: Sensibilité de l'infiltration cumulée à la condition limite de surface,  $h$  constante à plusieurs instants de l'infiltration

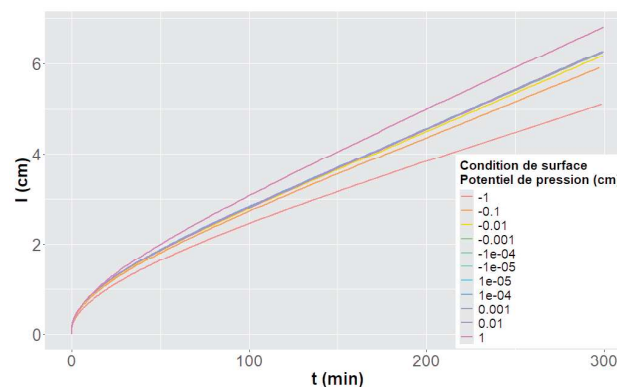


Figure 24: Courbes d'infiltrations cumulées en fonction de la condition de pression en surface.

Deux tendances d'évolution se dessinent entre les valeurs de potentiels de pression négatifs et positifs, avec une plus forte croissance de l'infiltration cumulée pour les valeurs négatives se rapprochant de zéro, que pour les valeurs positives. Autrement dit, il apparaît que l'infiltration cumulée est plus sensible à l'évolution des valeurs de pression négatives qu'à celle des valeurs positives. Compte tenu de l'objectif d'utiliser une valeur non nulle mais la plus proche de zéro, la meilleure stratégie aurait été de choisir une valeur positive non nulle, puisque se trouvant dans la zone de moindre sensibilité. Or, les valeurs positives de potentiel de pression constant proches de zéro ont également menés à des modèles non convergents. Ainsi, le choix s'est finalement porté vers une valeur de potentiel de pression négative mais le plus proche possible de zéro pour contrer l'effet de sensibilité. La valeur du potentiel de pression en surface finalement retenue a été  $-1e-7$  m. Cette valeur très proche de zéro a permis d'obtenir des modèles convergents et c'est celle qui a été utilisée dans toute la suite de cette étude. Une fois les problèmes de convergence à cause de la condition limite de surface écartés, l'étude des modèles 1D a été focalisée sur l'influence du maillage, complété par la sensibilité à la condition initiale de potentiel de pression choisie.

#### 4.1.3 Sensibilité de l'infiltration aux conditions initiales en fonction du maillage

L'étude de la sensibilité de l'infiltration 1D à la finesse du maillage a été faite en deux parties. Dans un premier temps, les résultats COMSOL et Hydrus ont été représentés sur des graphiques distincts (Figure 25) combinés en plusieurs scénarios de conditions initiales. Dans cette partie, le maillage a été fixé à 200, 500 et 1000 éléments. Pour chacun de ces nombres d'éléments, plusieurs scénarios de conditions initiales sont représentés. Il apparaît, pour le plus petit nombre d'éléments (200), un fort décalage de l'infiltration cumulée dû à un fort taux d'infiltration quasi-constant en début de simulation (Figures 25a et 25b). Dans tous les modèles COMSOL apparaissent des oscillations numériques du taux d'infiltration après leur phase quasi-constante (Figures 25b, 25f et 25j). Néanmoins, la tendance montre que plus le maillage est fin plus cet effet est atténué, notamment sur l'infiltration cumulée. D'un autre côté, les modèles Hydrus sont moins sensibles au nombre d'éléments de façon générale (Figures 25c, 25g et 25k). De plus, il est important de remarquer que les valeurs des taux d'infiltration sont sensiblement plus petites que celles des modèles COMSOL. Une raison possible est qu'Hydrus intègre plus de dispersion numérique pour lisser les discontinuités.

La sensibilité du modèle 1D à la condition initiale a été effectuée pour quatre valeurs de potentiel de pression initiale, à savoir: -2 m, -1 m, -0.5 m et -0.1 m. Ces potentiels correspondent à des degrés de saturation du limon, respectivement de 32.6%, 46.6%, 63.8% et 93.6%. Dans les trois types de maillage COMSOL, le taux d'infiltration présente des irrégularités qui semblent d'autant plus marquées que la condition initiale s'éloigne de 0 (Figures 25b, 25f et 25j). En effet, il est important de rappeler que toutes les simulations modélisent des essais de type Beerkan avec une condition limite de pression nulle. Ainsi, plus la condition initiale s'éloigne de 0, plus cela crée une forte discontinuité au niveau de la surface d'infiltration. Le rapprochement de la condition initiale vers 0 se traduit par un taux d'infiltration initial plus petit et des irrégularités qui ont lieu plus tôt. Néanmoins, ces irrégularités du taux d'infiltration ne s'observent pas pour les modèles Hydrus (Figures 25d, 25h et 25l). De plus, le taux d'infiltration initial est sensiblement plus grand avec COMSOL qu'avec Hydrus et ce quelque soit la condition initiale. Ainsi, les infiltrations cumulées sont également surévaluées pour les modèles COMSOL et cela entraîne même des décalages conséquents entre ces modèles en fonction de la condition initiale (Figures 25a et 25c). Hydrus ne permet pas, en 1D, d'avoir plus de 1000 éléments pour le maillage, c'est pourquoi il s'agit également du nombre maximal d'éléments testé pour les modèles COMSOL, dans cette première partie. Enfin, l'infiltration cumulée est moins sensible à la condition initiale pour les modèles Hydrus que pour ceux créés avec COMSOL (Figures 25c, 25g, 25k).

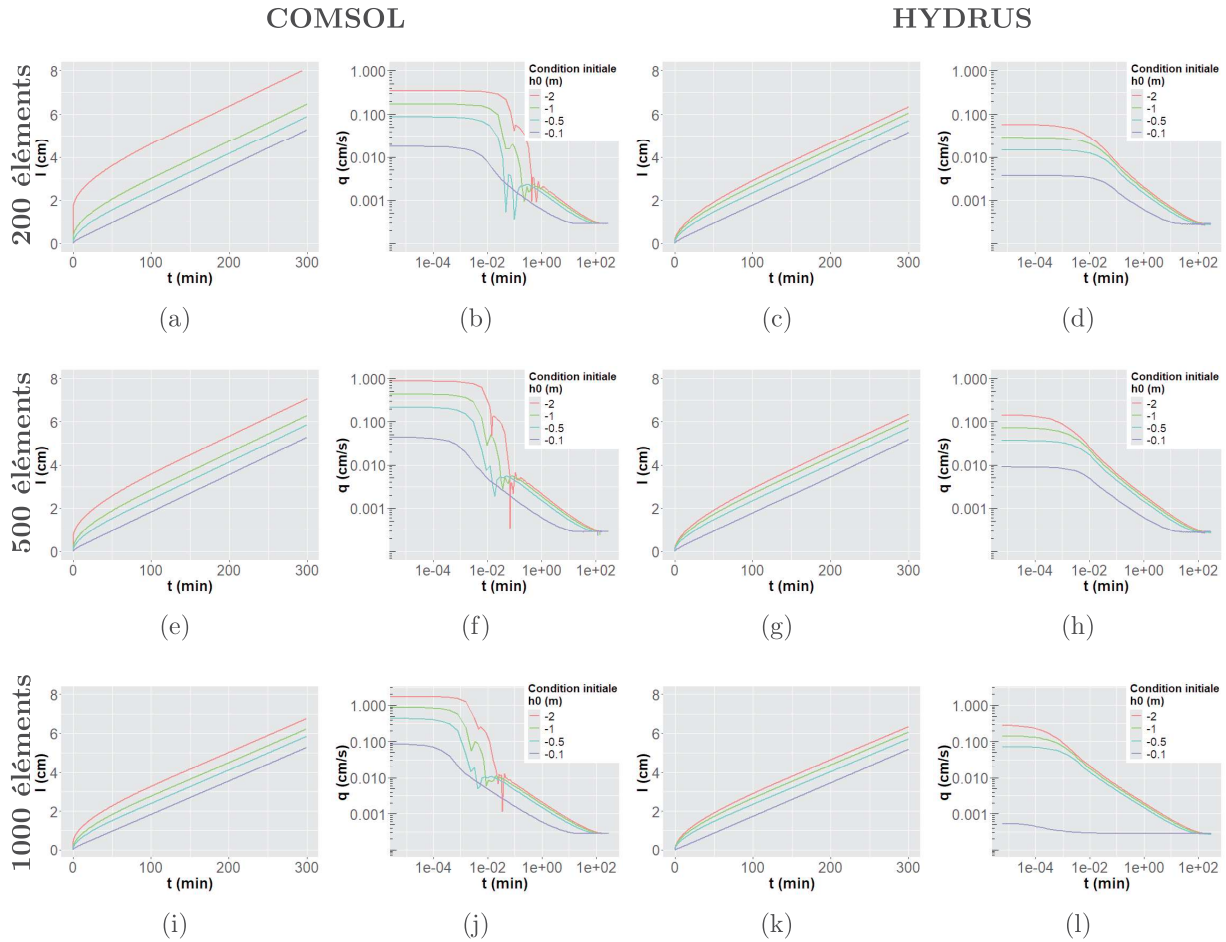


Figure 25: Sensibilité de l'infiltration cumulée et du taux d'infiltration à la condition initiale pour plusieurs maillages

Dans un deuxième temps, en partant des résultats précédents, l'étude de sensibilité des résultats d'infiltration cumulée et de taux d'infiltration ont été faits pour un nombre d'éléments supérieur ou égal à 1000 et pour une condition initiale fixée à  $-1$  m (degré de saturation de 46.6%). Les résultats montrent bien que les infiltrations cumulées des différentes modélisations sont quasi-équivalentes (Figure 26a). Néanmoins, en début de parcours (pour les temps très courts), une différence est observée. Cette différence est mise en évidence lorsque le temps et le taux d'infiltration sont représentés en échelle logarithmique (Figure 26b). Une autre manière de représenter les différences entre les modèles COMSOL et le modèle Hydrus a été d'utiliser l'erreur relative entre les infiltrations cumulées COMSOL et celle obtenue avec le modèle d'Hydrus pour un maillage de 1000 éléments (Figure 26c). Là encore, les différences s'observent bien en début de simulation à l'aide d'une échelle logarithmique de l'axe temporel. Quant aux taux d'infiltration  $q$ , nous retrouvons les mêmes résultats que précédemment, à savoir des irrégularités marquées pour les modèles COMSOL qui ont tendance à avancer dans le temps avec le raffinement du maillage (Figure 26d).

