

**Optimisation des paramètres de l'équation de Van
Genuchten pour la gestion d'irrigation d'un champ de
canneberges**

Mémoire

Besma Sliti

Maîtrise en génie agroalimentaire

Maître ès sciences (M.Sc.)

Québec, Canada

© Besma Sliti, 2014

RÉSUMÉ

Cette recherche a pour objectif principal d'estimer les paramètres de Van Genuchten en utilisant une grille manuelle ainsi que la méthode inverse d'HYDRUS-1D et de PEST. Elle vise à gérer l'irrigation dans un champ de canneberges. L'optimisation des paramètres hydrauliques dépend des variables d'entrées, des données initiales et des limites imposées par Mayer (1999). Toutefois, l'existence du phénomène d'hystérèse dans un sol sableux de texture grossière, la distribution racinaire linéaire ou uniforme et le choix de l'optimisateur numérique peuvent influencer la qualité de l'optimisation des paramètres hydrauliques ainsi que la calibration du modèle. L'efficacité numérique du modèle a été évaluée à partir de critères statistiques. Le modèle calibré par HYDRUS-1D, à partir des données du potentiel matriciel obtenues sur le terrain, a fourni des analyses numériques plus précises.

ABSTRACT

This study's main objective is to estimate Van Genuchten's parameters by using a manual grid as well as the inverse method of HYDRUS-1D and PEST. It aims to determine irrigation requirements in a cranberry field. Hydraulic parameter optimization depends on input variables, initial data and imposed constraints such as mentioned by Mayer (1999). However, hysteresis in coarse texture soil, linear or uniform root distribution and simulation numerical code selection may influence hydraulic parameter optimization quality and the model calibration program responsible for the simulation. Model digital efficiency has been evaluated based on statistical criteria. The calibrated model by HYDRUS-1D taken from pressure head field data provides more accurate digital analyses.

Table des matières

RÉSUMÉ	III
ABSTRACT	V
Table des matières	VII
Liste des tableaux	XI
Liste des figures	XIII
Nomenclature	XV
Dédicace	XVII
REMERCIEMENTS	XIX
Chapitre 1 : Introduction générale	1
Chapitre 2 : Revue de littérature	3
2.1. Contexte	3
2.1.1. La culture des canneberges	3
2.1.2. Gestion de l'eau.....	3
2.1.3. Tensiomètre pour gérer l'eau	4
2.2. Modélisation	5
2.2.1. Importance de la modélisation	5
2.2.2. Équation de Richards	5
2.2.3. HYDRUS-1D : Application à l'agriculture.....	6
2.2.4. Extraction de l'eau par les racines.....	8
2.2.5. Hystérèse.....	9
2.3. Équation de Van Genuchten	10
2.3.1. Utilisation	10
2.3.2. Paramètres de l'équation de Van Genuchten.....	11

2.4. Optimisation des paramètres.....	13
2.4.1. Utilité.....	13
2.4.2. Calibration	14
2.4.3. Méthode inverse	14
Chapitre 3 : Hypothèse et objectifs	17
3.1. Hypothèse	17
3.2. Objectifs.....	17
3.2.1. Objectif principal	17
3.2.2. Objectifs spécifiques	17
Chapitre 4 : Matériels et méthodes.....	19
4.1. Description du site expérimental	19
4.2. Données expérimentales.....	21
4.2.1. Données météorologiques	21
4.2.2. Potentiel matriciel et niveau de nappe	22
4.2.3. Caractéristiques hydrauliques du sol	24
4.3. Modélisation du potentiel matriciel	24
4.3.1. Conditions initiales	24
4.3.2. Conditions aux limites.....	25
4.3.3. Fonctionnement du logiciel HYDRUS-1D.....	25
4.3.4. Paramètres hydrauliques	27
4.3.5. Hystérèse.....	28
4.3.6. Profondeur des mesures.....	28
4.3.7. Fonctionnement de PEST	29
4.4. Optimisation des paramètres hydrauliques	29
4.4.1. Procédures suivies	29
4.4.2. Critères statistiques	30

Chapitre 5 : Résultats	33
5.1. Simulations initiales	33
5.2. Résultats obtenus à partir de la grille manuelle.....	38
5.3. Effet des profondeurs du tensiomètre	40
5.4. Optimisation des paramètres avec PEST.....	44
5.5. Comparaison entre HYDRUS-1D et PEST.....	47
5.6. Effet d'hystérèse sur l'optimisation des paramètres hydrauliques avec HYDRUS-1D.....	50
5.7. Distribution racinaire.....	51
Chapitre 6 : Discussion	53
Chapitre 7 : Conclusion générale	61
Chapitre 8 : Recommandations	65
Bibliographie	67
ANNEXES.....	73
Annexe I. Fonctionnement d'HYDRUS-1D.....	73
Annexe II. Fonctionnement de PEST et d'HYDRUS-1D	74
Annexe III. Fichiers exécutés et générés par PEST.....	75
Annexe IV. Exécution entre PEST et d'HYDRUS-1D.....	76
Annexe V. Effet de la profondeur du tensiomètre sur l'optimisation du point de mesure 27.....	77
Annexe VI. Effet de la profondeur du tensiomètre sur l'optimisation du point de mesure 28.....	79
Annexe VII. Optimisation avec PEST du point de mesure 27	81
Annexe VIII. Optimisation par PEST du point de mesure 28.....	82

Liste des tableaux

Tableau 1. Paramètres hydrauliques estimés au laboratoire.....	24
Tableau 2. Caractéristiques définissant le module d'HYDRUS-1D	26
Tableau 3. Limites supérieures et inférieures des paramètres hydrauliques retenues pour notre étude (Mayer, 1999)	28
Tableau 4. Grille des paramètres de Van Genuchten.....	30
Tableau 5. Résultats d'optimisation initiale de points de mesures 26, 27 et 28	34
Tableau 6. Résultats d'optimisation initiale de points de mesures 26, 27 et 28	34
Tableau 7. Résultats des 22 meilleures combinaisons des paramètres hydrauliques à l'aide d'une grille déterminée manuellement.....	39
Tableau 8. Résultats d'effet de la profondeur du tensiomètre sur l'optimisation du point de mesure 26 sans tenir compte.....	41
Tableau 9. Résultats d'effet de la profondeur du tensiomètre sur l'optimisation du point de mesure 26	42
Tableau 10. Résultats d'effet de la profondeur du tensiomètre sur l'optimisation du point de mesure 27	77
Tableau 11. Résultats d'effet de la profondeur du tensiomètre sur l'optimisation du point de mesure 27	78
Tableau 12. Résultats d'effet de la profondeur du tensiomètre sur l'optimisation du point de mesure 28	79
Tableau 13. Résultats d'effet de la profondeur du tensiomètre du point de mesure 28	80
Tableau 14. Limites supérieures et inférieures des paramètres calculées (Wohling et al, 2008)	44
Tableau 15. Résultats d'optimisation avec PEST du point de mesure 26.....	45
Tableau 16. Résultats d'optimisation avec PEST du point de mesure 27	81

Tableau 17. Résultats d'optimisation par PEST du point de mesure 28	82
Tableau 18. Résultats d'optimisation par HYDRUS-1D et PEST des points de mesures 26, 27 et 28 à 10 cm de profondeur	48
Tableau 19. Résultats d'effet d'hystérèse sur l'optimisation des points de mesure 26,27 et 28 en tenant compte des limites imposées de Mayer, 1999	50
Tableau 20. Valeurs minimales et maximales de teneur en eau simulée et du potentiel matriciel mesuré à 7,10 et 12 cm de profondeur du tensiomètre, sans les limites de Meyer (1999).....	56
Tableau 21. Valeurs minimales et maximales de teneur en eau simulée et du potentiel matriciel mesuré à 10 cm de profondeur du tensiomètre, avec les limites de Meyer (1999).....	56
Tableau 22. Valeurs des paramètres hydrauliques obtenues pour chacun des points de mesures sans et avec limites inférieures et supérieures imposées.....	58

Liste des figures

Figure 1. Application d'HYDRUS-1D dans le domaine d'agriculture	7
Figure 2. Distribution de la densité racinaire uniforme et linéaire	8
Figure 3. Extraction d'eau racinaire selon le modèle de Feddes (simunek, 2010)	9
Figure 4. Courbes du phénomène d'hystérèse (Simunek, 2009)	10
Figure 5. Courbe de rétention d'eau (a) : $\theta(h)$, où θ est la teneur en eau ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), θ_r est teneur en eau résiduelle, θ_m est la teneur en eau dans la région immobile, h_s est la valeur de l'air piégé, et la courbe de la fonction hydraulique (b) : $k(h)$, où k_s est la conductivité hydraulique saturée, K_k conductivité hydraulique mesurée	11
Figure 6. Localisation du champ D8 (Gumiére, 2012)	19
Figure 7. Champs D8 sur le site 1 (Gumiére, 2012)	20
Figure 8. Section du champ D8 illustrant la disposition du puits des drains et des tensiomètres (Gumiére, 2012).....	20
Figure 9. Graphique d'évapotranspiration (ET_0) en cm/h	21
Figure 10. Données de précipitation et d'irrigation (Pte et Irrg).....	22
Figure 11. Variation du niveau de la nappe des trois points 26, 27 et 28.....	23
Figure 12. Potentiel matriciel des trois points 26, 27 et 28	23
Figure 13. Distribution du profil du potentiel de pression au point de mesure 26	25
Figure 14. Potentiel matriciel mesuré et simulé en fonction du temps avec des distributions racinaires uniforme et linéaire à 10 cm de profondeur pour le point de mesure 26 sans et avec les limites de Mayer (1999)	35
Figure 15. Potentiel matriciel mesuré et simulé en fonction du temps avec des distributions racinaires uniforme et linéaire à 10 cm de profondeur du point de mesure 27 avec et sans les limites de Mayer (1999).	36
Figure 16. Potentiel matriciel mesuré et simulé en fonction du temps au cours des distributions racinaires uniforme et linéaire à 10 cm de profondeur du point de mesure 28 avec et sans les limites de Mayer (1999)	37

Figure 17. Courbes de rétention (a, b et c) obtenues sans limites imposées aux paramètres hydrauliques	55
Figure 18. Courbes de rétention (a, b et c) obtenues après limites imposées aux paramètres hydrauliques	57

Nomenclature

$K(\theta)$ fonction de la conductivité hydraulique

$\Theta(h)$ fonction de la courbe de rétention de l'eau

q_j^* (x, t_i) mesures spécifiques à un temps t_i

n_{qj} nombre de mesures dans un ensemble de mesures particulier

n_q nombre d'ensembles différents de mesures

b_j et n_b nombres de paramètres avec des connaissances préalables

B ensemble de paramètres à optimiser de l'équation de Van Genuchten

DR distribution racinaire

ETP évapotranspiration en cm/h

ET_0 évapotranspiration de référence

Ψ_p potentiel matricielle en cm/h

h potentiel matriciel de sol

i indice qui représentent chaque mesure spécifique

I_{rrg} irrigation, cm/h

j indice qui représente l'ensemble des mesures de potentiels matriciels

K_s conductivité hydraulique saturée cm/h

l paramètre de la fonction de Van Genuchten

LAI indice de surface foliaire

M nombre de mesure d'un ensemble particulier

m paramètre de la fonction de Van Genuchten non dimensionnel

N nombre de différentes mesures de potentiel matriciel

n paramètre de la fonction de Van Genuchten non dimensionnel

OF fonction objective non dimensionnel

O_j valeur observée d'une variable j
 P_j valeur prédit de variable j
 PT profondeur de tensiomètre en cm
 P_{te} précipitation, cm/h
 S_p potentiel d'absorption d'eau, h^{-1}
 SSQ somme de carrés des poids résiduels non dimensionnelle
 t temps, h
 T_p taux de potentiel de transpiration cm/h
 x coordonnées horizontales, cm
 z coordonnée verticale, cm
 $RMSE$ erreur quadratique moyenne
 EAM erreur absolue moyenne
 MD différence moyenne
 R^2 coefficient de détermination
 θ_s teneur en eau volumique saturé (cm^3cm^{-3})
 θ_r teneur en eau volumique résiduel (cm^3cm^{-3})
 θ teneur en eau volumique (cm^3cm^{-3})
 Φ fonction objective
 Q matrice diagonale
 X matrice
 c données simulées ou mesurées
 b vecteur
 v_j et w_{ij} poids associés à un ensemble ou un point de mesure particulier
 \bar{v}_j et $\bar{w}_{i,j}$ poids associés à un ensemble ou un point de mesure particulier mais pas pour les propriétés hydrauliques de sol

Dédicace

Je souhaite dédier ce travail à ma famille qui m'a supportée moralement et matériellement au cours de cette maîtrise notamment :

Mes parents

Mon époux Jamil,

Ma fille Hafsa,

Mes beaux-parents

Mes ami(e)s.

REMERCIEMENTS

Je souhaite surtout remercier mon directeur de projet, M. Jacques Gallichand, pour les nombreuses rencontres qui ont été indispensables à l'élaboration et à l'aboutissement de mon mémoire sur HYDRUS-1D. Il a toujours su se rendre disponible tout au long des diverses étapes de ce projet. Grâce à son expertise inestimable, ce mémoire a pu voir le jour. Je désire aussi remercier M. Silvio Gumière qui m'a fourni des articles fort pertinents et des données sur le terrain ainsi que le temps qu'il m'a accordé pour expliquer quelques notions du logiciel HYDRUS-1D. Je tiens aussi à transmettre mes remerciements à M. Jean Caron de la Faculté des sciences de l'agriculture et de l'alimentation qui m'a fourni des explications sur le modèle de FEDDES. Mes remerciements vont aussi à Yann Périard Larrivée, étudiant au doctorat en génie agro-environnemental, qui a été d'une aide précieuse en me fournissant des données de potentiels matriciels mesurées et météorologiques. Finalement, j'aimerais remercier Mohamed Khelifi, directeur du programme de maîtrise génie agroalimentaire, pour son appui inestimable, Steeve Pépin pour les données de LAI et Robert Lagacé, professeur agrégé à la Faculté des sciences de l'agriculture et de l'alimentation.

Chapitre 1 : Introduction générale

La production croissante des canneberges nécessite l'usage de plus en plus fréquent de l'eau et par conséquent, exige une gestion plus efficace de l'irrigation (Bonin, 2010). Les racines peu profondes des canneberges et la remontée capillaire provenant de la nappe phréatique empêchent de déterminer avec précision la quantité nécessaire d'eau pour augmenter la production de cette culture (Pelletier et al., 2012). La modélisation est l'une des méthodes utilisées pour résoudre les problèmes liés à la gestion de l'eau (Gumière, 2009). Elle fournit des données sur la réalité physique du sol et permet de prendre les décisions nécessaires pour mieux gérer l'irrigation et faire des prévisions en vue de minimiser les manques d'eau (Hopmaus et al., 2001). Jusqu'à ce jour, les deux méthodes utilisées pour la gestion de l'eau sont le bilan hydrique et le maintien d'une valeur constante du potentiel matriciel ou de la teneur en eau (Arbat et al., 2008). L'utilisation de modèles, basée sur l'équation de Richards, permet de déterminer la façon de distribuer l'eau dans le sol en tenant compte des conditions météorologiques et de la texture du sol.

Cette étude utilise le programme HYDRUS-1D pour optimiser les paramètres hydrauliques de l'équation de Van Genuchten et pour prédire les potentiels matriciels d'un champ de canneberges, codé D8, qui se trouve dans la région agricole du Centre-du-Québec. Le plan de ce mémoire comporte sept chapitres. Le premier chapitre présente la problématique portant sur la gestion d'irrigation de la culture de canneberges, le second chapitre est une revue de littérature sur le contexte socio-économique de la culture des canneberges, les méthodes utilisées pour gérer la quantité d'eau, l'utilisation du programme HYDRUS-1D qui solutionne l'équation de Richards pour optimiser les paramètres de Van Genuchten et prédire les potentiels matriciels mesurés. Le troisième chapitre porte sur l'utilisation de la méthode inverse

qui permet d'optimiser les paramètres hydrauliques et sur l'objectif qui consiste à démontrer la possibilité de l'optimisation de ces paramètres hydrauliques en utilisant deux optimisateurs : un interne (HYDRUS-1D) et un externe (PEST). Cette optimisation permet une meilleure concordance entre les potentiels matriciels mesurés et simulés. Le quatrième chapitre fournit une explication détaillée des matériels et méthodes utilisés. Les matériels comprennent les données expérimentales, l'optimisateur interne HYDRUS-1D et l'optimisateur externe PEST, alors que les méthodes constituent la méthode inverse et les critères statistiques pour l'évaluation des résultats. Les cinquième et sixième chapitres présentent les résultats d'optimisation et une discussion sur l'importance de l'imposition des limites minimales et maximales aux paramètres hydrauliques lors de la calibration du modèle HYDRUS-1D. La discussion porte aussi sur l'effet de la densité racinaire, sur l'ajout du phénomène d'hystérèse et sur l'effet de la profondeur du tensiomètre sur l'optimisation. Enfin, le septième chapitre comporte une conclusion générale des principaux points traités et analysés dans cette étude.

Chapitre 2 : Revue de littérature

2.1. Contexte

2.1.1. La culture des canneberges

La canneberge (*Vaccinium macrocarpon Ait*) appartient à la famille des éricacées, et on la retrouve à l'état sauvage dans les tourbières. Elle est surtout cultivée sur des sols sableux qui contiennent plus de 90 % de sable (seulement 10 % des superficies en canneberges se situent dans un sol organique). La croissance de cette plante nécessite un pH acide, situé entre 4 et 5, un climat frais, un sol bien drainé et une fertilisation contrôlée, fractionnée et précise selon le stade de croissance de la plante (Poirier, 2010). La culture de la canneberge donne des rendements en fruits élevés à condition de bien gérer l'eau. Le Canada est le deuxième producteur de canneberges au monde, dépassé seulement par les États-Unis. Le Canada produit actuellement près de 36 000 tonnes de canneberges annuellement, soit 12% de la production mondiale. À l'échelle nationale, la production au Québec représente 90% de la récolte canadienne (Caron, 2009).

2.1.2. Gestion de l'eau

La faible profondeur des racines de canneberges engendre une problématique de gestion de l'eau. En conséquence, les producteurs n'arrivent pas à trouver un optimum d'irrigation pour minimiser la perte d'eau. Quotidiennement, la récolte des canneberges nécessite deux heures d'irrigation pour répondre à ses besoins (Bonin, 2008). L'eau est sollicitée à toutes les étapes de la culture, que ce soit pour fournir une couverture hivernale,

pour la protection contre le gel au printemps et à l'automne, pour la récolte des fruits et enfin, pour fournir l'eau nécessaire à sa croissance en été (Bonin, 2008).

2.1.3. Tensiomètre pour gérer l'eau

Un tensiomètre est un appareil pour mesurer le potentiel matriciel dans le sol, de diamètre variable et muni d'une bougie poreuse en céramique à une extrémité et d'un manomètre à l'autre. Les tensiomètres sont installés pour une saison entière ou une période plus longue dans le but de fournir des lectures dans un endroit précis pour une durée de temps choisie. Les lectures de tensiomètres sont facilement interprétables et la salinité du sol n'a aucune influence sur celles-ci. Les tensiomètres sont utilisés pour contrôler le taux d'humidité dans le sol et le déclenchement de l'irrigation. Ils nécessitent un entretien rigoureux, notamment lorsque le sol est sec. Pour prévenir les fissures de la bougie lorsque la température baisse sous le point de congélation, on doit protéger les tensiomètres ou les enlever des champs (Hanson et Orloff, 2007).

Dans les champs de canneberges, le tensiomètre est un instrument indispensable pour mesurer le potentiel matriciel. On recommande de commencer l'irrigation une fois que le potentiel matriciel du sol atteint - 6,5 kPa et de l'interrompre à - 4 kPa, quelque soit le type de sol (Bonin, 2008). Malgré cette information fournie par le tensiomètre, les ingénieurs agricoles persistent à dire que les mesures obtenues demeurent insuffisantes puisque les chercheurs dans le domaine de l'irrigation des champs de canneberges rencontrent souvent des difficultés liées à la gestion d'eau (Bonin, 2010).

2.2. Modélisation

2.2.1. Importance de la modélisation

La modélisation numérique joue un rôle primordial dans les études de gestion de l'eau. Tout en épargnant argent et temps, la modélisation est un outil pour résoudre tout problème relié à la gestion de l'eau. La modélisation peut permettre de comprendre le processus hydraulique survenant dans les champs (Gumière, 2009). Son but est d'aider à prendre les décisions relatives à la gestion d'eau ainsi que de faire des prévisions et des planifications dans les cas de sécheresse et/ou de manque d'eau (Daniell, 2008). La modélisation est un moyen performant pour résoudre les problèmes de la physique du sol (Zhang, 2011). Le programme HYDRUS-1D, basé sur l'équation de Richards, est le modèle utilisé dans cette étude de gestion de l'irrigation des canneberges.

2.2.2. Équation de Richards

Dans les années 1930, Richards a utilisé l'équation de Darcy pour représenter les comportements des milieux non saturés (Richard 1931). Quant à l'équation (1) de Richards (1981), elle comporte des dérivés partiels non-linéaires (Horton et Hawkins, 1965). L'équation de Richards (1981) se résout surtout par des méthodes numériques (Sylvain Weill, 2007). Depuis le début des années 1970, un grand nombre de travaux ont été réalisés à partir des méthodes des différences finies, des éléments finis (Neuman, 1973) et des éléments finis mixtes hybrides (Mosé et al., 1994).

L'équation de Richards (1931), sous forme unidimensionnelle en conditions saturées ou partiellement saturées, et en ajoutant le terme d'extraction racinaire ou de puits (S), se traduit comme suit :

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[k(\theta) \left(\frac{\partial \varphi}{\partial z} + 1 \right) \right] - S \quad (1)$$

où θ est la teneur en eau ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$), t est le temps (heure), φ est le potentiel matriciel (cm), z est la coordonnée spatiale verticale (positive à partir du bas vers le haut dans le programme HYDRUS-1D) (cm), S est le terme d'extraction ou d'injection (h^{-1}) et K est la conductivité hydraulique (cm/h).

Richards (1931) a posé des hypothèses, dont celles de la négligence de l'effet de la phase d'air et de la validité de l'équation de Darcy, en vue de faciliter l'application de son équation. L'équation de Richards (1931) est résolue par le programme HYDRUS-1D (Simunek et al, 2009)). Le modèle hydraulique de HYDRUS-1D néglige le potentiel osmotique. De plus, des recherches ont été réalisées avec l'équation de Richards (1931) pour intégrer le phénomène d'hystérèse dans la fonction de rétention de l'eau et de la fonction de la conductivité hydraulique (Simunek, 2005). La non-linéarité de la fonction hydraulique (Majdoub, 2000) et la faible précision des méthodes de mesure des propriétés hydrauliques ont été notées par Van Genuchten (1997).

2.2.3. HYDRUS-1D : Application à l'agriculture

L'équation de Richards (1931) sur la dynamique de l'eau dans le sol décrit des conditions d'écoulement transitoires ou permanentes. La figure 1 montre que l'eau peut

pénétrer dans le sol, soit sous forme de précipitation ou d'irrigation. L'eau de pluie et d'irrigation peut être absorbée par le couvert végétal. Il peut y avoir ruissellement si le taux d'infiltration est plus faible que celui de précipitation et irrigation. Une partie de l'eau infiltrée retourne à l'atmosphère par évaporation (Simunek et Radcliffe, 2009), alors que l'autre sera absorbée par les racines des plantes. En général, les deux phénomènes de transpiration et d'évaporation sont combinés à un seul processus que l'on nomme évapotranspiration. La percolation sous la zone des racines peut recharger la nappe phréatique et la remontée capillaire peut alimenter en eau la zone racinaire. HYDRUS-1D peut être utilisé pour déterminer la quantité d'eau nécessaire à l'irrigation et pour calculer l'absorption racinaire. Pour cette dernière, le modèle de FEDDES, 1978 est utilisé, alors que l'évapotranspiration de référence est calculée avec l'équation de Penman-Monteith (Simunek et Radcliffe, 2009).

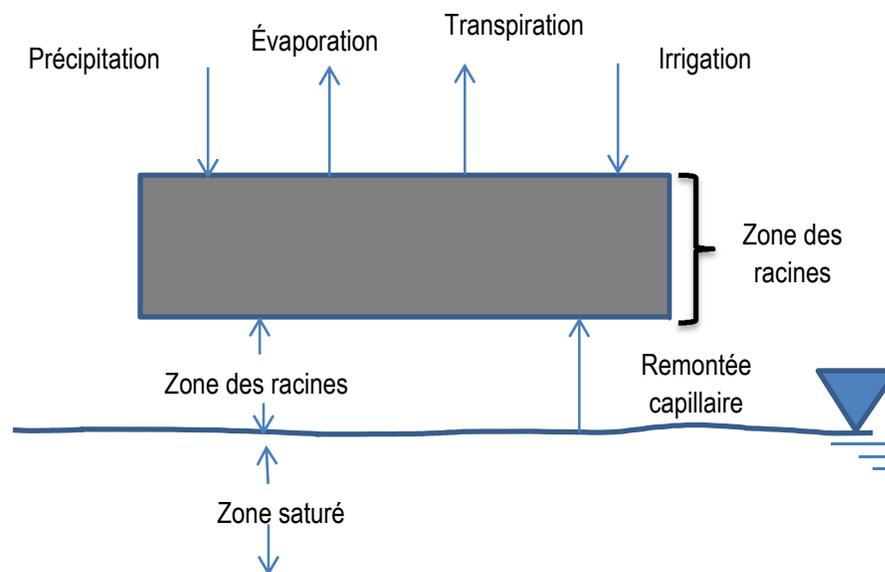


Figure 1. Application d'HYDRUS-1D dans le domaine d'agriculture

2.2.4. Extraction de l'eau par les racines

Le modèle de l'absorption racinaire doit permettre les variations spatiales, résultant des profondeurs d'irrigation variables et de la variation de l'absorption d'eau selon la profondeur. Dans cette étude, HYDRUS-1D est utilisé avec le modèle de Feddes (Feddes et al., 1978) pour l'extraction de l'eau par les racines :

$$S(h) = \alpha(h)S_p \quad (2)$$

où le terme S est la fonction de l'extraction de l'eau, h est le potentiel matriciel et $\alpha(h)$ est la fonction du potentiel d'extraction adimensionnel, comprise entre 0 et 1 (Tylor et Ashcroft 1972) et S_p est le taux d'absorption du potentiel de l'eau

Dans cette étude, la densité du profil racinaire est répartie de deux façons, soit 1) une distribution uniforme où le prélèvement racinaire est le même sur toute la profondeur du profil racinaire, et 2) une distribution linéaire où le prélèvement racinaire augmente avec la profondeur car la nappe phréatique est peu profonde et la remontée capillaire pourrait fournir de l'eau en plus grande abondance en bas de la zone racine, voir la figure 2.