Les résultats obtenus montrent que compte tenu du fait que les différences ne se font que peu ressentir sur l'infiltration cumulée pour un maillage de nombre d'éléments supérieur à 1000, il semble raisonnable de préconiser, en 1D, une taille d'élément maximale de 1 mm, ce qui correspond ici au modèle comportant 1000 éléments.

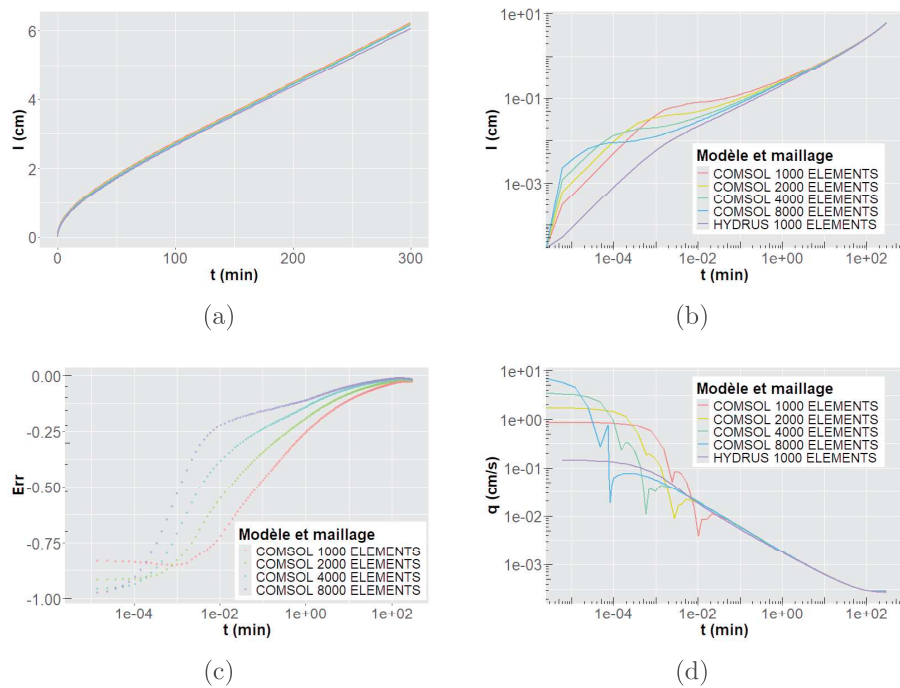


Figure 26: Sensibilité des modèles d'infiltration COMSOL au maillage, condition de potentiel de pression initiale  $-1$  m. (a) Infiltration cumulée. (b) Infiltration cumulée en échelle logarithmique. (c) Erreur relative entre les modèles COMSOL et le modèle Hydrus. (d) Taux d'infiltration.

## 4.2 Modélisation COMSOL de l'infiltration 2D axisymétrique et validation

Les comparaisons des modèles axisymétriques avec éléments rectangulaires entre COMSOL et Hydrus sont compilés dans la figure 27.

Pour les maillages plus fins, à savoir  $0.5$  cm et  $0.2$  cm pour le côté des éléments, les courbes d'infiltrations cumulées peuvent être considérées comme similaires entre les modèles COMSOL et Hydrus (Figures 27c et 27d). En ce qui concerne le taux d'infiltration  $q$ , le même phénomène d'oscillation numérique est observé pour les modèles COMSOL. Là encore, plus les éléments sont fins, plus les oscillations se produisent à un temps court. De plus, la valeur initiale a tendance à augmenter en même temps que la finesse du maillage mais avec une phase quasi-constante de plus en plus courte. Étant donné que cette phase est plus courte, le phénomène de décalage des valeurs d'infiltrations cumulées est atténué. En effet, pour le maillage le plus grossier, à savoir  $2$  cm de côté pour les éléments carrés, le décalage en début d'infiltration n'est pas négligeable (Figure 27a). Enfin, les infiltrations cumulées des modèles Hydrus et COMSOL, avec des éléments mesurant  $1$  cm de côté, sont très différentes (Figure 27b). La préconisation faite à la suite des comparaisons des modèles 1D, à savoir que des éléments mesurant  $1$  cm donnaient des résultats satisfaisants, ne semble plus être valable en 2D axisymétrique. Ces résultats montrent que des éléments mesurant  $0.5$  cm de côté ou moins sont satisfaisants pour que les modèles Hydrus et COMSOL se rejoignent.

Après les maillages à éléments carrés, l'étude s'est portée sur des éléments triangulaires. Pour rappel, les niveaux de maillages testés correspondent à un raffinement des mailles au niveau de l'anneau d'infiltration. La figure 28 donne des exemples de maillages testés ainsi que, pour chacun, l'histogramme de la qualité (*skewness*) de leurs éléments.

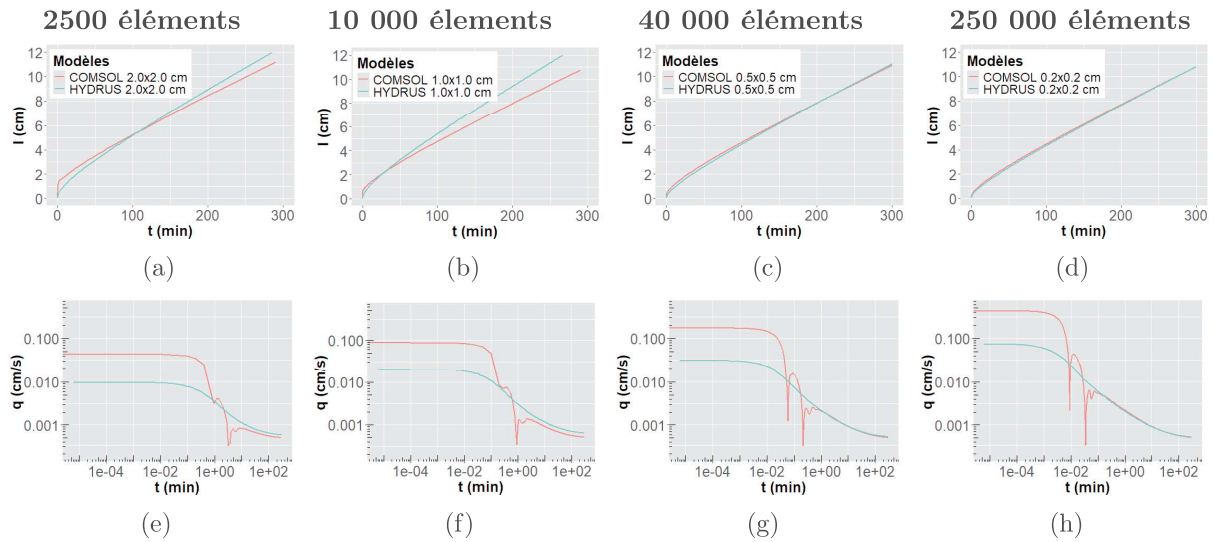


Figure 27: Comparaison des modèles 2D axisymétriques en fonction du maillage entre Hydrus et COMSOL. (a), (b), (c) et (d) : Infiltrations cumulées. (e), (f), (g) et (h) : Taux d'infiltration.

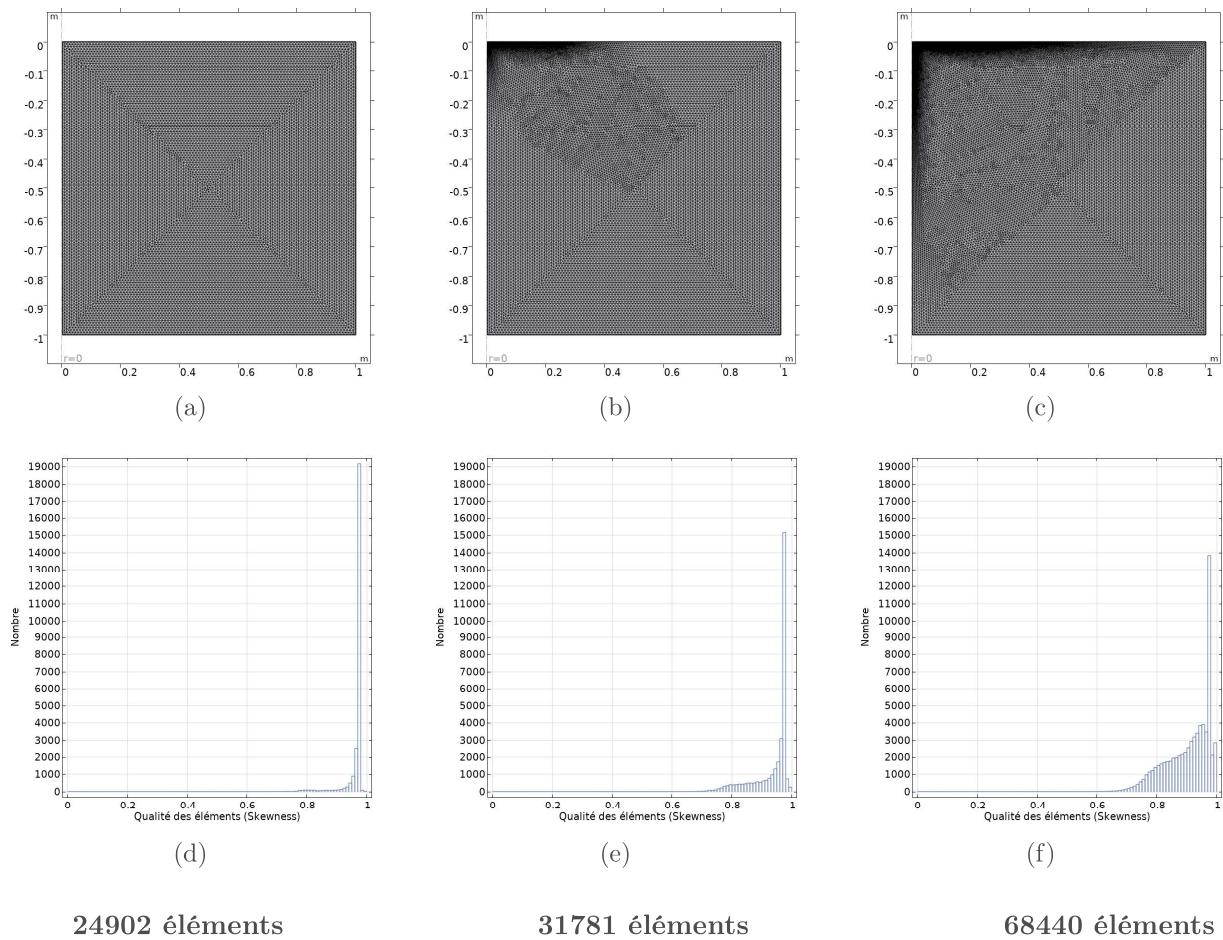


Figure 28: Maillage et histogramme de la qualité des éléments. (a) Maillage uniforme "Extremely fine". (b) Maillage de l'anneau raffiné au niveau 14. (c) Maillage de l'anneau raffiné au niveau 18.