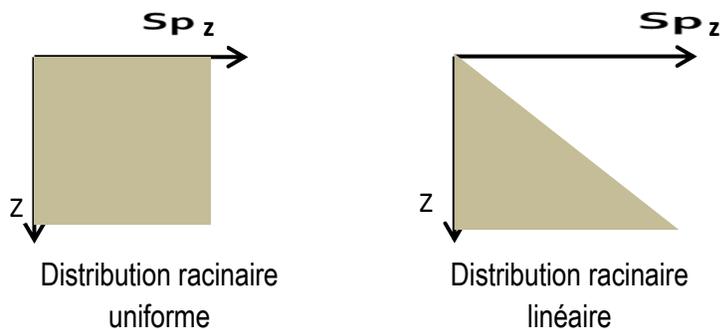


Figure 2. Distribution de la densité racinaire uniforme et linéaire

La figure 3 décrit la variation d' α en fonction du potentiel matriciel, h . L'extraction racinaire est nulle en cas de saturation du sol en raison du manque d'oxygène dans la zone racinaire (potentiel matriciel plus grand que h_1). Quant au potentiel matriciel du sol inférieur à h_4 (point de flétrissement de sol), l'extraction est égale à 0. L'absorption racinaire est optimale entre les potentiels matriciels du sol de h_2 et h_3 . Le potentiel matriciel h_3 peut être ajusté suivant le taux de transpiration. L'absorption racinaire de l'eau augmente davantage lorsque le taux de transpiration est faible.

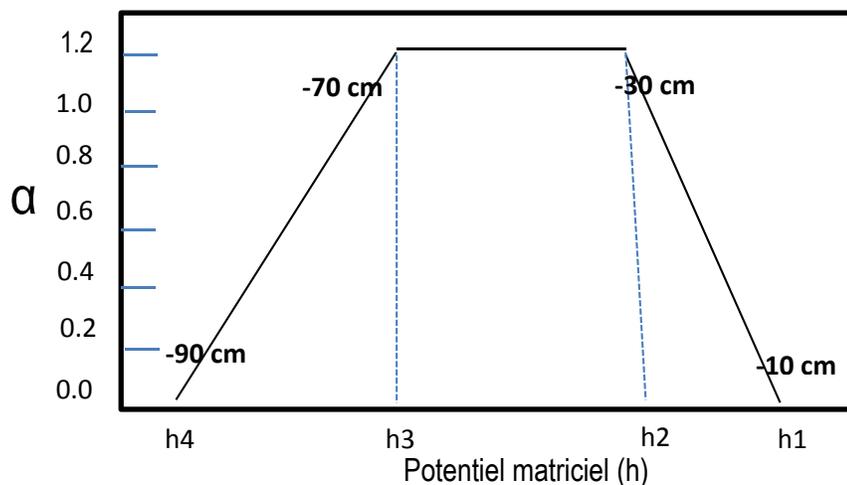


Figure 3. Extraction d'eau racinaire selon le modèle de Feddes (simunek, 2010)

2.2.5. Hystérèse

L'hystérèse est une relation non unique entre la teneur en eau et le potentiel matriciel qui dépend de l'humidification et de l'assèchement. L'hystérèse peut influencer considérablement l'écoulement de l'eau et le transport du soluté dans des milieux saturés et poreux (Jaynes, 1992). Ce phénomène s'observe aussi bien en laboratoire que sur le terrain

(Gilham et al., 1979). Bien que la pertinence de l'hystérèse ait été démontrée dans plusieurs études numériques, elle a souvent été négligée en raison d'un manque de données (Simunek et al., 1999). L'hystérèse fait référence à une relation commune entre le potentiel matriciel (φ) et la teneur en eau volumique (θ) (Lagacé, 2010). Cette relation hystérétique exprime une variation non-unique de teneur en eau pour une valeur fixe du potentiel matriciel. La figure 4 montre un exemple de courbe d'hystérèse.

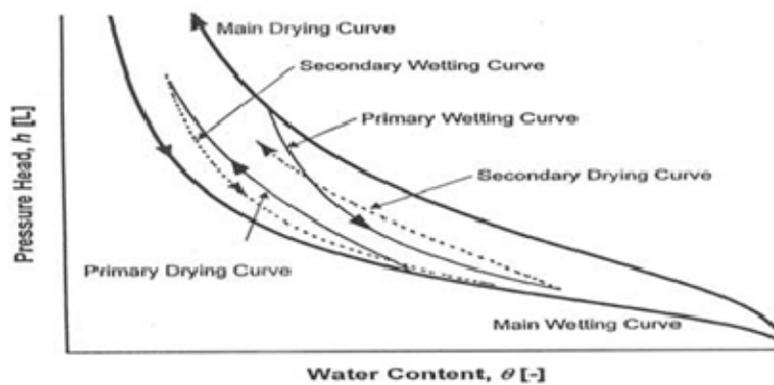


Figure 4. Courbes du phénomène d'hystérèse (Simunek, 2009)

2.3. Équation de Van Genuchten

2.3.1. Utilisation

Plusieurs modèles empiriques ont été développés, entre autres ceux de Van Genuchten, pour décrire les propriétés hydrauliques du sol, en particulier la courbe de rétention d'eau et celle de la conductivité hydraulique non saturée (Van Genuchten, 1988). Le modèle de Van Genuchten propose un modèle empirique pour la courbe de rétention d'eau, supposant une forme plus ou moins sigmoïdale (voir la figure 5) incluant six paramètres de forme : $\alpha, n, m, \theta_r, \theta_s$ et ℓ . Pour estimer les paramètres du modèle de Van Genuchten et ceux de la courbe de

rétenion, il existe des logiciels spécifiques tels que Rosetta (RETC) (Van Genuchten et al, 1991) et HYDRUS-1D, programmes conçus pour faire l'ajustement à la courbe de rétenion d'eau du sol. Parmi les paramètres qui sont calculés directement par le programme RETC, et en choisissant $m=1-1/n$, cinq d'entre eux seront optimisés, soit n , α , θ_r , θ_s et ℓ . Toutefois, RETC semble surestimé (Chanbarian et al., 2010).

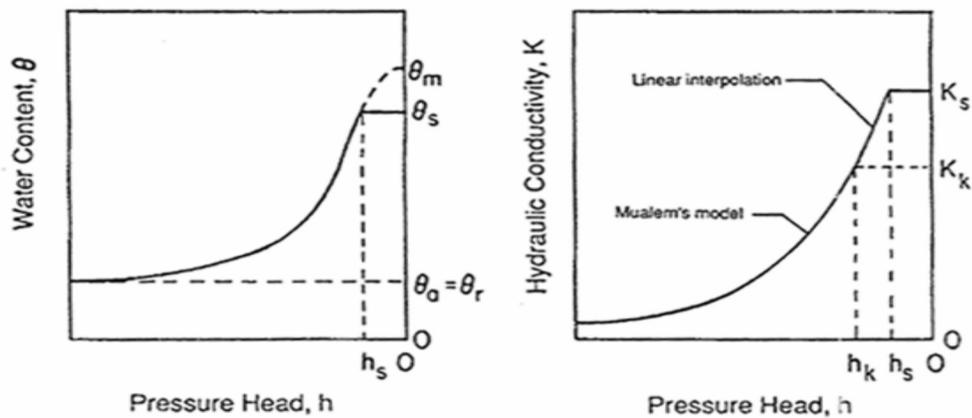


Figure 5. Courbe de rétenion d'eau (a) : $\theta(h)$, où θ est la teneur en eau ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), θ_r est teneur en eau résiduelle, θ_m est la teneur en eau dans la région immobile, h_s est la valeur de l'air piégé, et la courbe de la fonction hydraulique (b) : $k(h)$, où k_s est la conductivité hydraulique saturée, k_k conductivité hydraulique mesurée

2.3.2. Paramètres de l'équation de Van Genuchten

Les paramètres α , n et ℓ dans le programme HYDRUS-1D sont considérés comme des coefficients empiriques affectant la forme de la fonction hydraulique. Le programme HYDRUS-1D applique les fonctions hydrauliques de sol de Van Genuchten (1980) en utilisant le modèle de distribution statique de Mualem (1976) afin d'obtenir une équation qui simplifie la fonction de conductivité hydraulique non saturée (Simunek et al., 2009).

Le modèle de Van Genuchten (1980) a la forme suivante :

$$\theta(h) = \begin{cases} \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + |\alpha h|^n]^m} & h < 0 \\ \theta_s & h \geq 0 \end{cases} \quad (3a)$$

$$K(h) = K_s S_e^l \left[1 - \left(1 - S_e^{1/n} \right)^m \right]^2 \quad (3c)$$

$$\text{où } m = 1 - 1/n \quad n > 1 \quad (3d)$$

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (3e)$$

où θ est la teneur en eau ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), θ_r est la teneur en eau résiduelle ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), θ_s est la teneur en eau saturée ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), K_s est la conductivité hydraulique saturée (cm/h), h est le potentiel matriciel (cm), α est l'inverse de la valeur de la charge capillaire critique (cm^{-1}), n est le facteur de distribution de taille des pores, l est le paramètre de connectivité, S_e est la saturation effective.

2.4. Optimisation des paramètres

2.4.1. Utilité

L'optimisation des paramètres est une méthode indirecte pour obtenir l'estimation des paramètres de l'écoulement d'eau et/ou des paramètres de transport de soluté à partir du flux transitoire aux données de transport (Kool, 1989). Les méthodes inverses sont basées sur la minimisation d'une fonction objective appropriée (Russo, 1991). La fonction objective exprime la différence entre les valeurs du potentiel observées et simulées.

À partir de recherches réalisées par Skarupa (1999), les propriétés hydrauliques de sol sont décrites à partir d'un modèle analytique avec des valeurs de paramètres inconnus (Simunek, 1996). La sélection des paramètres et la fixation des conditions initiales et des conditions aux limites appropriées fournissent une réponse au système représenté par un modèle numérique de l'équation du flux et par des fonctions hydrauliques paramétrées (Van Dam, 1994). Les estimations initiales des paramètres du système optimisé sont itérativement améliorées au cours du processus de minimisation de la fonction objective jusqu'à ce que le degré désirable de précision soit obtenu (Van Genuchten, 1981; Toride et al. 1995).

L'estimation des paramètres de Van Genuchten a été faite premièrement en laboratoire et, par la suite, ces valeurs ont été prises comme valeurs initiales pour l'optimisation avec la méthode inverse. PEST est un des programmes utilisés pour estimer les paramètres hydrauliques à partir de la méthode inverse (Doherty, 2005).

2.4.2. Calibration

Le modèle de calibration est le processus d'ajustement d'un modèle pour des problèmes spécifiques par l'interprétation des paramètres d'entrées et des conditions limites et initiales au cours d'une simulation numérique (Elsheikh, 2013). Pour garantir la convergence de la solution numérique et avoir une erreur faible, les deux paramètres les plus sensibles ont été calibrés manuellement, soit la conductivité hydraulique saturée et la teneur en eau saturée (Yang et al. 2003). S'ils sont bien calibrés, on obtient un modèle avec des résultats précis. L'équation de Van Genuchten est définie principalement par la courbe de rétention d'eau $\theta(h)$ (Simunek, 2010). D'autres paramètres tels α et n , peuvent être estimés en laboratoire pour définir la forme du modèle (Maier, 2009). Dans cette étude, l'objectif principal de la calibration est d'optimiser les paramètres hydrauliques. Le processus de vérification d'un modèle se divise normalement en deux phases : calibration et validation. Ce projet ne concerne que la calibration puisque seulement vingt-huit jours de données mesurées sont disponibles.

2.4.3. Méthode inverse

L'optimisation est faite par la méthode inverse qui consiste à fixer une valeur initiale aux paramètres, et à exécuter HYDRUS-1D de façon itérative en modifiant les paramètres de l'équation de Van Genuchten pour minimiser l'écart entre les potentiels matriciels de sorties mesurées et simulées (potentiel matriciel). Dans le cadre de ce mémoire, deux types de

méthodes inverses ont été utilisées (1) la méthode interne à HYDRUS-1D et (2) la méthode externe utilisant le programme PEST. Pour utiliser la méthode inverse, il est nécessaire de choisir une fonction objective basée sur un estimateur de probabilité. Selon Simunek et al (2006), la fonction objective d'HYDRUS-1D est définie comme suit :

$$\begin{aligned} \phi(b, q, p) = & \sum_{j=1}^{m_q} v_j \sum_{i=1}^{n_{qj}} w_{i,j} [q_j^*(x, t_i) - q_j(x, t_i, b)]^2 + \\ & \sum_{j=1}^{m_p} \bar{v}_j \sum_{i=1}^{n_{pj}} \bar{w}_{i,j} [p_j^*(\theta_i) - p_j(\theta_i, b)]^2 \\ & + \sum_{j=1}^{m_b} \hat{v}_j [b_j^* - b_j]^2 \end{aligned} \quad (4)$$

où le premier terme à droite représente la déviation entre les variables calculées et mesurées comme le potentiel matriciel. Dans le premier terme, m_q est le nombre d'ensembles différents de mesures, n_{qj} est le nombre de mesures dans un ensemble de mesures particulier, $q_j^*(x, t_i)$ représente les mesures spécifiques à un temps t_i pour un ensemble de $j^{\text{ème}}$ mesuré à $x(r, z)$, $q_j(x, t_i, b)$ qui sont les prédictions de modèle correspondant au vecteur des paramètres optimisés b (e.g., θ_r , θ_s , α , n , K_s , D_i , kg, k , ...) et v_j et w_{ij} sont les poids associés à un ensemble de mesure particulier. Le deuxième terme dans l'équation (4) représente les différences entre les propriétés hydrauliques mesurées et prédites. Le dernier terme représente la fonction de pénalité des déviations entre les connaissances préalables des paramètres hydrauliques de sol.

La méthode inverse de PEST a pour objectif de minimiser la somme des différences au carré entre les valeurs observées et celles mesurées. Pour PEST la fonction objective est définie comme suit (Doherty, 2005) :

$$\emptyset = (c - Xb)^t Q (c - Xb) \quad (5)$$

où Q est la matrice diagonale, c représente les données simulées ou mesurées, b est un vecteur qui vise à minimiser la fonction objective, X est une matrice (m x n) où m est le nombre de rangées et n est le nombre de colonnes, t est l'exposant d'une opération de transposée de matrice.