Il apparaît que la qualité de la quasi totalité des éléments reste entre 0.8 et 1 pour tous les modèles. Nous pouvons tout de même remarquer une apparente dégradation lorsque le maillage au niveau de l'anneau (frontière d'infiltration) est raffiné avec une distribution des histogrammes moins resserrée et proche de 1 (Figures 28d, 28e et 28f). Malgré cette tendance, les modèles gagnent en précision avec le niveau de raffinement de l'anneau. Pour comparer au modèle Hydrus, le maillage à éléments carrés de 0.2 cm de côté a été de nouveau utilisé. Malgré la différence entre la nature des éléments, carrés pour Hydrus et triangulaires pour COMSOL, le niveau de précision de Hydrus (250 000 éléments) a quand même semblé plus pertinent. Au delà du niveau 18 de précision pour le maillage de la frontière d'infiltration, les modèles COMSOL ne convergeaient plus. Une étude plus approfondie aurait pu permettre une convergence pour les niveaux supérieurs mais il a été choisi de comparer les résultats obtenus jusqu'au niveau de précision 18 (Figure 29).

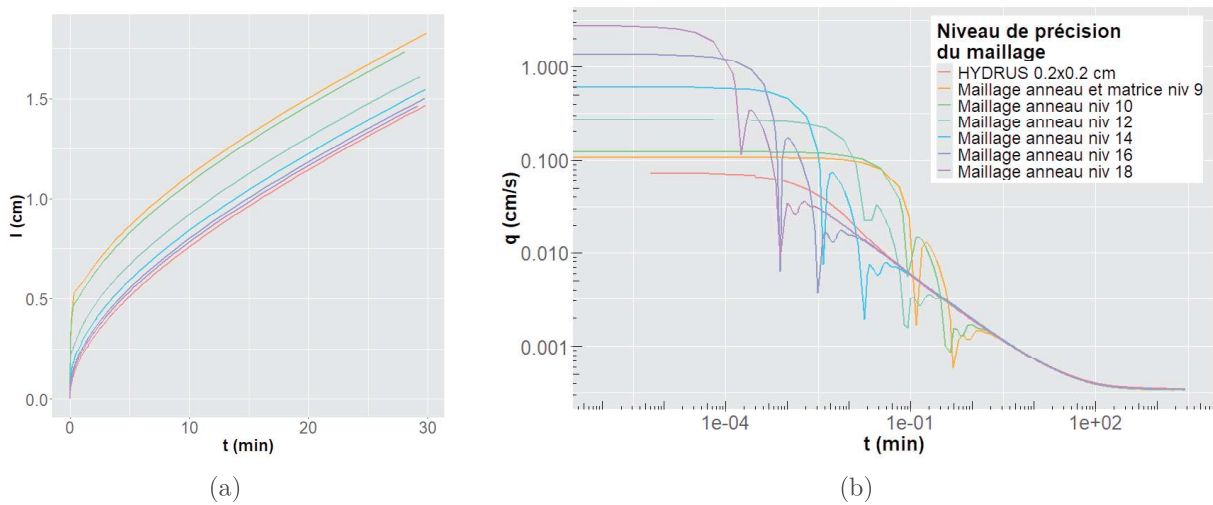


Figure 29: Sensibilité de  $I$  (a) et  $q$  (b) au niveau de finesse sur maillage en surface et comparaison avec le modèle Hydrus (éléments carrés 0.2 cm).

Le maillage le plus grossier testé a comme paramètres ceux prédéfinis par le niveau de finesse le plus grand proposé par COMSOL. Pourtant, nous pouvons remarquer, comme pour les maillages grossiers en 1D, le phénomène de saut en début de simulation de l'infiltration cumulée. Pour éviter ce saut, nous montrons qu'un maillage plus fin au niveau de la surface d'infiltration permet de réduire ce phénomène (Figure 29a). C'est donc le modèle avec le maillage le plus fin au niveau de l'anneau (niveau de finesse 18) qui a été choisi comme référence et validé par comparaison au modèle QEI d'Haverkamp. À cet effet, ces données ont été utilisées pour optimiser les coefficients  $\beta$  et  $\gamma$ . En effet, le modèle analytique optimisé a l'avantage d'être proche du modèle le plus fin obtenu avec COMSOL sans montrer les oscillations numériques présentes pour  $q$  (Figure 30c). Ainsi, ce modèle analytique sera pris comme référence de comparaison pour les modèles 3D homogènes qui suivront. Nous avons basé l'optimisation sur la minimisation de la valeur de la RMSE. La figure 30a met en évidence la zone où les couples  $\beta$  et  $\gamma$  donnent les valeurs les plus faibles de RMSE. La valeur minimale de RMSE a été trouvée pour  $\beta = 0.62$  et  $\gamma = 0.41$ . Ce sont donc les paramètres qui ont été utilisés dans les expressions.

Comme attendu, comparativement entre le modèle 2D axisymétrique et son modèle QEI optimisé, les infiltrations cumulées ainsi que les taux d'infiltration sont quasiment identiques à partir d'un temps suffisamment court (Figure 30b). Ce modèle QEI optimisé sera la référence de comparaison pour valider les modèles 3D homogènes à venir dans la section suivante.

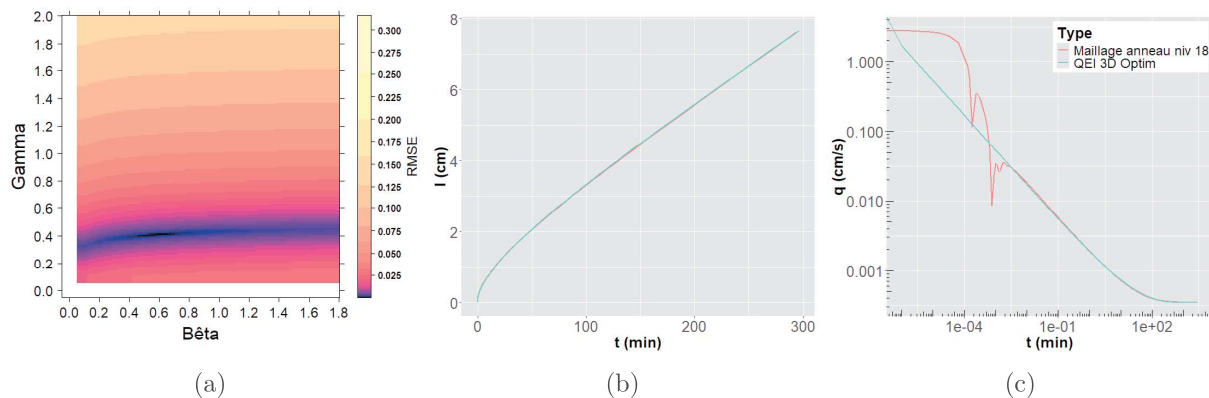


Figure 30: Résultats de l'optimisation des paramètres  $\beta$  et  $\gamma$ . (a) Heatmap des valeurs de RMSE en fonction des couples  $(\beta, \gamma)$ . (b) Comparaison des infiltrations cumulées entre QEI optimisé et le modèle 2D-axisymétrique. (c) Comparaison des taux d'infiltration entre QEI optimisé et le modèle 2D-axisymétrique.

### 4.3 Modélisation COMSOL de l'infiltration 3D pour un milieu homogène

Après les modélisations 2D axisymétriques, les modèles entièrement 3D ont été étudiés. En 3D, le fait de raffiner le maillage de la surface d'infiltration (anneau) augmente très rapidement le nombre d'éléments des modèles. Ainsi, le niveau maximal de finesse sur l'anneau qui a pu être testé est 11 contre 18 pour le modèle 2D axisymétrique. De plus, ces modèles homogènes ont été complétés par la zone d'écoulements préférentiels, ce qui a ajouté un nombre d'éléments non négligeable aux maillages. Il a fallu prendre cela en compte pour ne pas être confronté à des temps de calcul trop importants pour les modèles avec écoulements préférentiels.

Table 8: Nombre d'éléments des modèles homogènes et temps de calcul pour une infiltration simulée jusqu'à 360 minutes pour plusieurs niveaux de finesse.

Niveau de finesse du maillage de l'anneau	9	10	11	12
Nombre d'éléments du maillage 3D global	110 317	141 272	267 067	523 249
Temps de simulation	22 min, 54 s	51 min, 27 s	1 h, 44 min, 15 s	Non simulé

La figure 31 montre que les modèles se rapprochent du modèle QEI (optimisé en 2D axisymétrique et servant de référence) lorsque le maillage est plus fin sur l'anneau en surface. Un niveau de finesse plus important aurait sans doute permis de se rapprocher davantage mais les limites de calcul de la machine ne l'ont pas permis. De plus, nous pouvons remarquer que le gain de précision sur l'infiltration cumulée est limité relativement aux temps de calcul nécessaires (Figure 31a).

Finalement, l'étude des modèles 3D homogènes nous montre que le gain de précision par niveau de finesse du maillage est limité. Ainsi, le niveau de finesse 11 a été considéré comme suffisant malgré une erreur relative assez importante en début de simulation (Figure 31c.)