Chapitre 3 : Hypothèse et objectifs

3.1. Hypothèse

Les méthodes inverses d'HYDRUS-1D et de PEST permettent d'optimiser les paramètres hydrauliques de l'équation de Van Genuchten de manière à minimiser la différence entre les potentiels matriciels observés et simulés.

3.2. Objectifs

3.2.1. Objectif principal

- Optimiser les paramètres de l'équation de Van Genuchten à partir des données du potentiel matriciel mesurées dans un champ de canneberges sur un sol sableux

3.2.2. Objectifs spécifiques

- Utiliser deux méthodes inverses pour l'optimisation :
 - i : méthode interne d'HYDRUS-1D
 - ii : méthode externe PEST
- Évaluer l'effet de la fonction de l'extraction de l'eau par les racines sur la qualité de l'optimisation
- Vérifier l'effet de 1) la densité racinaire, 2) l'hystérèse et 3) la profondeur du tensiomètre

Chapitre 4 : Matériels et méthodes

4.1. Description du site expérimental

L'étude porte sur un champ de canneberges de type biologique, codé champ D8, à une latitude de $46^{\circ}16'50''N$ et une longitude de $72^{\circ}1'31''W$. Le champ d'étude D8 se trouve à 18 km au nord-ouest de Princeville et 16 km au sud-est de Sainte-Marie-de-Blandford près de l'autoroute 20 (figures 6 et 7). Ce champ expérimental est constitué d'un sol sableux dont trois points d'observation ont été choisis, soit le 26 à mi-écartement entre deux drains, le 27 à $\frac{1}{4}$ d'écartement et le 28 à 15 cm du drain souterrain (figure 8).

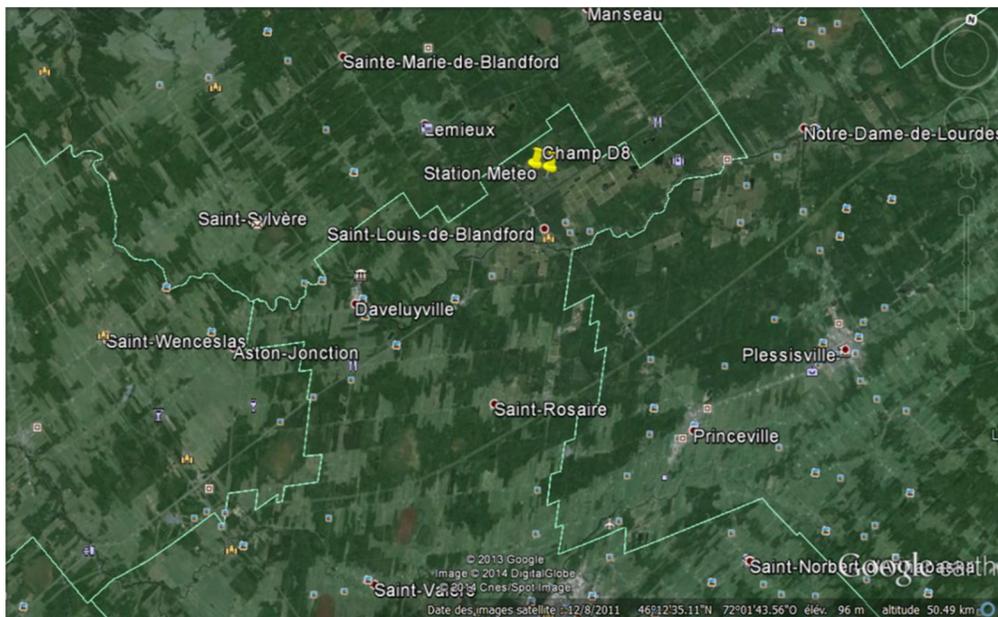


Figure 6. Localisation du champ D8 (Gumière, 2012)



Figure 7. Champs D8 sur le site 1 (Gumière, 2012)

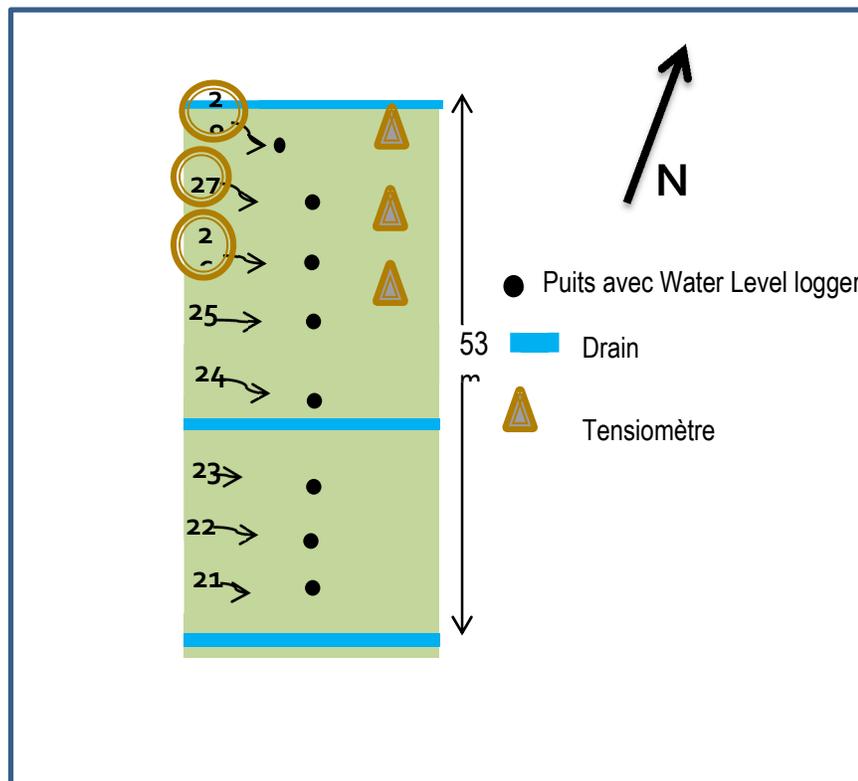


Figure 8. Section du champ D8 illustrant la disposition du puits des drains et des tensiomètres (Gumière, 2012)

4.2. Données expérimentales

4.2.1. Données météorologiques

Les données d'évapotranspiration de référence et de précipitation ont été obtenues pour la station Lemieux. L'évapotranspiration a été calculée selon l'équation de Penman-Monteith (Gumière, 2012). La durée de l'irrigation a été de 3 heures par jour, ce qui équivaut à un débit de 4mm/h (Gumière, 2012). Les figures 9 et 10 représentent les données d'évapotranspiration et de précipitation pour la période de mesure du 5 juillet au 26 juillet 2012.

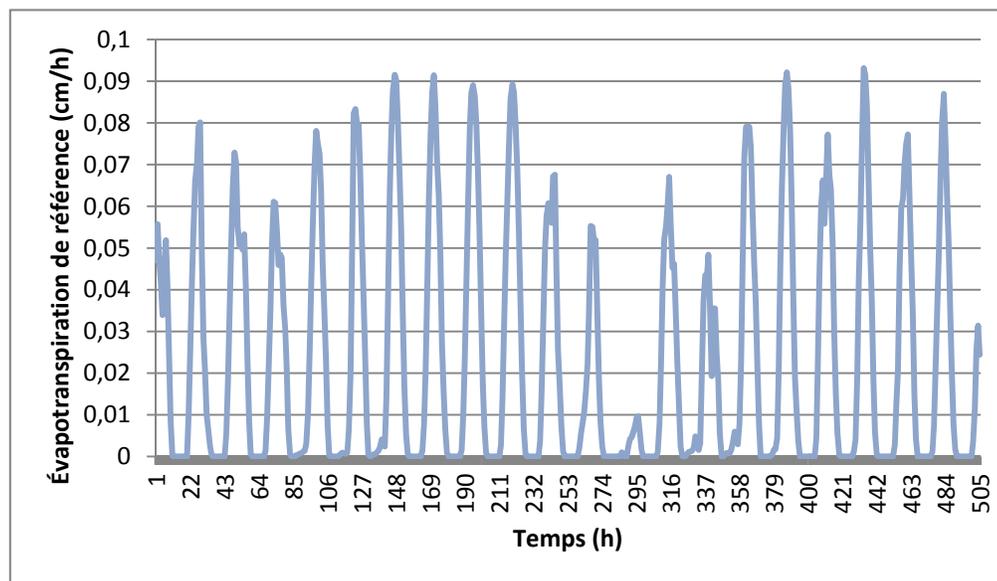


Figure 9. Graphique d'évapotranspiration (ET₀) en cm/h

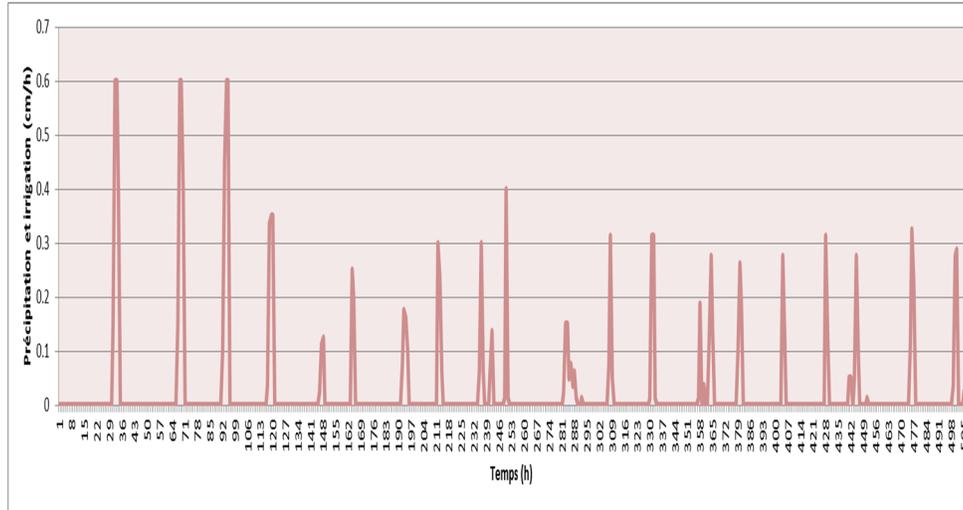


Figure 10. Données de précipitation et d'irrigation (Pte et Irrg)

4.2.2. Potentiel matriciel et niveau de nappe

Un tensiomètre a été installé au niveau des racines des canneberges à 10 cm de profondeur pour mesurer les potentiels matriciels aux points de mesures 26, 27 et 28 (Gumière, 2012). Le niveau de l'eau de la nappe phréatique est mesuré dans des puits installés dans le champ D8 (Gumière, 2012). Les figures 11 et 12 représentent les données des potentiels matriciels mesurés et les variations du niveau de la nappe des points de mesures 26, 27 et 28.

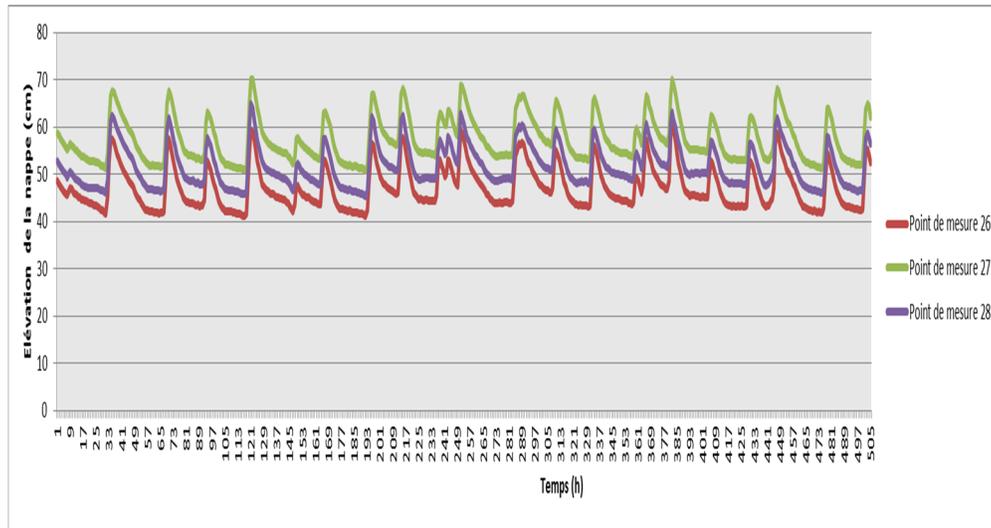


Figure 11. Variation du niveau de la nappe des trois points 26, 27 et 28

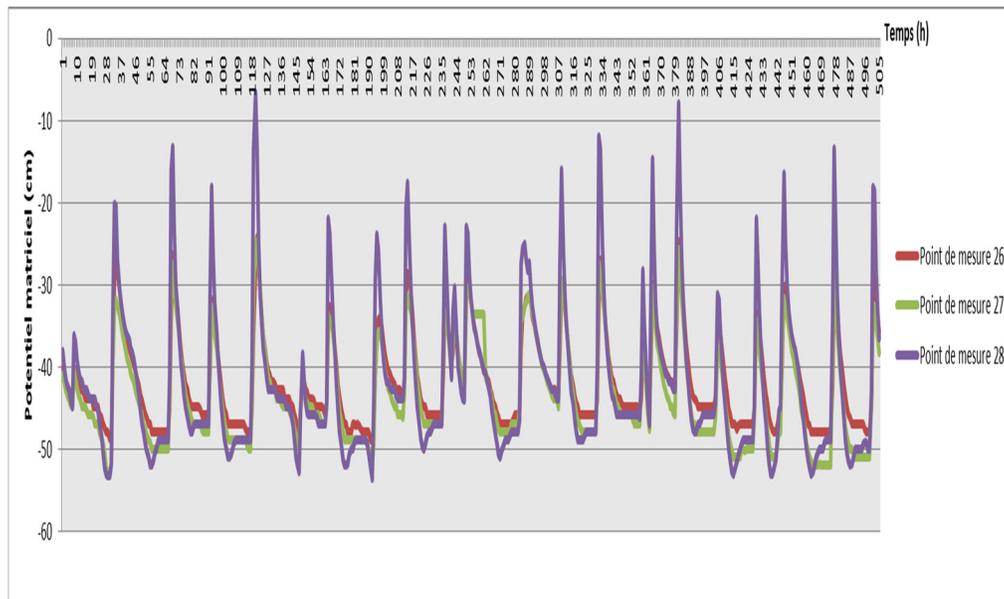


Figure 12. Potentiel matriciel des trois points 26, 27 et 28

4.2.3. Caractéristiques hydrauliques du sol

L'expérience de l'estimation des paramètres hydrauliques a été réalisée en laboratoire (Gumière, 2012) à partir d'échantillons d'un sol sableux. Les valeurs des paramètres ont été calculées sur des cylindres de sol intacts à trois différents niveaux de profondeurs (40, 60 et 90 cm). Ces résultats se trouvent dans le tableau 1.