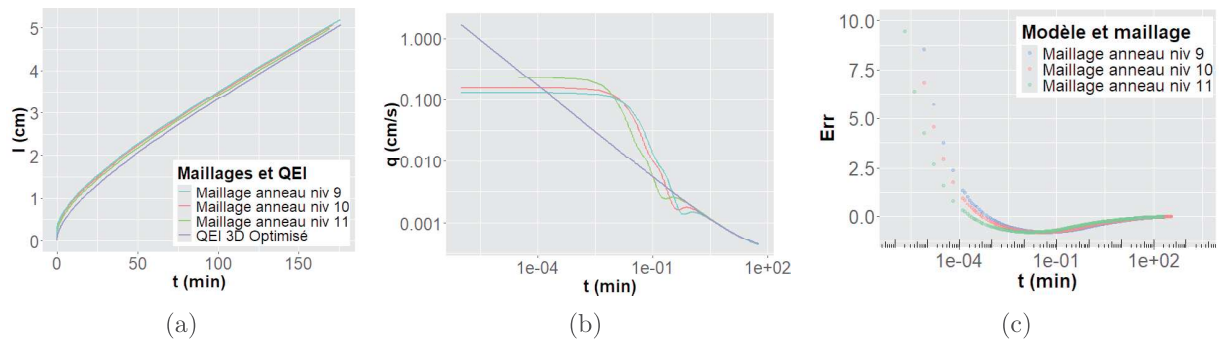


Figure 31: (a) Comparaison des infiltrations cumulées entre QEI optimisé et les modèles 3D homogènes. (b) Comparaison des taux d'infiltration entre QEI optimisé et les modèles 3D homogènes. (c) Erreur relative de l'infiltration cumulée entre les modèles 3D et le QEI 3D optimisé

#### 4.4 Modélisation COMSOL de l'infiltration 3D avec zone d'écoulements préférentiels

Dans cette section, nous nous intéressons à l'influence de la zone de plus grande perméabilité sur le processus d'infiltration. Il est bien évidemment attendu le développement d'une zone d'écoulements préférentiels au niveau de la zone de perméabilité plus importante.

Dans un premier temps, la figure 32 illustre la sensibilité de l'infiltration totale en surface en fonction du maillage. Nous pouvons dire que, tout comme observé précédemment pour le milieu homogène, le raffinement du maillage se traduit par une infiltration cumulée plus cohérente, avec une diminution du saut en début d'infiltration (Figure 32a). L'analyse du taux d'infiltration pour les temps courts (Figure 32b, échelle logarithmique pour le temps) montre qu'en début de modélisation, le régime perturbé (plateau avant atteinte de la décroissance) est plus long pour les maillages moins raffinés. Ce résultat est identique au cas des milieux poreux homogènes. Tout comme les cas précédents, il faut considérer un maillage suffisamment fin pour limiter cette erreur.

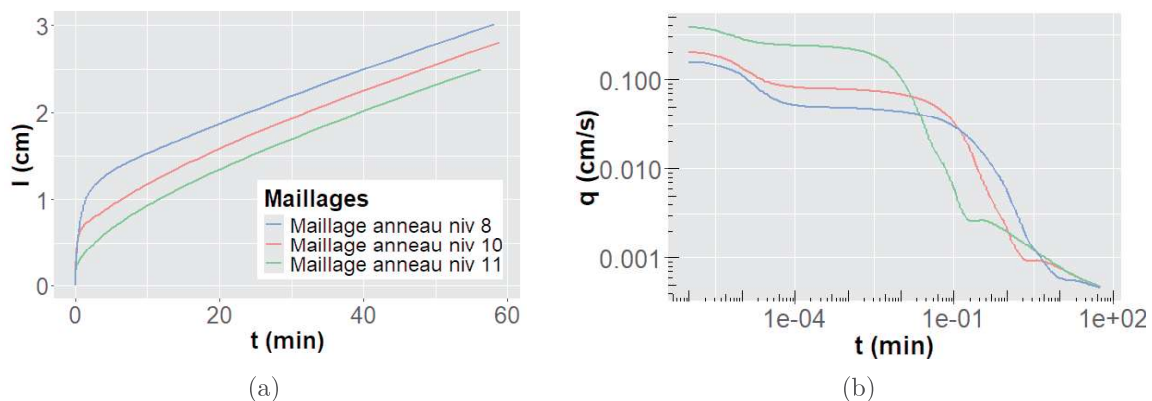


Figure 32: Infiltration cumulée et taux d'infiltration pour les modèles COMSOL 3D avec zone d'écoulements préférentiels, en fonction du niveau de maillage de l'anneau d'infiltration.

Table 9: Nombre d'éléments des modèles hétérogènes et temps de calcul pour une infiltration simulée jusqu'à 360 minutes pour plusieurs niveaux de finesse.

Niveau de finesse du maillage de l'anneau	8	10	11	12
Nombre d'éléments du maillage 3D global	114 949	201 431	324 339	583 291
Temps de simulation	2 h, 53 min, 54 s	3 h, 48 min, 33 s	4 h, 34 min, 9 s	Non simulé

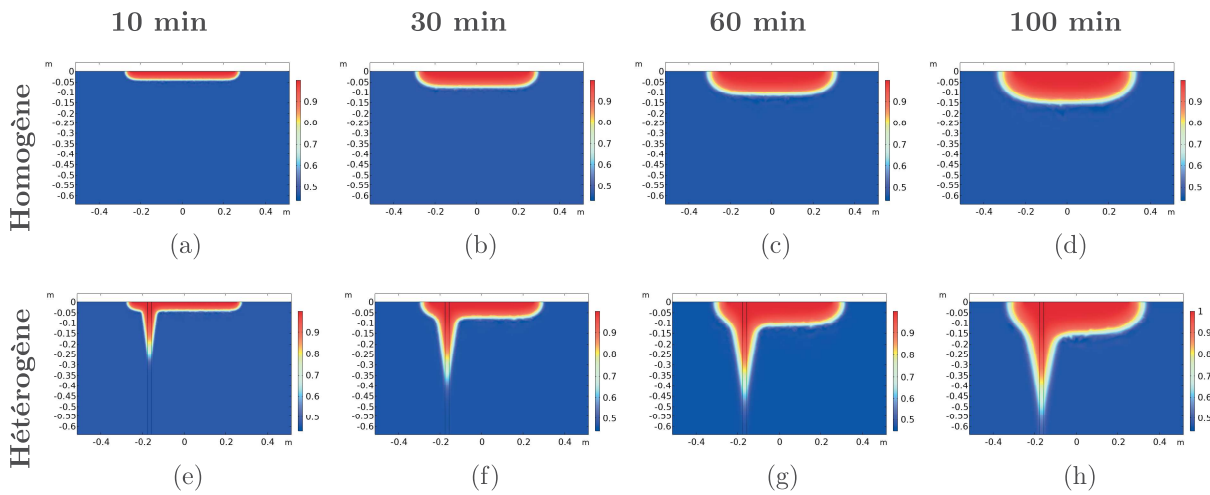


Figure 33: Profils de teneurs en eau en milieu homogène et hétérogène à différents instants.

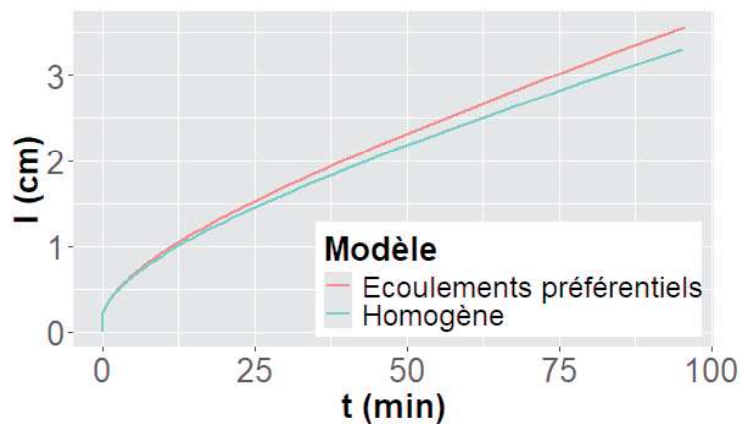


Figure 34: Courbes d'infiltrations cumulées du modèle 3D homogène et avec zone d'écoulements préférentiels.

Dans un second temps, l'analyse des cartes de teneurs en eau (Figure 33) montre bien la concomitance de la propagation du front d'infiltration dans le macropore et dans la matrice. La propagation du front d'infiltration dans la zone d'écoulements préférentiels est bien évidemment beaucoup plus rapide. Les profils montrent aussi un échange entre la zone d'écoulements préférentiels et la matrice l'entourant. Ainsi, l'augmentation de la teneur en eau dans la matrice provient des flux d'eau transitant en premier lieu dans la zone d'écoulements rapides puis ensuite vers la matrice.

#### 4.5 Couplage Infiltration - TRE : Acquisitions et inversions

Le phénomène d'infiltration que nous cherchons à observer via la TRE est un phénomène transitoire, c'est pourquoi les inversions TRE de type *time-lapse* ont été privilégiées. En effet, ces méthodes basées sur la définition d'un instant de référence ont fait leur preuve pour la détection des phénomènes dépendant du temps. Par la suite, il a été nécessaire d'optimiser l'acquisition TRE tant de manière spatiale, avec un choix d'espace inter-électrodes, que de façon temporelle, afin de s'adapter à la vitesse du phénomène d'infiltration observé. Dans un premier temps l'optimisation spatiale a été recherchée. Les résultats obtenus (Figure 35) pour un espace inter-électrodes de 2 cm et 4 cm montrent, comme attendu, une meilleure visualisation du phénomène pour un espacement de 2 cm, puisque égal au diamètre de la zone d'écoulements préférentiels et représentant la maille élémentaire d'acquisition TRE. Un espacement de 4 cm semble trop grand pour pouvoir capter de façon satisfaisante les écoulements rapides à travers le cylindre de rayon 1 cm. Les résultats visibles sur la figure 35 ont été obtenus par inversion *time-lapse* mais pour un pas de temps de 10 minutes. L'inversion du même type, mais avec un pas de temps de 1 minute et un espace inter-électrodes de 2 cm montre l'apparition d'une zone de plus faible résistivité correspondant à l'écoulement rapide (Figure 36 à droite). En comparaison, sur cette même figure sont représentés les résultats obtenus par inversion simple, autrement dit par inversions successives, chacune indépendante des autres. Cette comparaison permet d'illustrer l'intérêt de l'inversion *time-lapse* par rapport aux inversions simples. La zone d'écoulements préférentiels n'est quasiment pas distinguable. Dans tous les cas, nous pouvons remarquer que le processus d'inversion engendre la création d'artefacts de fausses variations de résistivité sous les bulbes d'infiltration. Dans le cadre de mesures de terrain, ces artefacts peuvent entraîner de fausses interprétations. Les raisons de l'apparition de ces fausses variations sont multiples : la méthode de régularisation choisie lors des itérations pendant l'inversion, le choix de l'espacement inter-électrodes, la vitesse d'acquisition des mesures TRE mal choisie par rapport à la vitesse de l'infiltration (Audebert, 2015).