Tableau 1. Paramètres hydrauliques estimés au laboratoire

Profondeur de l'échantillon (cm)	θ_r (cm ³ cm ⁻³)	θ_s (cm ³ cm ⁻³)	α (cm ⁻¹)	n	Ks (cm/h)	ℓ
40	2,25E-02	4,43E-01	2,60E-02	2,61E+00	3,00E-01	0,5
60	6,21E-02	4,60E-01	4,40E-02	2,41E+00	1,62E+00	0,5
90	1,92E-05	3,62E-01	2,04E-02	3,69E+00	7,11E-02	0,5

4.3. Modélisation du potentiel matriciel

4.3.1. Conditions initiales

Les conditions initiales du potentiel de pression ont été définies dans HYDRUS-1D. Dans cette étude, le profil initial de tension correspond à un profil linéaire. La figure 13 montre les conditions initiales pour chacun des nœuds. La première condition initiale est fixée au point mesuré à 10 cm de profondeur et la seconde condition initiale correspond à la position de la nappe à la surface du sol. Le potentiel de pression a été obtenu par extrapolation des deux premiers points.

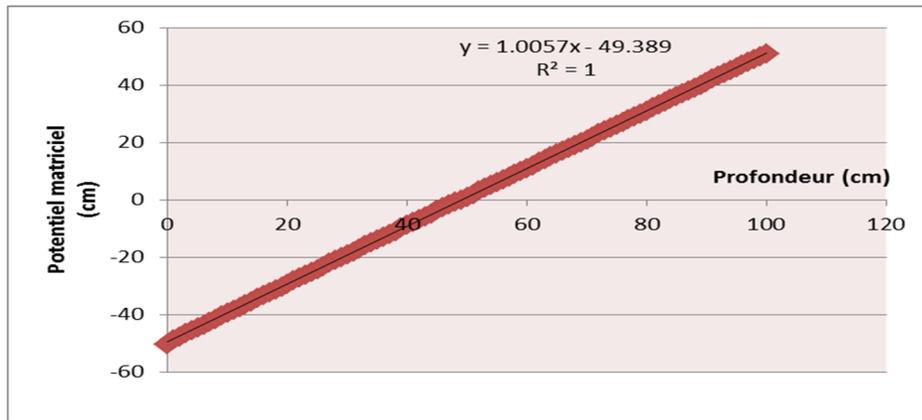


Figure 13. Distribution du profil du potentiel de pression au point de mesure 26

4.3.2. Conditions aux limites

La condition aux limites supérieures imposée au profil de sol est d'ordre atmosphérique (évapotranspiration, précipitation et absorption racinaire) alors que la condition aux limites inférieures correspond à l'élévation de la nappe.

4.3.3. Fonctionnement du logiciel HYDRUS-1D

Le programme HYDRUS-1D solutionne l'équation de Richards (1931) pour simuler l'écoulement d'eau unidimensionnel (Simunek et al. 2010). Pour ce faire, on a besoin des variables suivantes :

- paramètres hydrauliques : conductivité hydraulique saturée K_{sat} , la teneur en eau saturée θ_s , α et n
- données atmosphériques : évaporation, transpiration et précipitation
- données de potentiels matriciels et de niveau de la nappe.

Les paramètres hydrauliques définissent l'équation de Van Genuchten, nécessaire par la fonction de rétention de l'eau et de conductivité hydraulique. Le programme HYDRUS-1D comporte un gestionnaire de projets et des modules de pré et de post-traitement. Le tableau 2 décrit les caractéristiques du modèle que nous avons défini pour HYDRUS-1D.

Tableau 2. Caractéristiques définissant le module d'HYDRUS-1D

Paramètres	Unité	Description	Valeur
Profondeur	cm	Profondeur de profil de sol	100
Temps	h	Temps de simulation	505
Δt	h	Incrément de temps	1
Nœuds	cm	Incrément d'espace	101 nœuds
θ_s	$\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$	Teneur en eau saturée	0,043
θ_r	$\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$	Teneur en eau résiduelle	0,025
K_s	cm h^{-1}	Conductivité hydraulique saturée	0,3
n	-	Paramètre de forme du modèle	1,261
ℓ	-	Connectivité des pores	0,5
α	-	Paramètre de forme du modèle	0.025

4.3.4. Paramètres hydrauliques

Le nombre de paramètres hydrauliques à optimiser peut varier de 4 à 8 dans le but d'éviter toute corrélation entre les paramètres (Vandam ,2000). Cette recherche comporte deux types de paramètres à optimiser : mesurés (K_s , θ_s) et empiriques (α , n). Les paramètres mesurés influencent le plus les résultats d'optimisation (Refsgaard et al, 1996). Les paramètres empiriques α et n sont des facteurs de forme du modèle. En ce qui a trait à cette recherche, quatre paramètres ont été optimisés, K_s , θ_s , α et n , puisqu'ils sont les plus importants dans le processus de calibration (Dubach et al, 2011). Selon Mayer (1999), les quatres paramètres de Van Genuchten que nous avons utilisés sur un sol sableux possèdent des limites inférieures et supérieures tel que démontré dans le tableau 3. Le paramètre l a été estimé par Mualem (1976) à 0,5 et a été testé sur plusieurs types de sol par Vereecken et al (2010). En ce qui concerne la teneur en eau résiduelle, il n'est pas nécessaire de l'optimiser parce qu'elle est considérée comme la valeur la moins importante sur la calibration (Mertens et al. 2006).

Tableau 3. Limites supérieures et inférieures des paramètres hydrauliques retenues pour notre étude (Mayer, 1999)

Paramètres hydrauliques de l'équation de Van Genuchten	limite inférieure	limite supérieure
- teneur en eau saturée $\theta_s \text{ cm}^3\text{cm}^{-3}$	0,245	0,615
- VG facteur de forme de modèle $\alpha, \text{ cm}^{-1}$	0,0687	0,226
- VG facteur de forme de modèle n	1,95	3,62
- conductivité hydraulique saturée $K_s \text{ cmh}^{-1}$	1,26	66.96

VG : paramètres de Van Genuchten

4.3.5. Hystérèse

L'option choisie de la fonction d'hystérèse est celle sans injection. Initialement pour les trois points 26, 27 et 28, le sol est initialement sec et on sélectionne la courbe correspondante.

4.3.6. Profondeur des mesures

Initialement, la profondeur du tensiomètre a été fixée à 10 cm sous la surface du sol pour les points de mesures 26, 27 et 28. Étant donné la probabilité d'erreur sur l'estimation de cette profondeur, les profondeurs suivantes ont aussi été utilisées : 7, 8, 12 et 13 cm.

4.3.7 Fonctionnement de PEST

PEST est un optimisateur externe qui peut être utilisé avec différents modules : l'écoulement d'eau, flux d'électricité, croissance des plantes, croissance démographique et autre (Dohrety, 2005).

Trois fichiers sont nécessaires pour l'exécution de PEST : "nom.tpl" (fichier gabarit), "nom.ins" (fichier directives) et "nom.pst" (fichier contrôle) où "nom" représente n'importe quel nom pour une simulation donnée. Les résultats obtenus par PEST se trouvent sous forme de tableaux où apparaissent les paramètres optimisés, les données simulées, la valeur minimale de la fonction objective et le coefficient de détermination R^2 . On trouve ces calculs dans le fichier "nom.rec". Le diagramme d'écoulement pour HYDRUS-1D et PEST est illustré aux annexes II, III et IV.

4.4. Optimisation des paramètres hydrauliques

4.4.1. Procédures suivies

Les procédures suivies par l'optimisation se divisent en deux parties : une optimisation à l'aide d'une grille déterminée manuellement et une optimisation à l'aide de la méthode inverse (optimisateur interne HYDRUS-1D ou optimisateur externe PEST).

La procédure d'optimisation manuelle comprend les étapes suivantes :

- a) choisir trois valeurs pour chacun des quatre paramètres hydrauliques (tableau 4) ;
- b) générer toutes les combinaisons possibles à partir de ces valeurs ($3^4 = 81$);

- c) exécuter HYDRUS-1D en mode direct;
- d) comparer les potentiels mesurés et simulés pour calculer RMSE et R² ;
- e) sélectionner la meilleure combinaison, minimisant RMSE et maximisant R²

Tableau 4. Grille des paramètres de Van Genuchten

Paramètres	θs(cm ³ cm ⁻³)	Ks(cm/h)	α (cm ⁻¹)	n
A1	0.443	1	0.0225	2.61
B2	0.3	0.1	0.125	0.261
C3	0.6	1000	0.225	20

A1, B2 et C3 – les trois valeurs choisies pour chacun des quatre paramètres

La marche à suivre pour la méthode inverse est différente selon le programme utilisé que ce soit l'optimisation interne (HYDRUS-1D) ou externe (PEST). D'un point de vue mathématique, PEST offre plus d'options au cours de l'optimisation alors qu'HYDRUS-1D est plus limité (Rivera Villarreyes et al, 2012). PEST n'effectue pas de vérifications poussées des fichier d'entrées (Dohrety, 2005). Par contre, le programme HYDRUS-1D fait un contrôle détaillé et global qui permet d'obtenir un message d'erreur plus précis (Skaggs et al., 2004).

4.4.2. Critères statistiques

Les critères statistiques utilisés dans cette étude sont les suivants :

- a) RMSE est l'erreur quadratique moyenne entre les valeurs mesurées et simulées.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_1^N ((\psi_{ps} - \psi_{pm})^2)}{N}}$$

où ψ_{ps} est le potentiel matriciel simulé, ψ_{pm} est le potentiel matriciel mesuré (cm/h) et N est le nombre total des données mesurées.

b) EAM est l'erreur absolue moyenne. Elle mesure la précision (Steele, 1997).

$$EAM = \frac{\sum_1^N |(\psi_{ps} - \psi_{pm})|}{N} \quad (7)$$

où ψ_{ps} est le potentiel matriciel simulé, ψ_{pm} est le potentiel matriciel et N est le nombre total des données mesurées.

Ces deux critères statistiques EAM et RMSE sont généralement utilisés ensemble pour diagnostiquer l'erreur au cours d'une modélisation. Le RMSE est toujours supérieur à EAM. Plus la différence est importante entre les deux, plus la variance dans les erreurs individuelles de l'échantillon est élevée. Ces deux critères statistiques varient entre 0 et ∞ et plus les valeurs sont faibles, plus les résultats obtenus sont satisfaisants (Zamyadi, 2007)

c) DM est la différence moyenne entre les valeurs mesurées et simulées et représente le biais.

$$DM = \frac{\sum_1^N (\psi_{ps} - \psi_{pm})}{N} \quad (8)$$

où ψ_{ps} est le potentiel matriciel simulé, ψ_{pm} est le potentiel matriciel et N est le nombre total des données mesurées

d) Le coefficient de détermination R^2 détermine la corrélation entre les valeurs mesurées et simulées (Xu Yang and Xueyi You, 2013).

$$R^2 = \frac{SCE}{SCT} = 1 - \frac{SCR}{SCT} \quad (10)$$

où SCE et SCT sont les sommes carrées expliquées et totales. Plus R^2 est proche de 1, plus les résultats sont meilleurs (Xu Yang and Xueyi You, 2013).

Chapitre 5 : Résultats

5.1. Simulations initiales

Les valeurs des paramètres hydrauliques K_s , θ_s , α et n estimées initialement ont été optimisées à l'aide de la méthode inverse d'HYDRUS-1D. Les tableaux 5 et 6 présentent un résumé des résultats d'optimisation et des critères statistiques pour les points de mesure 26, 27 et 28.

Tableau 5. Résultats d'optimisation initiale de points de mesures 26, 27 et 28

sans tenir compte des limites de Mayer (1999)

Points de mesures	PT	DR	Θ_s ($\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$)	α (cm^{-1})	n	Ks (cmh^{-1})	RMSE (cm)	R ²	DM (cm)	EAM (cm)
26	(10)	Uniforme	0,055	0,022	6,84	5,79	21,34	0,94	-0,94	1,21
		Linéaire	0,012	0,001	5,86	6,77	14,97	0,95	-0,66	1,07
27	(10)	Uniforme	0,1	0,067	2,21	7,57	164,2 5	0,75	7,3	8,27
		Linéaire	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC
28	(10)	Uniforme	0,12	0,04	1,66	4,42	49,45	0,77	2,2	3,94
		Linéaire	0,15	0,059	1,46	12,8	52,76	0,77	2,34	3,98

NC : ne converge pas, DR : distribution racinaire, PT : profondeur de tensiomètre (cm)

Tableau 6. Résultats d'optimisation initiale de points de mesures 26, 27 et 28

en tenant compte des limites de Mayer, 1999

Points de mesures	PT	DR	Θ_s ($\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$)	α (cm^{-1})	n	Ks (cmh^{-1})	RMSE (cm)	R ²	DM (cm)	EAM (cm)
26	(10)	Uniforme	0,26	0,068	2,96	2,87	17,39	0,82	-0,77	1,5
		Linéaire	0,615	0,066	1,95	6,77	14,95	0,95	-0,66	1,08
27	(10)	Uniforme	0,61	0,06	1,95	8,5	283,83	0,7	10,62	10,62
		Linéaire	0,59	0,06	3,62	8,47	241	0,72	10,72	10,72
28	(10)	Uniforme	0,56	0,06	1,95	4,34	62,24	0,77	2,76	4,11
		Linéaire	0,27	0,0687	1,98	3,18	67,63	0,78	4,22	3

NC : ne converge pas, DR : distribution racinaire, PT : profondeur du tensiomètre (cm)

La figure 15 représente les résultats du potentiel matriciel mesuré et simulé en fonction du temps pour le point de mesure 26 à 10 cm de profondeur avec des distributions racinaires uniforme et linéaire avec et sans les limites de Mayer (1999).

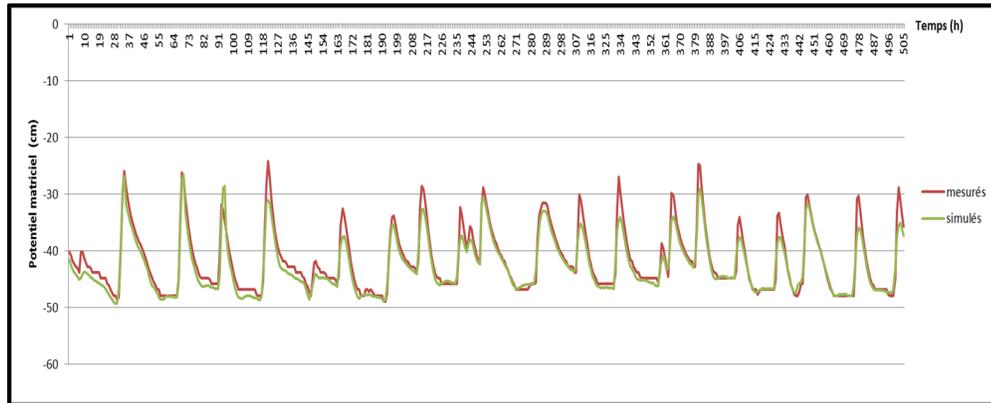


Figure 14. Potentiel matriciel mesuré et simulé en fonction du temps avec des distributions racinaires uniforme et linéaire à 10 cm de profondeur pour le point de mesure 26 sans et avec les limites de Mayer (1999)

Sur le plan visuel, la figure 14 n'indique pas une différence marquée avec et sans les limites de Mayer (1999). Toutefois dans le tableau 5, les paramètres optimisés par HYDRUS-1D indiquent que les paramètres θ_s, α et n ont toujours des valeurs inférieures aux limites suggérées par Mayer (1999). Par exemple, la teneur en eau saturée avec la distribution uniforme est de 0,055 pour le point de mesure 26 alors que la limite inférieure suggérée par Mayer (1999) est de 0,24 (voir tableau 3). Au tableau 6, les paramètres optimisés par HYDRUS-1D indiquent que les résultats respectent les limites inférieures et supérieures par Mayer (1999). Ainsi, selon ce tableau la teneur en eau saturée est de 0,26 pour la distribution uniforme et de 0,615 pour la distribution linéaire.

Pour le site 26, les critères statistiques sont similaires lorsqu'on impose ou non des limites à la valeur des paramètres hydrauliques.

Dans le cas du point de mesure 27, la figure 15 représente les résultats du potentiel matriciel mesuré et simulé en fonction du temps à 10 cm de profondeur avec des distributions racinaires uniforme et linéaire avec et sans les limites de Mayer (1999).

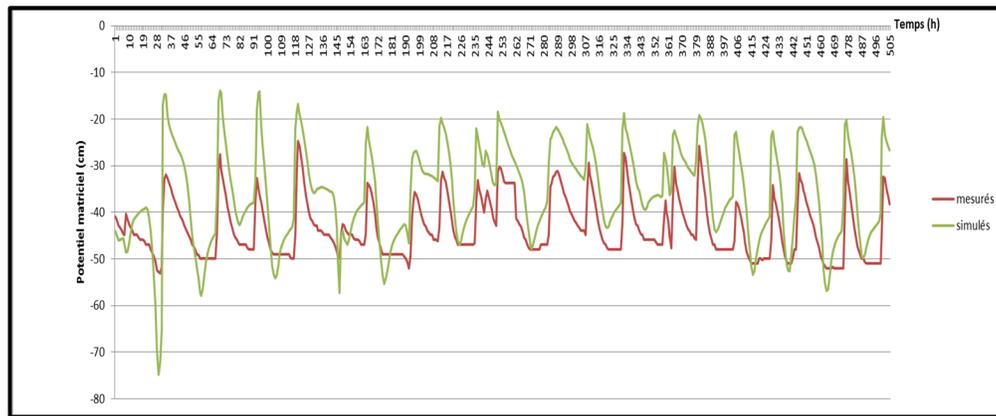


Figure 15. Potentiel matriciel mesuré et simulé en fonction du temps avec des distributions racinaires uniforme et linéaire à 10 cm de profondeur du point de mesure 27 avec et sans les limites de Mayer (1999).

Sur le plan visuel, la figure 15 n'indique pas une différence marquée avec et sans les limites de Mayer (1999). Toutefois dans le tableau 5, l'optimisateur interne d'HYDRUS-1D réussit à fournir des résultats avec la distribution racinaire uniforme mais la teneur en eau saturée demeure inférieure à la limite imposée par Mayer (1999) soit 0,1 (voir tableau 5), plus petit que 0,24 (voir tableau 3). Au tableau 6, les paramètres optimisés par HYDRUS-1D indiquent que les résultats respectent les limites inférieures et supérieures par Mayer (1999). Ainsi, selon ce tableau la teneur en eau saturée est de 0,61 avec la distribution uniforme et de 0,615 avec la distribution linéaire.

Statistiquement, selon le tableau 6 avec les distributions racinaires uniforme et linéaire du point de mesure 27, l'optimisateur interne d'HYDRUS-1D converge toujours. Mais dans le tableau 5, l'optimisation n'a pas convergé dans le cas de la distribution racinaire linéaire du point de mesure 27.

Dans le cas du point de mesure 28, la figure 16 représente les résultats du potentiel matriciel mesuré et simulé en fonction du temps à 10 cm de profondeur avec les distributions racinaires uniforme et linéaire avec et sans les limites de Mayer (1999).

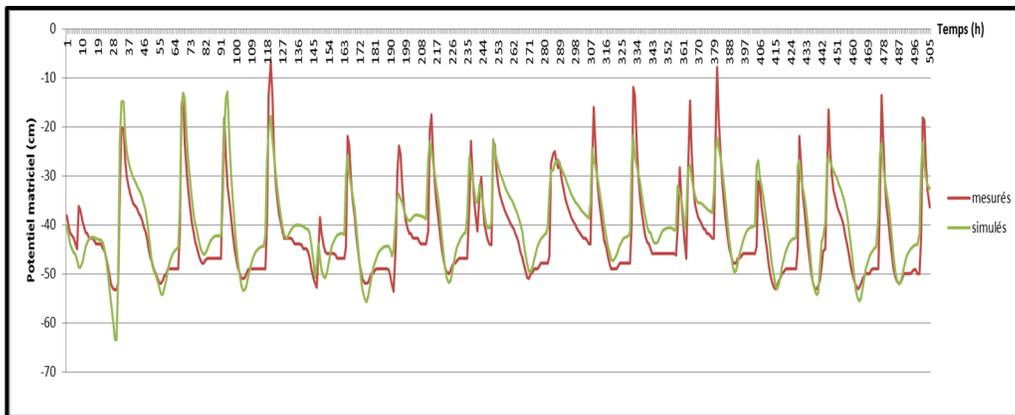


Figure 16. Potentiel matriciel mesuré et simulé en fonction du temps au cours des distributions racinaires uniforme et linéaire à 10 cm de profondeur du point de mesure 28 avec et sans les limites de Mayer (1999)

Sur le plan visuel, la figure 16 n'indique pas une différence marquée avec et sans les limites de Mayer (1999). Toutefois dans le tableau 5, l'optimisateur interne d'HYDRUS-1D réussit à donner des résultats avec la distribution racinaire uniforme mais la teneur en eau saturée demeure inférieure à la limite suggérée par Mayer (1999), soit 0,12 (voir tableau 5) plus petit que 0,24 (voir tableau 3). Au tableau 6, les paramètres optimisés par HYDRUS-1D indiquent que les résultats respectent les limites inférieures et supérieures par Mayer, 1999.

Ainsi, selon ce tableau la teneur en eau saturée est de 0,56 avec la distribution uniforme et de 0,27 avec la distribution linéaire.

Pour le site 28, les critères statistiques sont similaires lorsqu'on impose ou non des limites à la valeur des paramètres hydrauliques.

5.2. Résultats obtenus à partir de la grille manuelle

Les valeurs des paramètres de l'équation de Van Genuchten fournies (Gumière, 2012) ont été disposées de façon à avoir un écart égal entre les valeurs des paramètres. Le tableau 7 montre les 22 meilleures combinaisons en termes de RMSE

Tableau 7. Résultats des 22 meilleures combinaisons des paramètres hydrauliques à l'aide d'une grille déterminée manuellement

Numéro de combinaison	θ_s (cm ³ cm ⁻³)	Ks(cm/h)	α (cm ⁻¹)	n	RMSE (cm)
1	0,443	1	0,0225	2,61	16,10
2	0,3	1	0,0225	2,61	22,20
3	0,6	1	0,0225	2,61	12,25
7	0,443	1000	0,0225	2,61	47,12
8	0,3	1000	0,0225	2,61	47,114
9	0,6	1000	0,0225	2,61	47,118
16	0,443	1000	0,125	2,61	52,45
17	0,3	1000	0,125	2,61	53,82
18	0,6	1000	0,125	2,61	50,84
28	0,443	1	0,0225	1,261	8,97
34	0,443	1000	0,0225	1,261	47,069
35	0,3	1000	0,0225	1,261	47,0683
36	0,6	1000	0,0225	1,261	47,0681
43	0,443	1000	0,125	1,261	45,83
44	0,3	1000	0,125	1,261	46,04
45	0,6	1000	0,125	1,261	45,66
52	0,443	1000	0,225	1,261	44,27
53	0,3	1000	0,225	1,261	44,65
54	0,6	1000	0,225	1,261	43,85
61	0,443	1000	0,0225	20	47,10
62	0,3	1000	0,0225	20	47,12
63	0,6	1000	0,0225	20	47,07

La combinaison 28 du tableau 7 fournit la valeur la plus faible de RMSE, soit 8,97 cm. Donc, les valeurs des paramètres hydrauliques correspondant à cette combinaison deviennent le point de départ d'optimisation par la méthode inverse des programmes HYDRUS-1D et PEST.

5.3. Effet des profondeurs du tensiomètre

La combinaison 28 de la grille manuelle (tableau 7) a été sélectionnée comme point de départ pour l'optimisation des paramètres hydrauliques avec HYDRUS-1D. Un test sur les profondeurs du tensiomètre a été effectué dans le but d'évaluer la possibilité qu'il y ait une erreur sur la profondeur des tensiomètres. Les tableaux 8 et 9 fournissent les résultats des optimisations pour les profondeurs respectives de 7, 8, 10, 12 et 13 cm au point de mesure 26 avec et sans les limites de Mayer (1999).

Tableau 8. Résultats d'effet de la profondeur du tensiomètre sur l'optimisation du point de mesure 26 sans tenir compte des limites de Mayer (1999)

Point de mesure	Correction de PT (cm)	Distribution racinaire	θ_s (cm ³ cm ⁻³)	α (cm ⁻¹)	N	Ks (cm/h)	R ²	RMSE (cm)	DM (cm)	EAM (cm)
Point de mesure 26	7 cm	Linéaire	0,0509	0,0275	4,38	15,7	0,95	45,22	2,01	2,27
		Uniforme	0,0346	0,0048	3,75	8,46	0,96	45,10	2	2,2
	8 cm	Linéaire	0,045	0,024	2,26	18,4	0,95	22,29	0,99	1,43
		Uniforme	0,034	0,0078	4,48	8,61	0,96	22,60	1	1,4
	10 cm	Linéaire	0,269	1,26E-10	1,04	15,1	0,95	15,05	-0,67	1,08
		Uniforme	0,425	0,038	0,97	6,77	0,95	14,97	-0,66	1,07
	12 cm	Linéaire	0,886	0,0205	0,504	4,7	0,92	56,12	-2,49	2,64
		Uniforme	2,74	0,0247	0,583	4,7	0,92	56,12	-2,49	2,64
	13 cm	Linéaire	0,909	0,022	0,84	4,08	0,9	76,68	-3,41	3,56
		Uniforme	1,53	0,018	0,738	4,08	0,9	76,69	-3,41	3,56

PT : profondeur du tensiomètre (cm)

Tableau 9. Résultats d'effet de la profondeur du tensiomètre sur l'optimisation du point de mesure 26

en tenant compte des limites imposées par Mayer (1999)

Point de mesure	Correction de PT (cm)	Distribution racinaire	θ_s (cm ³ cm ⁻³)	α (cm ⁻¹)	n	Ks (cm/h)	R ²	RMSE (cm)	DM (cm)	EAM (cm)
Point de mesure 26	7 cm	Linéaire	0,28	0,068	1,95	9,31	0,96	45	2	2,2
		Uniforme	0,246	0,068	1,95	7,04	0,95	45,46	2	2,21
	8 cm	Linéaire	0,568	0,068	2,4	8,16	0,95	22,75	1,01	1,4
		Uniforme	0,45	0,068	1,97	1,28	1,69	24,81	1,1	3,61
	10 cm	Linéaire	0,449	0,068	1,97	1,28	0,70	12,17	-0,54	3,64
		Uniforme	0,448	0,069	1,97	1,28	0,7	18,48	-0,82	3,77
	12 cm	Linéaire	0,512	0,074	2,51	5,61	0,93	23,47	-1,04	1,43
		Uniforme	0,45	0,091	2,27	1,28	0,7	27,01	-1,2	3,53
	13 cm	Linéaire	0,44	0,082	2,27	1,28	0,7	78,66	-3,5	5,07
		Uniforme	0,615	0,088	1,73 8	4,08	0,7	85,3	3,7	5,32

NC : ne converge pas, DR : distribution racinaire, PT : profondeur de tensiomètre (cm)

Pour le point de mesure 26 au tableau 8, on remarque que pour θ_s , α et n les valeurs sont inférieures aux limites de Mayer (1999) malgré qu'à 10 cm de profondeur on ait obtenu un RMSE faible de l'ordre de 15 cm dans le cas des distributions racinaires linéaire et uniforme. Toutefois au tableau 9, les valeurs de tous les paramètres hydrauliques respectent les limites de Mayer (1999), tout en conservant un RMSE faible de l'ordre de 12,17 cm dans le cas de la distribution linéaire et 18,48 dans le cas de la distribution uniforme.