La figure 37 compare les résistivités interprétées obtenues avec le dispositif TRE à 64 électrodes, espacées de 2 cm et pour une inversion *time-lapse* toutes les minutes avec les résistivités vraies (issues des valeurs de teneurs en eau numériques obtenues par la simulation COMSOL). Cette confrontation entre le phénomène observé et la mesure obtenue permet de se rendre compte qu'avec ce dispositif TRE, la détection des écoulements préférentiels se limite à la couche superficielle du sol. Dès la première acquisition au bout de 1 minute, il est possible de remarquer que la TRE sous-estime la profondeur de l'écoulement ; cela vient sans doute de la meilleure résolution en surface, proche des électrodes, qu'en profondeur. Cette tendance à sous-estimer la profondeur de l'infiltration ne semble pas se compenser au cours du temps et au contraire s'aggraver. Un écart inter-électrodes plus petit encore pourrait peut-être améliorer la résolution mais engendrerait une profondeur globale des résultats TRE également plus petite et pourrait poser des problèmes de faisabilité.

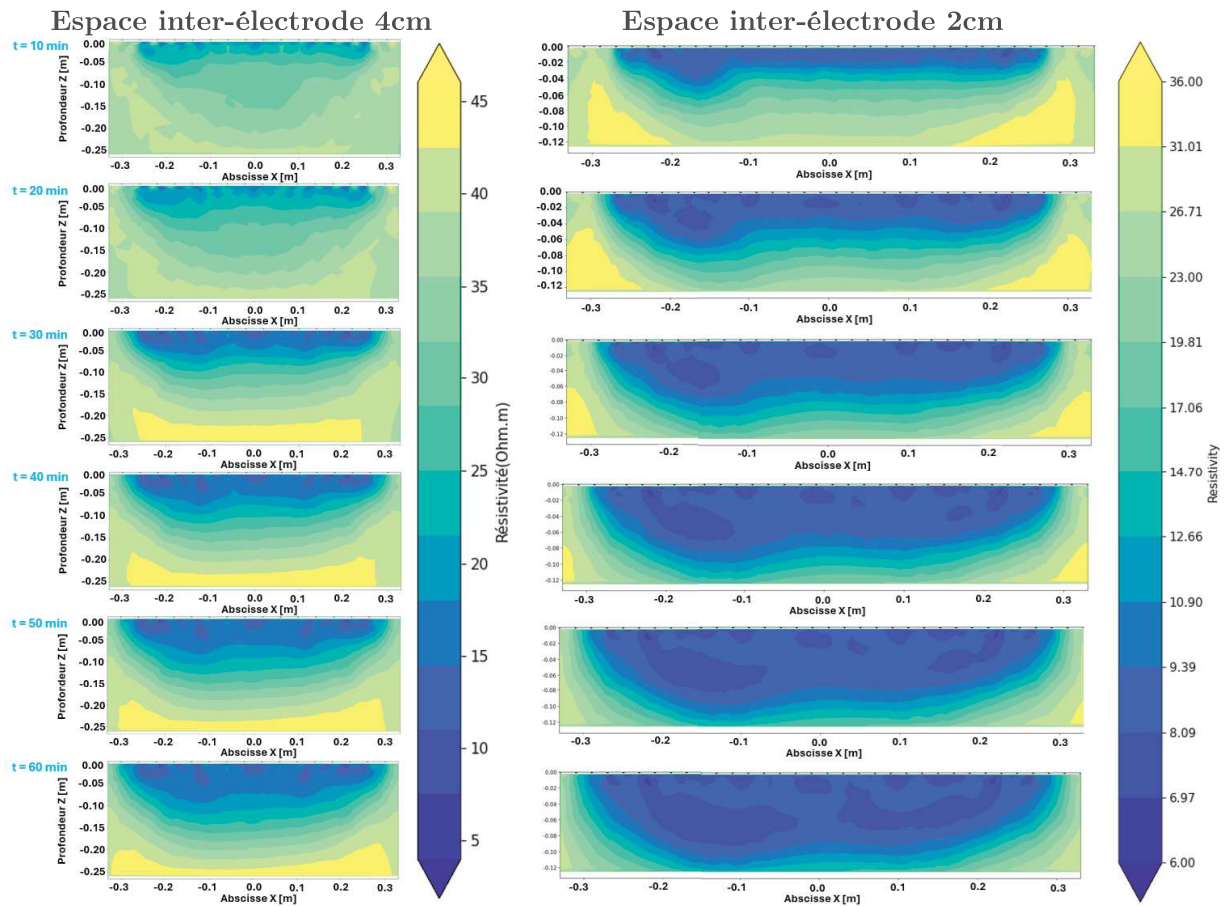


Figure 35: Résistivités interprétées (time-lapse) entre 0 et 60 minutes toutes les 10 minutes d'un dispositif TRE à 64 électrodes espacées de 4 cm (gauche) et espacé de 2 cm (droite)

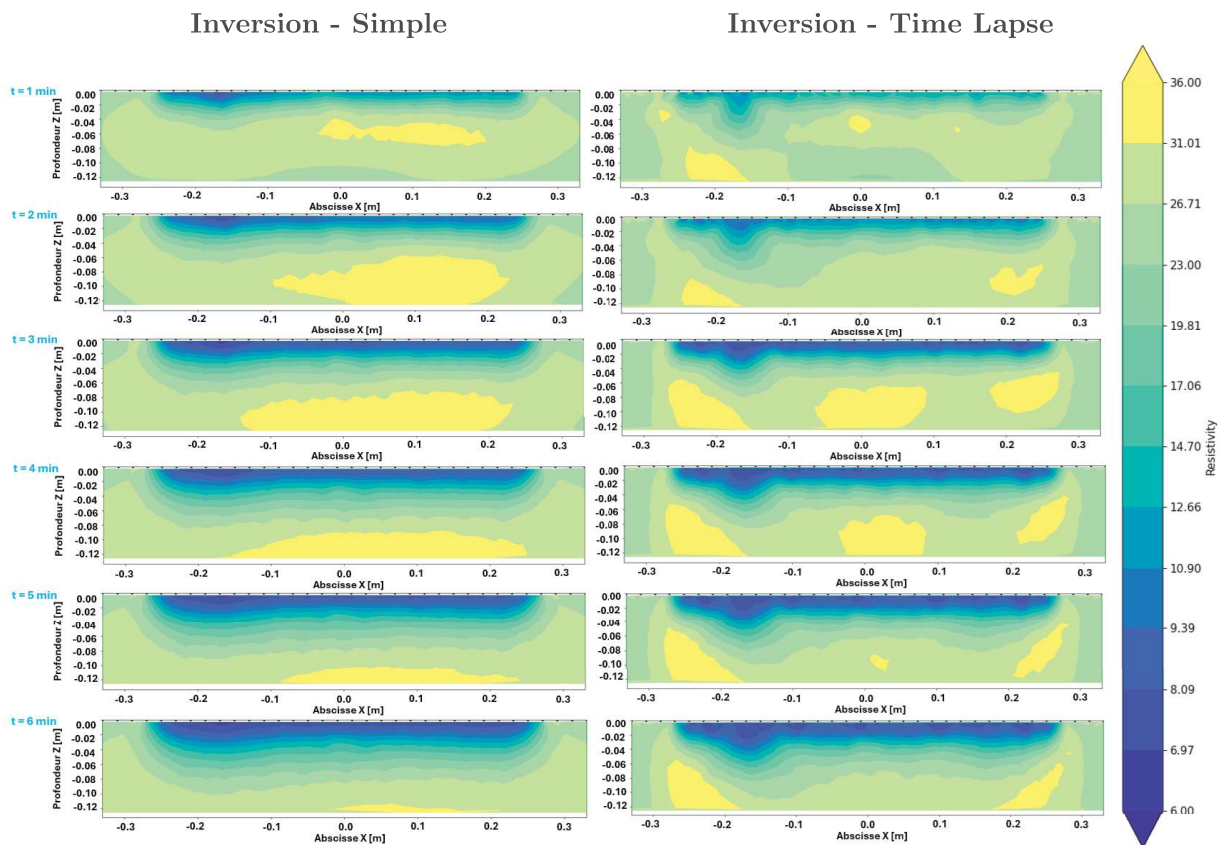


Figure 36: Inversion simple pour chaque pas de temps de 1 minute (gauche) ; Inversion time-lapse pour un pas de temps de 1 minute (droite). Dispositif TRE de 64 électrodes espacées de 2 cm

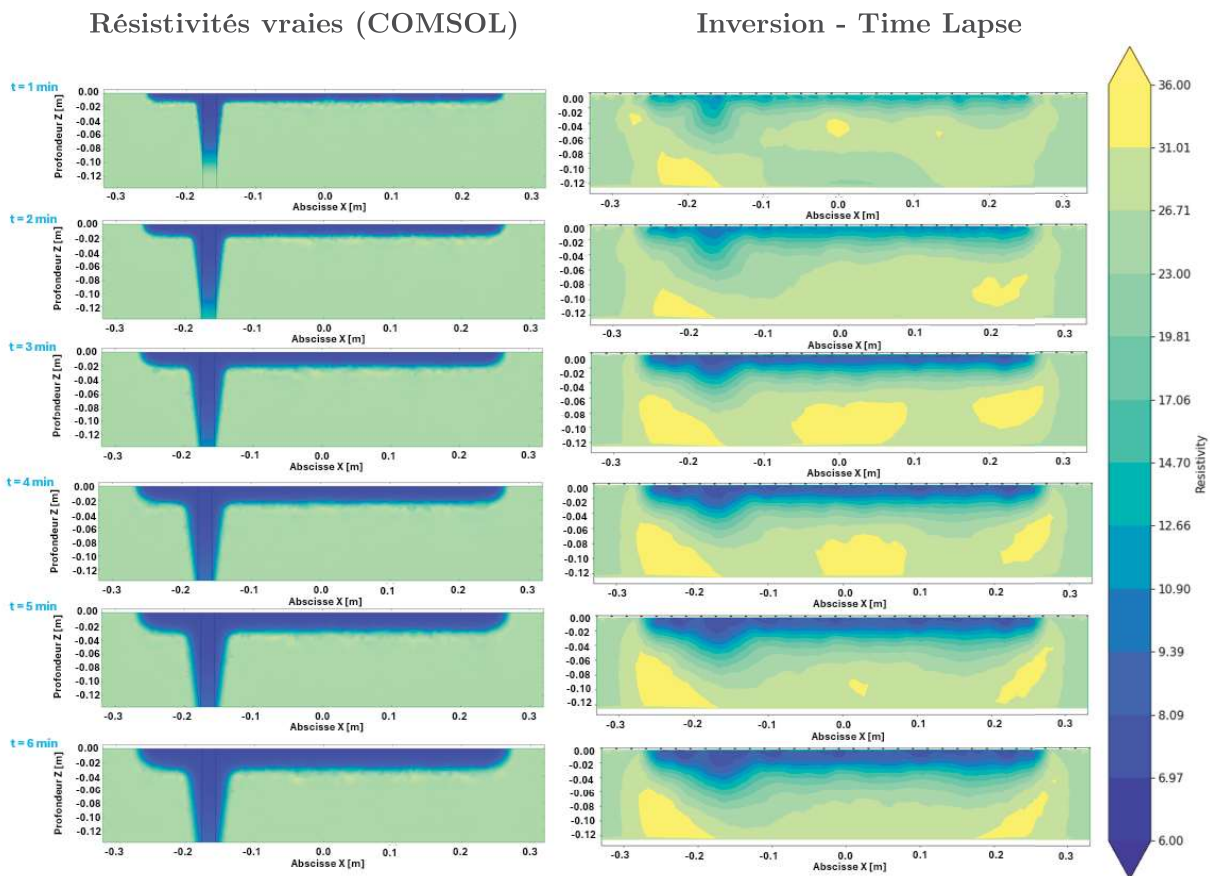


Figure 37: Résistivités vraies obtenues à partir des teneurs en eau et de la loi d'Archie optimisée (Gauche) ; Inversion time-lapse pour un pas de temps de 1 minute pour un dispositif TRE de 64 électrodes espacées de 2 cm (droite)