Les tableaux 10 et 11 à l'annexe V présentent les résultats d'optimisation obtenus aux profondeurs respectives de 7, 8, 10, 12 et 13 du point de mesure 27 avec et sans les limites de Mayer (1999).

Les tableaux 12 et 13 à l'annexe VI présentent les résultats d'optimisation obtenus aux profondeurs respectives de 7, 8, 10, 12 et 13 du point de mesure 28 avec et sans les limites de Mayer (1999).

5.4. Optimisation des paramètres avec PEST

Au cours de l'optimisation des paramètres avec PEST, on a choisi les limites du tableau 14 de Wohling et al (2008) pour les paramètres K_s , θ_s , α et n puisque ces limites sont plus larges que celles de Mayer (1999). Avec les limites de Mayer (1999), l'optimisateur de PEST, dans la plupart des cas, n'a pas convergé. Le tableau 15 présente les résultats d'optimisation avec PEST aux profondeurs respectives de 7, 8, 10, 12 et 13 cm pour le point de mesure 26.

Les tableaux 16 et 17 présentent les résultats d'optimisation avec PEST aux profondeurs respectives de 7, 8, 10, 12 et 13 cm des points de mesures 27 et 28,

Tableau 14. Limites supérieures et inférieures des paramètres calculées (Wohling et al, 2008)

Paramètres	Limites inférieures	Limites supérieures
- teneur en eau saturée θ_s $\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$	0.3	0.7
- VG facteur de forme de modèle α, c m^{-1}	1	20
- VG facteur de forme de modèle n	1.1	9
- conductivité hydraulique saturée K_s cm s^{-1}	0.1	1000

VG : paramètres de Van Genuchten

Tableau 15. Résultats d'optimisation avec PEST du point de mesure 26

Point de mesure	Correction de PT (cm)	Distribution racinaire	θ_s (cm ³ cm ⁻³)	α (cm ⁻¹)	n	Ks (cm/h)	R ²	RMSE (cm)	DM (cm)	EAM (cm)
Point de mesure 26	7 cm	Linéaire	0,2	0,02	1,61	25,05	0,97	46,52	2,07	2,31
		Uniforme	0,2	0,02	1,67	17,04	0,97	46,83	2,08	2,3
	8 cm	Linéaire	0,2	0,02	1,38	26,65	0,96	24,20	1,07	1,45
		Uniforme	0,2	0,02	1,51	28,71	0,97	23,70	1,05	1,48
	10 cm	Linéaire	0,17	0,01 2	3,37	6,42	0,97	20,13	-0,89	1,18
		Uniforme	0,15	0,01 5	2,4	9,72	0,97	20,56	-0,91	1,16
	12 cm	Linéaire	0,2	0,02	1,99	9,42	0,96	64,02	-2,84	2,88
		Uniforme	0,2	0,02	1,95	11,44	0,97	64,67	-2,87	2,89
	13 cm	Linéaire	0,47	0,01 9	1,6	1,2	0,75	65,67	-2,92	3,93
		Uniforme	0,7	0,01	3,94	4,98	0,96	86,81	-3,83	3,86

PT : profondeur du tensiomètre (cm)

Avec nos données, PEST n'a pas pu respecter les limites inférieures et supérieures pour les paramètres θ_s , α et n . Toutefois, les critères statistiques sont satisfaisants. Les tableaux 16 et 17 aux annexes VII et VIII fournissent les résultats d'optimisation avec PEST aux profondeurs respectives de 7, 8, 10, 12 et 13 cm des points de mesure 27 et 28.

5.5. Comparaison entre HYDRUS-1D et PEST

Le tableau 18 montre une comparaison des résultats obtenus avec HYDRUS et PEST pour les trois points de mesures 26, 27 et 28, à 10 cm de profondeur, avec une distribution racinaire uniforme.

Tableau 18. Résultats d'optimisation par HYDRUS-1D et PEST des points de mesures 26, 27 et 28 à 10 cm de profondeur

Points de mesures 26,27 et 28	HYDRUS-1D						PEST					
	θ_s	α	N	Ks	RMSE	R ²	θ_s	α	N	Ks	RMSE	R ²
26	0,448	0,069	1,97	1,28	18,48	0,7	0,15	0,015	2,4	9,72	20,56	0,97
27	0,245	0,0687	1,95	9,01	172,97	0,71	0,44	0,022	1,12	1	281,03	0,63
28	0,286	0,096	1,96	3,08	66,42	0,78	0,16	0,077	1,5	24,29	44,16	0,87

Au tableau 18, dans le cas de simulation du point de mesure 26 avec HYDRUS-1D, la valeur de RMSE est de 18,48 cm alors que celle de PEST est de 20,56 cm. Dans le cas d'HYDRUS-1D, le coefficient de détermination est de 0,7 tandis que celui de PEST est de 0,97. On constate donc que les résultats de simulation pour le point de mesure 26, soit avec HYDRUS-1D ou PEST, sont semblables. Toutefois, au point de mesure 27 avec HYDRUS-1D, la valeur de RMSE est de 172,97 cm alors que celle de PEST est de 281,03 cm. Dans le cas d'HYDRUS-1D, le coefficient de détermination est de 0,71 tandis que celui de PEST est de 0,63. On constate donc que les résultats de simulation pour le point de mesure 27, à l'aide d'HYDRUS-1D, sont meilleurs que ceux de PEST. Enfin au point de mesure 28 avec HYDRUS-1D, la valeur de RMSE est de 66,42 cm alors que celle de PEST est de 44,16 cm. Dans le cas d'HYDRUS-1D, le coefficient de détermination est de 0,78 tandis que celui de PEST est de 0,87. On constate donc que les résultats de simulation pour le point de mesure 28, à l'aide de PEST, sont meilleurs que ceux d'HYDRUS-1D.

En ce qui concerne les paramètres hydrauliques, il est clair que lorsqu'on impose les limites de Mayer, (1999), on s'aperçoit que dans le cas d'HYDRUS -1D les résultats des paramètres respectent bien les limites alors qu'avec PEST, ils ne les respectent pas. Dans le tableau 18 au point de mesure 26, dans le cas d'HYDRUS-1D, la teneur en eau est de 0,44 alors qu'avec PEST, elle est de l'ordre de 0,15. De même pour le point de mesure 28, la teneur en eau avec HYDRUS-1D est de 0,286 alors qu'avec PEST, elle est de l'ordre de 0,16.

5.6. Effet d'hystérèse sur l'optimisation des paramètres hydrauliques avec HYDRUS-1D

Le tableau 19 montre les résultats obtenus avec hystérèse pour les trois points de mesures 26, 27 et 28, à 10 cm de profondeur, avec une distribution racinaire uniforme.

Tableau 19. Résultats d'effet d'hystérèse sur l'optimisation des points de mesure 26,27 et 28 en tenant compte des limites imposées de Mayer,1999

PM	PT	DR	θ_s (cm ³ cm ⁻³)	α (cm ⁻¹)	n	Ks (cmh ⁻¹)	RMSE (cm)	R ²	DM (cm)	EAM (cm)
26	(10)	UNI	0,443	0,022	1,26	1	208	0,06	-9,25	11,26
27	(10)	UNI	0,596	0,068	2,22	3,62	65,14	0,3	-2,8	7,6
28	(10)	UNI	0,443	0,022	1,26	1	250.16	0,02	-11.13	14

PT : profondeur du tensiomètre (cm), UNI : uniforme, DR : distribution racinaire, PM : point de mesure

En appliquant les limites de Mayer (1999), dans le cas d'hystérèse, on remarque que les paramètres hydrauliques restent stables pour les points de mesure 26 et 28, en plus d'avoir des valeurs de RMSE et R² médiocres. Par contre, dans le cas du point de mesure 27, l'optimisateur interne d'HYDRUS-1D, combiné avec hystérèse, a réussi à optimiser les paramètres de Van Genuchten. Donc, la valeur de RMSE du point de mesure 27 avec hystérèse est de 65,14 cm alors que la valeur sans hystérèse est de 172,97 cm.

5.7. Distribution racinaire

Cette étude fait l'analyse de deux approches dans la répartition de la densité racinaire, soit une distribution racinaire uniforme (valeur minimale = 1, à $Z = 0$ cm, nœud 1 et valeur maximale = 1, à $Z = 15$ cm, nœud 16) et une distribution linéaire (valeur minimale = 0, à $Z = 0$ cm, nœud = 1 et valeur maximale = 1, à $Z = 15$ cm, nœud 16). Pour le point de mesure 26 au tableau 6, au cours d'une simulation des paramètres calculés par l'optimisateur HYDRUS-1D avec une distribution racinaire uniforme ou linéaire, on obtient un RMSE faible. Toutefois la teneur en eau, avec la distribution uniforme, se colle à la limite inférieure de Mayer (1999) soit 0,26 alors que dans le cas linéaire, la valeur de la teneur en eau se rapproche de la limite supérieure, soit 0,615.

Pour le point de mesure 27 au tableau 11 dans l'annexe V, l'optimisateur d'HYDRUS-1D n'a pas convergé aux profondeurs de 7 et 8 cm lors de la distribution linéaire alors qu'il y a eu convergence dans la distribution uniforme. Pour le point de mesure 28 au tableau 13 dans l'annexe VI, avec la distribution racinaire linéaire à 10 cm de profondeur, on obtient un RMSE de l'ordre de 70,68 cm alors que dans le cas uniforme, on obtient un RMSE de 66,42 cm.

Le type de répartition de la distribution racinaire a un effet important sur la qualité des résultats. On a trouvé que dans deux cas sur trois, soit les points de mesure 26 et 28, en particulier la distribution uniforme a donné de bons résultats alors qu'avec le point de mesure 27 on a eu des résultats moins bons pour les distributions à la fois linéaire et uniforme. Ce point de mesure semble problématique sur le plan de la qualité des données puisque son comportement a toujours été différent des deux autres points de mesure.

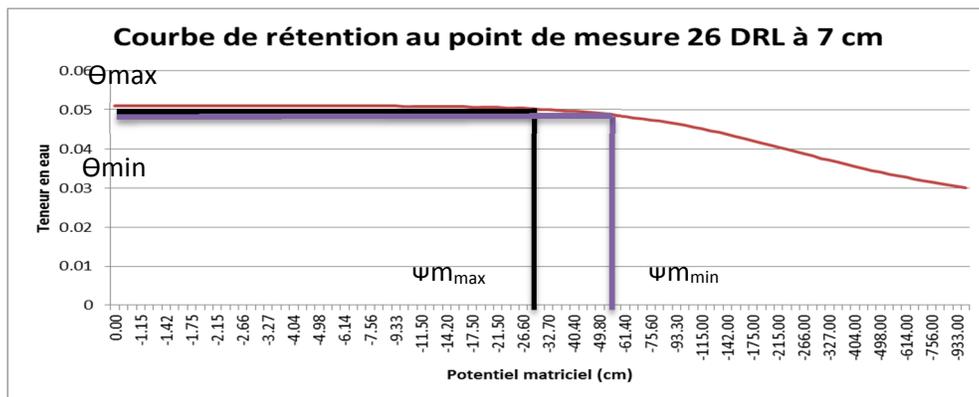
Chapitre 6 : Discussion

Après vérification du logiciel HYDRUS-1D, on a remarqué que l'optimisateur d'HYDRUS-1D ne limite pas les valeurs des paramètres à moins qu'on ne le spécifie. En prenant les limites inférieures et supérieures de Mayer (1999), pour les variables optimisées (voir tableau 3), on obtient les résultats qui tiennent compte de ces limites, tel que montré aux tableaux 6, 9, 11 et 13. Ces résultats d'optimisation des paramètres de Van Genuchten sont ceux des points de mesure 26, 27 et 28. À partir des résultats des tableaux 6 et 9, on observe qu'après avoir imposé des contraintes, les paramètres restent à l'intérieur des limites spécifiées par Mayer (1999), soit entre 0,245 et 0,615 pour la teneur en eau saturée. Quant au point de mesure 28, les résultats obtenus au tableau 13 sont aussi dans les limites imposées par Mayer (1999). Toutefois, l'optimisation sous contrainte du point de mesure 27 n'a pas été satisfaisante puisque plusieurs résultats ne convergent pas et aussi un bon nombre de valeurs des paramètres se collent aux limites supérieure ou inférieure (voir tableau 11).