Dans le but d'améliorer le rendu des données TRE, outre la diminution de l'espace inter-électrodes, plusieurs stratégies auraient été possibles mais n'ont pas été testées ou modélisées par manque de temps. La première de ces méthodes consiste en l'augmentation du contraste de résistivité en augmentant la conductivité électrique de l'eau d'infiltration. Par exemple, de l'eau salée peut être utilisée sur le terrain dans ce but. L'augmentation du courant lors de l'injection pour les acquisitions TRE est également possible pour améliorer le rendu. D'autre part, il aurait été intéressant de tester d'autres configurations de quadripôles telle que la configuration dipôle-dipôle ou encore la configuration Wenner-Schlumberger (Tableau 3). La configuration pôle-dipôle (Tableau 3) est celle qui engendre le moins d'artefacts après inversion. Néanmoins, ce dispositif est souvent difficile à mettre en place sur le terrain car une des électrodes doit se trouver à l'infini (Audebert, 2015). Enfin, Clément, 2010 montre qu'une acquisition TRE en 3D via un dispositif en étoile (Figure 38) réduit drastiquement les artefacts. Les dispositifs en étoile demandent un nombre conséquent d'électrodes et donc augmentent d'autant plus le temps d'acquisition TRE. Dans leur étude, le dispositif en étoile comportait 108 électrodes pour un temps minimal d'acquisition de 4 minutes et 30 secondes. Comme nous l'avons vu précédemment, le pas de temps choisi pour les inversions *time-lapse* doit être adapté à la vitesse du phénomène d'infiltration étudié, ce qui demande de réduire le nombre d'électrodes pour limiter le temps d'acquisition au besoin.

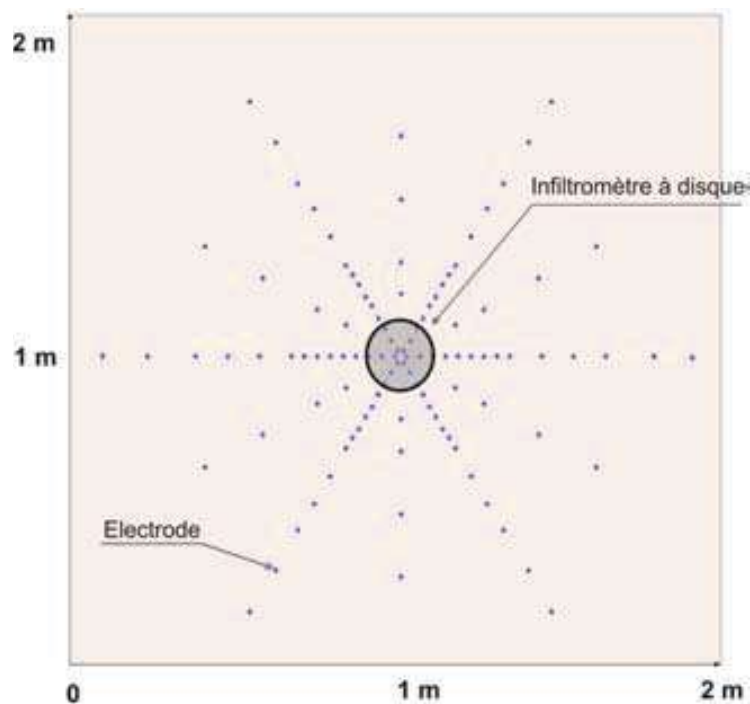


Figure 38: Exemple de dispositif TRE en étoile à 108 électrodes pour le suivi d'infiltration à travers un anneau (Clément, 2010).

## 5 Conclusion

Ce travail a permis d'étudier la capacité de la TRE pour détecter les bulbes d'infiltration et les écoulements préférentiels au cours des essais infiltrométriques. Ce travail s'est appuyé sur une modélisation multi-physique des phénomènes liés aux écoulements de l'eau dans le sol et à l'acquisition TRE par injection de courant. Le couplage multi-physique a requis la résolution de l'équation de Richards (écoulement) permettant d'obtenir les cartes de teneurs en eau puis la modélisation du champ électrique dans le domaine de résistivité électrique dépendante de ces teneurs en eau.

La démarche de modélisation a été effectuée par étapes : d'abord 1D, puis 2D axisymétrique et enfin 3D. Des validations ont été effectuées pour les modélisations COMSOL par comparaison à des données numériques générées et validées en amont (Outil de modélisation Hydrus). Les données ont aussi été comparées à un modèle analytique (modèle QEI d'Haverkamp) pour le cas de l'infiltration 2D axisymétrique. Enfin, la cohérence des modélisations au travers des échelles a été testée (notamment comparaison 2D axisymétrique et 3D). Ces validations et études de sensibilité, nécessaires en début de ce TFE, ont montré l'importance liée aux choix de géométrie et de maillage. L'apparition de sauts, en début de simulation, pour les valeurs de volumes infiltrés nous a notamment incité à être vigilants sur ce point. Avec un maillage correctement choisi, les modèles COMSOL se sont trouvés satisfaisants en regard des modèles Hydrus.

Une fois ces modèles COMSOL 3D choisis, leur utilisation a permis le couplage avec la modélisation de l'injection de courant correspondant à la TRE. Concrètement, les données de résistivités vraies ont été reliées à la teneur en eau en utilisant la loi d'Archie. L'utilisation de cette loi s'est montrée efficace pour transformer les teneurs en eau en résistivités électriques. L'exportation des résistivités vraies depuis COMSOL a permis ensuite de procéder aux simulations COMSOL de l'acquisition de données TRE. Deux scénarios ont été étudiés : milieu homogène (avec infiltration uniforme) et infiltration avec un écoulements préférentiels, ce dernier étant modélisé par une zone de perméabilité augmentée. L'acquisition TRE correspond à un protocole complexe d'injection de courants et de mesure de potentiels électriques sur un ensemble de quadripôles. La modélisation complexe a été réalisée à l'aide du code spécifique F3DM. Le traitement des données de potentiels électrique ainsi obtenus s'est fait à l'aide de ResIPy, et nous a fourni les cartes de résistivités apparentes puis interprétées après inversion des premières. Deux types d'inversions ont été réalisées : inversion simple et inversion de type *time-lapse*. Plusieurs configurations d'espacement d'électrodes et d'acquisition temporelle ont été testées.

Les inversions de type *time-lapse* ont montré leur meilleure efficacité comparativement aux inversions simples. Néanmoins, il apparaît que la vitesse du phénomène d'infiltration à travers une zone d'écoulements préférentiels demande un temps d'acquisition court et un espacement faible entre électrodes pour pouvoir détecter la zone d'écoulements rapides. Pourtant, même avec ce pas de temps court, la détection du chemin préférentiel de l'eau ne peut être détecté que sur une profondeur très superficielle du sol et donc, ne rend pas compte du phénomène en profondeur. Cela confirme la difficulté de détecter entièrement les phénomènes d'écoulements préférentiels à l'aide de la TRE mais montre qu'il est quand même possible de voir leur position au moins en surface.

Ces travaux ont permis de bien avancer sur la modélisation couplée écoulement & infiltration avec l'acquisition TRE d'images de résistivités. Ces travaux sont la première étape d'une série visant le développement de la TRE pour l'hydrologie. Celle-ci pourrait, à terme, s'appliquer pour le suivi d'ouvrages d'infiltration d'eaux pluviales et grises ainsi que pour la compréhension des processus hydrologiques à l'échelle de versants.

## 6 Bibliographie

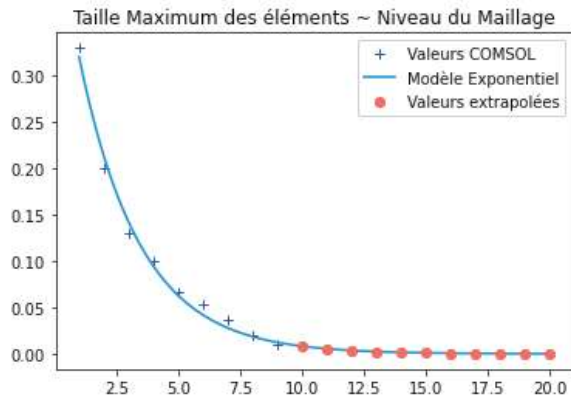
### References

- Angulo-Jaramillo, R., V. Bagarello, S. Di Prima, et al. (2019). “Beerkan Estimation of Soil Transfer parameters (BEST) across soils and scales”. In: Journal of Hydrology 576, pp. 239–261. DOI: 10.1016/j.jhydro1.2019.06.007.
- Angulo-Jaramillo, R., V. Bagarello, M. Iovino, et al. (2016). Infiltration Measurements for Soil Hydraulic Characterization. Springer International Publishing. ISBN: 978-3-319-31786-1 978-3-319-31788-5.
- Audebert, Marine (Sept. 2015). “Développement d’une méthode de contrainte des modèles hydrodynamiques par une stratégie d’analyse des données géophysiques ERT : Application aux écoulements de lixiviat dans les massifs de déchets”. These de doctorat. Université Grenoble Alpes (ComUE).
- Bear, J. (1988). Dynamics of fluids in porous media. Repr. Dover books on physics and chemistry. Dover [u.a.] ISBN: 978-0-486-65675-5.
- Braud, I. et al. (2005). “Use of scaled forms of the infiltration equation for the estimation of unsaturated soil hydraulic properties (the *Beerkan* method)”. In: European Journal of Soil Science 56.3, pp. 361–374. DOI: 10.1111/j.1365-2389.2004.00660.x.
- Brunet, P., R. Clément, and C. Bouvier (2010). “Monitoring soil water content and deficit using Electrical Resistivity Tomography (ERT) – A case study in the Cevennes area, France”. In: Journal of Hydrology 380.1-2, pp. 146–153. DOI: 10.1016/j.jhydro1.2009.10.032.
- Carsel, R.F. and R.S. Parrish (1988). “Developing joint probability distributions of soil water retention characteristics”. In: Water Resources Research 24.5, pp. 755–769. DOI: 10.1029/WR024i005p00755.
- Clément, R. (Jan. 2010). “Étude du suivi des injections des lixiviats dans les massifs de déchets : combinaison entre méthodes géophysiques et simulation hydrodynamique”. These de doctorat. Grenoble.
- Dahlin, T. (2001). “The development of DC resistivity imaging techniques”. In: Computers & Geosciences 27.9, pp. 1019–1029. DOI: 10.1016/S0098-3004(00)00160-6.
- Delgado-Gonzalez, L. et al. (2023). “Flow path monitoring by discontinuous time-lapse ERT: An application to survey relationships between secondary effluent infiltration and roots distribution”. In: Journal of Environmental Management 326, p. 116839. DOI: 10.1016/j.jenvman.2022.116839.
- Haverkamp, R. et al. (1994). “Three-dimensional analysis of infiltration from the disc infiltrometer: 2. Physically based infiltration equation”. In: Water Resources Research 30.11, pp. 2931–2935. ISSN: 0043-1397, 1944-7973. DOI: 10.1029/94WR01788.
- Hillel, D.I. (2004). Introduction to environmental soil physics. eng. Amsterdam Boston: Elsevier Academic Press. ISBN: 978-0-12-348655-4.
- Jia, H. et al. (2017). “China’s sponge city construction: A discussion on technical approaches”. In: Frontiers of Environmental Science & Engineering 11.4, p. 18. DOI: 10.1007/s11783-017-0984-9.
- Knödel, K., H.-J. Voigt, and G. Lange (2007). Environmental geology: handbook of field methods ... Berlin: Springer. ISBN: 978-3-540-74669-0.
- Kutílek, M. and D.R. Nielsen (1994). Soil hydrology: textbook for students of soil science ... GeoEcology Textbook. Cremlingen-Destedt: Catena-Verl. ISBN: 978-3-923381-26-5.

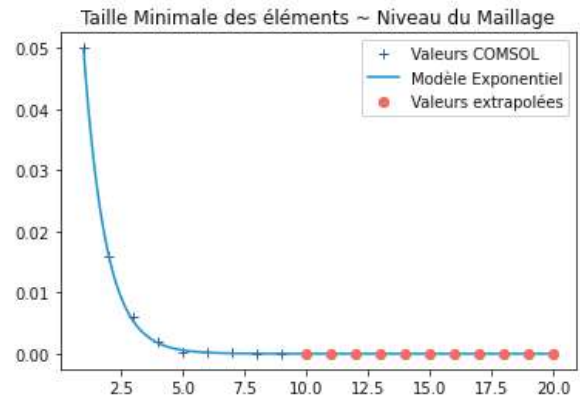
- Lassabatere, L., R. Angulo-Jaramillo, et al. (2009). “Numerical evaluation of a set of analytical infiltration equations”. In: Water Resources Research 45.12, 2009WR007941. DOI: 10.1029/2009WR007941.
- Lassabatere, L., D. Yilmaz, et al. (2014). “New Analytical Model for Cumulative Infiltration into Dual-Permeability Soils”. In: Vadose Zone Journal 13.12, vzj2013.10.0181. DOI: 10.2136/vzj2013.10.0181.
- Lassabatère, L. et al. (2006). “Beerkan Estimation of Soil Transfer Parameters through Infiltration Experiments—BEST”. In: Soil Science Society of America Journal 70.2, pp. 521–532. DOI: 10.2136/sssaj2005.0026.
- Loke, M.H. and R.D. Barker (1996). “Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method <sup>1</sup>”. In: Geophysical Prospecting 44.1, pp. 131–152. DOI: 10.1111/j.1365-2478.1996.tb00142.x.
- Mualem, Y. (1976). “A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media”. In: Water Resources Research 12.3, pp. 513–522. DOI: 10.1029/WR012i003p00513.
- Rabouli, S. (June 2022). “Méthode innovante de spatialisation des propriétés physiques du sol : Application aux surfaces d’infiltration”. These de doctorat. Lyon.
- Scaini, A. et al. (2017). “Velocity and celerity dynamics at plot scale inferred from artificial tracing experiments and time-lapse ERT”. In: Journal of Hydrology 546, pp. 28–43. DOI: 10.1016/j.jhydro1.2016.12.035.
- Šimůnek, J. et al. (2003). “Review and comparison of models for describing non-equilibrium and preferential flow and transport in the vadose zone”. In: Journal of Hydrology 272.1-4, pp. 14–35. DOI: 10.1016/S0022-1694(02)00252-4.
- Smettem, K.R.J. et al. (1994). “Three-dimensional analysis of infiltration from the disc infiltrometer: 1. A capillary-based theory”. In: Water Resources Research 30.11, pp. 2925–2929. DOI: 10.1029/94WR01787.
- Timlin, D.J., L.R. Ahuja, and M.D. Ankeny (Mar. 1994). “Comparison of Three Field Methods to Characterize Apparent Macropore Conductivity”. In: Soil Science Society of America Journal 58.2, pp. 278–284. DOI: 10.2136/sssaj1994.03615995005800020003x.
- Van Genuchten, M.Th. (1980). “A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils”. In: Soil Science Society of America Journal 44.5, pp. 892–898. DOI: 10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x.
- Varado, N. et al. (2006). “Assessment of an efficient numerical solution of the 1D Richards’ equation on bare soil”. In: Journal of Hydrology 323.1-4, pp. 244–257. DOI: 10.1016/j.jhydro1.2005.07.052.
- Vereecken, H. et al. (2019). “Infiltration from the Pedon to Global Grid Scales: An Overview and Outlook for Land Surface Modeling”. In: Vadose Zone Journal 18.1, pp. 1–53. DOI: 10.2136/vzj2018.10.0191.
- Watson, K.W. and R.J. Luxmoore (May 1986). “Estimating Macroporosity in a Forest Watershed by use of a Tension Infiltrometer”. In: Soil Science Society of America Journal 50.3, pp. 578–582. DOI: 10.2136/sssaj1986.03615995005000030007x.
- Zevenbergen, C., D. Fu, and A. Pathirana (2018). “Transitioning to Sponge Cities: Challenges and Opportunities to Address Urban Water Problems in China”. In: Water 10.9, p. 1230. DOI: 10.3390/w10091230.
- Zgheib, S., R. Moilleron, and G. Chebbo (2011). “Flux et sources des polluants prioritaires dans les eaux urbaines en lien avec l’usage du territoire”. In: Techniques Sciences Méthodes 4, pp. 50–62. DOI: 10.1051/tsm/201104050. (Visited on 05/03/2024).

## 7 ANNEXES

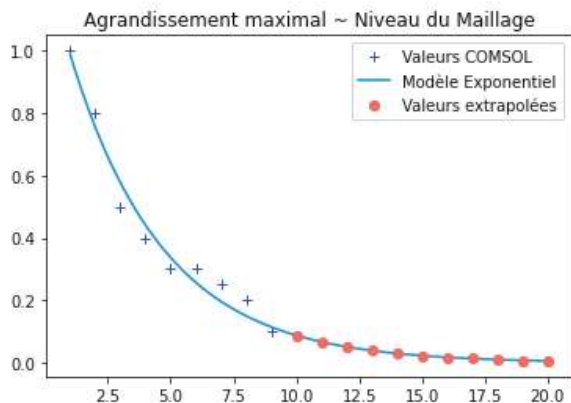
### Modèles d'extrapolation des paramètres de maillages COMSOL



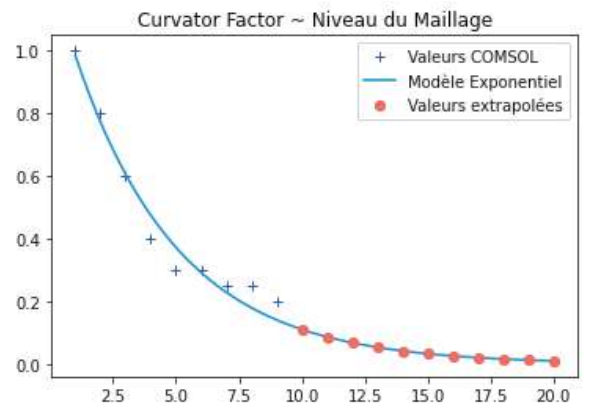
(a)



(b)



(c)



(d)

Fichier de séquence TRE pour 64 électrodes. (a) Début. (b) Fin

	A	B	M	N
1				
2	1	4	2	3
3	1	7	3	5
4	1	10	4	7
5	1	13	5	9
6	1	16	6	11
7	1	19	7	13
8	1	22	8	15
9	1	25	9	17
10	1	28	10	19
11	1	31	11	21
12	1	34	12	23
13	1	37	13	25
14	1	40	14	27
15	1	43	15	29
16	1	46	16	31
17	1	49	17	33
18	1	52	18	35
19	1	55	19	37
20	1	58	20	39
21	1	61	21	41
22	1	64	22	43
23	2	5	3	4
24	2	8	4	6
25	2	11	5	8
26	2	14	6	10
27	2	17	7	12
28	2	20	8	14
29	2	23	9	16
30	2	26	10	18
31	2	29	11	20
32	2	32	12	22
33	2	35	13	24
34	2	38	14	26
35	2	41	15	28
36	2	44	16	30
37	2	47	17	32
38	2	50	18	34
39	2	53	19	36
40	2	56	20	38
41	2	59	21	40
42	2	62	22	42
43	3	6	4	5
44	3	9	5	7
45	3	12	6	9
46	3	15	7	11
47	3	18	8	13
48	3	21	9	15
49	3	24	10	17
50	3	27	11	19
51	3	30	12	21
52	3	33	13	23
53	3	36	14	25
54	3	39	15	27
55	3	42	16	29
56	3	45	17	31
57	3	48	18	33
58	3	51	19	35
59	3	54	20	37
60	3	57	21	39
61	3	60	22	41
62	3	63	23	43

(a)

591	44	50	46	48
592	44	53	47	50
593	44	56	48	52
594	44	59	49	54
595	44	62	50	56
596	45	48	46	47
597	45	51	47	49
598	45	54	48	51
599	45	57	49	53
600	45	60	50	55
601	45	63	51	57
602	46	49	47	48
603	46	52	48	50
604	46	55	49	52
605	46	58	50	54
606	46	61	51	56
607	46	64	52	58
608	47	50	48	49
609	47	53	49	51
610	47	56	50	53
611	47	59	51	55
612	47	62	52	57
613	48	51	49	50
614	48	54	50	52
615	48	57	51	54
616	48	60	52	56
617	48	63	53	58
618	49	52	50	51
619	49	55	51	53
620	49	58	52	55
621	49	61	53	57
622	49	64	54	59
623	50	53	51	52
624	50	56	52	54
625	50	59	53	56
626	50	62	54	58
627	51	54	52	53
628	51	57	53	55
629	51	60	54	57
630	51	63	55	59
631	52	55	53	54
632	52	58	54	56
633	52	61	55	58
634	52	64	56	60
635	53	56	54	55
636	53	59	55	57
637	53	62	56	59
638	54	57	55	56
639	54	60	56	58
640	54	63	57	60
641	55	58	56	57
642	55	61	57	59
643	55	64	58	61
644	56	59	57	58
645	56	62	58	60
646	57	60	58	59
647	57	63	59	61
648	58	61	59	60
649	58	64	60	62
650	59	62	60	61
651	60	63	61	62
652	61	64	62	63

(b)

Exemples de résultats au format BERT générés par F3DM

1	F3DF vers.3.04	73	A	B	M	N	Vm	Vn	DVmn	i			
2	Parameters	74	1	4	2	3	-1.002920e+02	1.001600e+02	2.004520e+02	1			
3	number of electrodes:	75	1	7	3	5	-5.023689e+01	5.019285e+01	1.004297e+02	1			
4	64	76	1	10	4	7	-3.350666e+01	3.342603e+01	6.693269e+01	1			
5	Resistivité variable	77	1	13	5	9	-2.516924e+01	2.501236e+01	5.018160e+01	1			
6	Amps:	78	1	16	6	11	-2.021087e+01	1.985812e+01	4.006899e+01	1			
7	1	79	1	19	7	13	-1.718339e+01	1.548810e+01	3.267149e+01	1			
8	Electrodes coordinates:	80	1	22	8	15	-1.454681e+01	1.396564e+01	2.851245e+01	1			
9	6.300000e-01	81	1	25	9	17	-1.253338e+01	1.336121e+01	2.589459e+01	1			
10	6.100000e-01	82	1	28	10	19	-1.114750e+01	1.264249e+01	2.378999e+01	1			
11	5.900000e-01	83	1	31	11	21	-9.873137e+00	1.119899e+01	2.117212e+01	1			
12	5.700000e-01	84	1	34	12	23	-9.083601e+00	9.571002e+00	1.865460e+01	1			
13	5.500000e-01	85	1	37	13	25	-8.312367e+00	8.500501e+00	1.681287e+01	1			
14	5.300000e-01	86	1	40	14	27	-7.614505e+00	8.002255e+00	1.561676e+01	1			
15	5.100000e-01	87	1	43	15	29	-6.894680e+00	7.956956e+00	1.485164e+01	1			
16	4.900000e-01	88	1	46	16	31	-6.385300e+00	7.555071e+00	1.394037e+01	1			
17	4.700000e-01	89	1	49	17	33	-6.055899e+00	6.667882e+00	1.272378e+01	1			
18	4.500000e-01	90	1	52	18	35	-5.669754e+00	6.220965e+00	1.189072e+01	1			
19	4.300000e-01	91	1	55	19	37	-5.242838e+00	5.778676e+00	1.102151e+01	1			
20	4.100000e-01	92	1	58	20	39	-4.853628e+00	5.360872e+00	1.021450e+01	1			
21	3.900000e-01	93	1	61	21	41	-4.762728e+00	4.857693e+00	9.620421e+00	1			
22	3.700000e-01	94	1	64	22	43	-4.618780e+00	4.483184e+00	9.101964e+00	1			
23	3.500000e-01	95	2	5	3	4	-1.005383e+02	1.002760e+02	2.008142e+02	1			
24	3.300000e-01	96	2	8	4	6	-5.022226e+01	5.018008e+01	1.004023e+02	1			
25	3.100000e-01	97	2	11	5	8	-3.351696e+01	3.341285e+01	6.692990e+01	1			
26	2.900000e-01	98	2	14	6	10	-2.518599e+01	2.498347e+01	5.016946e+01	1			
27	2.700000e-01	99	2	17	7	12	-2.026308e+01	1.973004e+01	3.999312e+01	1			
28	2.500000e-01	100	2	20	8	14	-1.744623e+01	1.442778e+01	3.187401e+01	1			
29	2.300000e-01	101	2	23	9	16	-1.446285e+01	1.440804e+01	2.887089e+01	1			
30	2.100000e-01	102	2	26	10	18	-1.253127e+01	1.369115e+01	2.622242e+01	1			
31	1.900000e-01	103	2	29	11	20	-1.110277e+01	1.320800e+01	2.431077e+01	1			
32	1.700000e-01	104	2	32	12	22	-9.933056e+00	1.095086e+01	2.088392e+01	1			
33	1.500000e-01	105	2	35	13	24	-9.069676e+00	9.451947e+00	1.852162e+01	1			
34	1.300000e-01	106	2	38	14	26	-8.271198e+00	8.600099e+00	1.687130e+01	1			
35	1.100000e-01	107	2	41	15	28	-7.509780e+00	8.237001e+00	1.574678e+01	1			
36	9.000000e-02	108	2	44	16	30	-6.822361e+00	8.065678e+00	1.488804e+01	1			
37	7.000000e-02	109	2	47	17	32	-6.396187e+00	7.293713e+00	1.368990e+01	1			
38	5.000000e-02	110	2	50	18	34	-5.994264e+00	6.691964e+00	1.268623e+01	1			
39	3.000000e-02	111	2	53	19	36	-5.524963e+00	6.187229e+00	1.171219e+01	1			
40	1.000000e-02	112	2	56	20	38	-5.096011e+00	5.717579e+00	1.081359e+01	1			
41	-1.000000e-02	113	2	59	21	40	-4.999016e+00	5.292600e+00	1.029162e+01	1			
42	-3.000000e-02	114	2	62	22	42	-4.842621e+00	4.732139e+00	9.574760e+00	1			
43	-5.000000e-02	115	3	6	4	5	-1.001615e+02	1.005697e+02	2.007313e+02	1			
44	-7.000000e-02	116	3	9	5	7	-5.022769e+01	5.018617e+01	1.004139e+02	1			
45	-9.000000e-02	117	3	12	6	9	-3.352673e+01	3.340423e+01	6.693096e+01	1			
46	-1.100000e-01	118	3	15	7	11	-2.520742e+01	2.493987e+01	5.014729e+01	1			
47	-1.300000e-01	119	3	18	8	13	-2.036921e+01	1.943889e+01	3.980810e+01	1			
48	-1.500000e-01	120	3	21	9	15	-1.715719e+01	1.553142e+01	3.268861e+01	1			
49	-1.700000e-01	121	3	24	10	17	-1.439543e+01	1.487611e+01	2.927153e+01	1			
50	-1.900000e-01	122	3	27	11	19	-1.252556e+01	1.435948e+01	2.688504e+01	1			
51	-2.100000e-01	123	3	30	12	21	-1.104988e+01	1.256024e+01	2.361011e+01	1			
52	-2.300000e-01	124	3	33	13	23	-9.923927e+00	1.073628e+01	2.066020e+01	1			
53	-2.500000e-01	125	3	36	14	25	-9.040639e+00	9.278202e+00	1.831884e+01	1			
54	-2.700000e-01	126	3	39	15	27	-8.229342e+00	8.631529e+00	1.686087e+01	1			
55	-2.900000e-01	127	3	42	16	29	-7.395817e+00	8.465277e+00	1.586109e+01	1			
56	-3.100000e-01	128	3	45	17	31	-6.709090e+00	8.349898e+00	1.505899e+01	1			
57	-3.300000e-01	129	3	48	18	33	-6.344168e+00	7.217732e+00	1.356130e+01	1			
58	-3.500000e-01	130	3	51	19	35	-5.835289e+00	6.659714e+00	1.243500e+01	1			
59	-3.700000e-01	131	3	54	20	37	-5.361970e+00	6.144903e+00	1.150687e+01	1			
60	-3.900000e-01	132	3	57	21	39	-5.258981e+00	5.669914e+00	1.092889e+01	1			
61	-4.100000e-01	133	3	60	22	41	-5.088567e+00	5.107486e+00	1.019605e+01	1			
62	-4.300000e-01	134	3	63	23	43	-4.882804e+00	4.694013e+00	9.576817e+00	1			
63	-4.500000e-01	135	4	7	5	6	-1.002834e+02	1.001335e+02	2.004169e+02	1			
64	-4.700000e-01	136	4	10	6	8	-5.026770e+01	5.015992e+01	1.004276e+02	1			
65	-4.900000e-01	137	4	13	7	10	-3.353909e+01	3.338526e+01	6.692434e+01	1			
66	-5.100000e-01	138	4	16	8	12	-2.524812e+01	2.485927e+01	5.010739e+01	1			
67	-5.300000e-01	139	4	19	9	14	-2.066007e+01	1.849761e+01	3.915768e+01	1			
68	-5.500000e-01	140	4	22	10	16	-1.696197e+01	1.637863e+01	3.334606e+01	1			
69	-5.700000e-01	141	4	25	11	18	-1.426810e+01	1.579089e+01	3.005899e+01	1			
70	-5.900000e-01	142	4	28	12	20	-1.248701e+01	1.497288e+01	2.745989e+01	1			
71	-6.100000e-01	143	4	31	13	22	-1.102048e+01	1.213873e+01	2.315921e+01	1			
72	-6.300000e-01	144	4	34	14	24	-9.931531e+00	1.047993e+01	2.041146e+01	1			

(a)

(b)

Figure 41: (a) Coordonnées des électrodes (2D). (b) Numéros électrodes - Potentiel en M - Potentiel en N -  $\Delta V - I(A)$