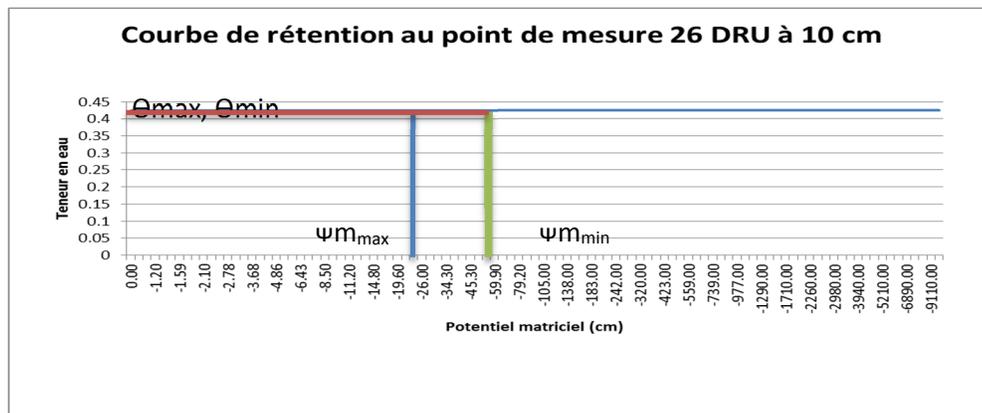
En conclusion, on peut dire que statistiquement, en mettant des limites aux paramètres hydrauliques, on obtient des valeurs de RMSE de même ordre de grandeur que celles obtenues sans limites imposées; de plus, les valeurs des paramètres optimisées sont physiquement réalistes. La recommandation concernant l'optimisateur d'HYDRUS-1D est donc de toujours imposer des contraintes aux paramètres hydrauliques afin d'éviter toute valeur irréaliste. D'après le tableau 8 pour le point de mesure 26, on a sélectionné trois cas où la teneur en eau saturée est faible (0,0509) à 7 cm de profondeur du tensiomètre, moyenne (0,425) à 10 cm de profondeur du tensiomètre et finalement élevée au-dessus de 1.0 (2,74) à 12 cm de profondeur du tensiomètre.

Pour ces trois cas, les courbes de rétention simulées selon les valeurs du tableau 8 sont montrées à la figure 17 (a, b et c)

Premier cas 18 (a) : une valeur faible de Θ_s (0,0509)



Deuxième cas 18 (b) : une valeur moyenne de Θ_s (0,425)



Troisième cas 18 (c) : une valeur de Θ_s au-dessus de 1.0 (2,74)

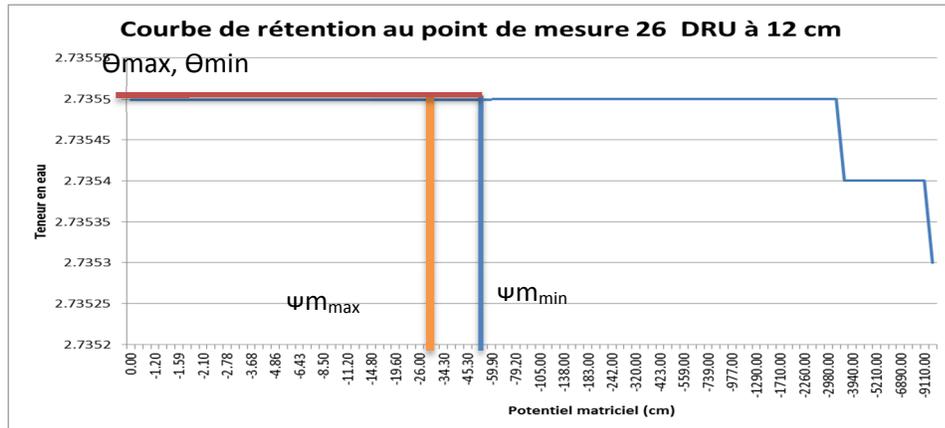


Figure 17. Courbes de rétention (a, b et c) obtenues sans limites imposées aux paramètres hydrauliques

La figure 17 montre la courbe de rétention et les valeurs minimales et maximales du potentiel matriciel et de la teneur en eau observée au champ pour le point de mesure 26. Le tableau 19 représente les valeurs minimales et maximales de teneur en eau simulée et du potentiel matriciel mesuré dans le cas où il n'y a aucune limite imposée et le tableau 20 indique les valeurs minimales et maximales de teneur en eau simulée et du potentiel matriciel mesuré dans le cas où l'on impose des limites.

Tableau 20. Valeurs minimales et maximales de teneur en eau simulée et du potentiel matriciel mesuré à 7,10 et 12 cm de profondeur du tensiomètre, sans les limites de Meyer (1999)

Point de mesure 26	Valeurs minimales de teneur en eau simulée et potentiel matriciel mesuré		Valeurs maximales de teneur en eau simulée et potentiel matriciel mesuré	
	θ	Ψ_m	θ	Ψ_m
Profondeur du tensiomètre				
À 7 cm	0,048	-51,94	0,0509	-27,21
À 10cm	0,425	-53,02	0,425	-24,73
À 12 cm	2,735	-50,94	2,735	-26,21

Tableau 21. Valeurs minimales et maximales de teneur en eau simulée et du potentiel matriciel mesuré à 10 cm de profondeur du tensiomètre, avec les limites de Meyer (1999)

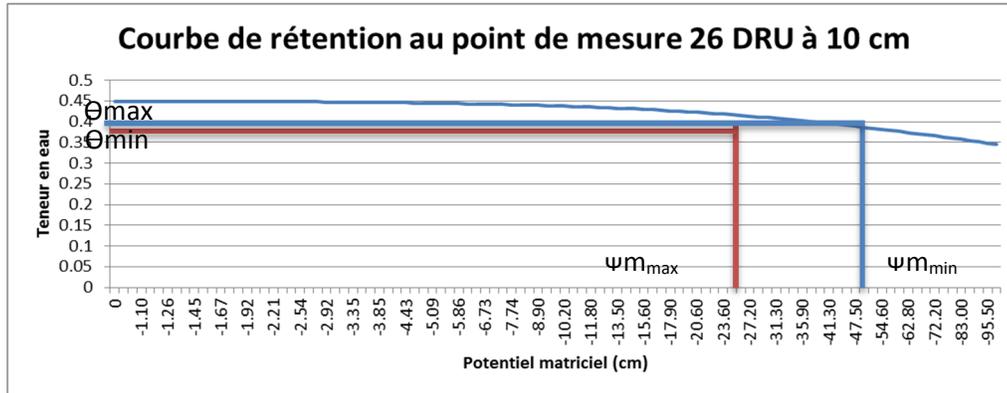
Point de mesures	Valeurs minimales de teneur en eau simulée et potentiel matriciel mesuré		Valeurs maximales de teneur en eau simulée et potentiel matriciel mesuré	
	θ	Ψ_m	θ	Ψ_m
26	0,345	-48,94	0,42	-24,21
27	0,16	-53,02	0,18	-24,73
28	0,231	-53,53	0,285	-6,63

On observe que dans les cas de la figure 18 (a, b et c) et du tableau 20, la gamme de teneur en eau simulée ne correspond pas à la gamme du potentiel matriciel mesuré. Cependant à la figure 19 (a, b et c) et au tableau 21, on remarque qu'en fixant les limites inférieures et supérieures dans l'optimisateur HYDRUS-1D, la gamme de teneur en eau simulée correspond à la gamme du potentiel matriciel mesuré.

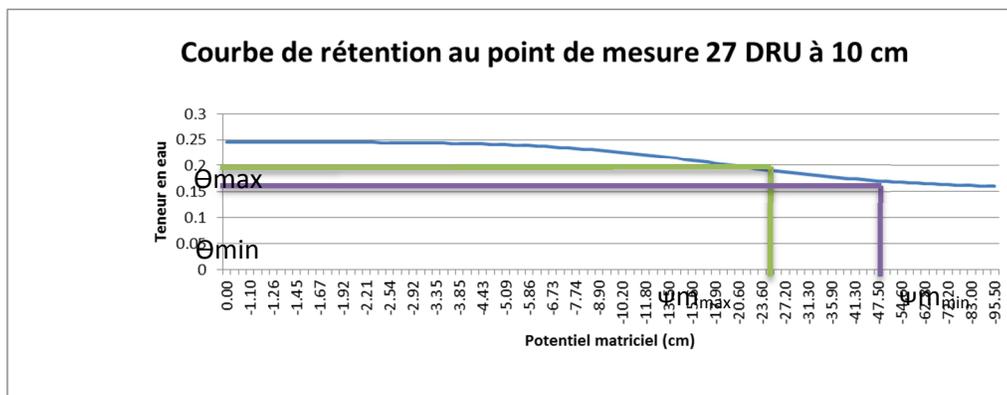
En conclusion, on peut dire que les contraintes sur les paramètres hydrauliques dans le modèle d'HYDRUS-1D fournissent des résultats avec des courbes de rétention réalistes. Puisqu'on n'a pas limité la valeur maximale du potentiel matriciel, on remarque que dans la figure 17 (a, b et c) le modèle d'HYDRUS-1D, au cours de la simulation, a une valeur du potentiel matriciel très élevée alors que dans la figure 18 (a, b et c) on a une valeur du potentiel

matriciel qui ne dépasse pas (-100 cm), imposée par le modèle, ce qui donne cette fois-ci des résultats plus précis.

a)



b)



c)

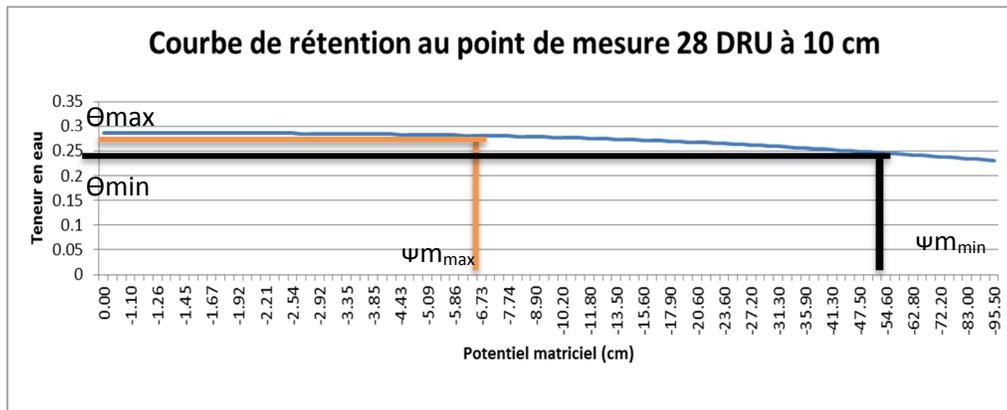


Figure 18. Courbes de rétention (a, b et c) obtenues après limites imposées aux paramètres hydrauliques

Les résultats des paramètres hydrauliques à 10 cm de profondeur du tensiomètre pour les points de mesure 26, 27 et 28, illustrés au tableau 21, indiquent que les valeurs des paramètres optimisées avec des limites imposées sont plus réalistes que celles sans limites. Les résultats en détail du point de mesure 26 se trouvent au tableau 9 alors que ceux des points de mesure 27 et 28 sont indiqués aux tableaux 11 et 13 dans les annexes V et VI.

Tableau 22. Valeurs des paramètres hydrauliques obtenues pour chacun des points de mesures sans et avec limites inférieures et supérieures imposées

Meyer 1999 Paramètres Hydrauliques	Écart (min – max)					
	26		27		28	
	Sans limite	Avec limite	Sans limite	Avec limite	Sans limite	Avec limite
θ_s (0,245-0,615)	0,425	0,448	0,094	0,245	0,17	0,286
α (0,0687-0,226)	0,038	0,069	0,059	0,0687	0,076	0,096
N (1,95-3,62)	0,97	1,97	2,23	1,95	1,4	1,96
Ks (1,26-66,96)	6,77	1,28	4,31	9,01	26,4	3,08

En conclusion, les valeurs des paramètres de l'équation de Van Genuchten, obtenues par l'optimisateur d'HYDRUS-1D, restent à l'intérieur des limites fixées par l'optimisateur d'HYDRUS (voir tableau 22). Pour obtenir des résultats physiquement réalistes ainsi que des critères statistiques précis, on doit s'assurer de spécifier des contraintes à tous les paramètres de l'équation de Van Genuchten.

En ce qui concerne les simulations avec la méthode inverse, on constate que l'optimisateur interne d'HYDRUS-1D fournit de meilleurs résultats que l'optimisateur externe de PEST. Au tableau 18, on note que les valeurs des paramètres de Van Genuchten sont plus réalistes avec HYDRUS-1D qu'avec celles de PEST.

Compte tenu de la difficulté de programmation avec le logiciel PEST et aussi compte tenu des meilleurs résultats obtenus avec HYDRUS-1D, on recommande l'utilisation de la méthode inverse interne d'HYDRUS-1D pour identifier les meilleurs paramètres hydrauliques.

En utilisant HYDRUS-1D avec le phénomène d'hystérèse aux points de mesure 26,27 et 28 à 10 cm de profondeur du tensiomètre, on remarque que l'ajout du phénomène d'hystérèse n'améliore pas les résultats de simulations pour les points de mesure 26 et 28. Cependant, l'ajout du phénomène d'hystérèse améliore de façon significative les résultats pour le point de mesure 27, soit un RMSE de 65,14 cm au lieu de 172,97 cm sans hystérèse. Donc, on recommande l'utilisation du phénomène d'hystérèse qu'avec le point de mesure 27.

Chapitre 7 : Conclusion générale

La méthode inverse utilisée dans ce projet a permis d'effectuer l'optimisation des paramètres de Van Genuchten afin de prédire les potentiels matriciels en vue de mieux gérer la quantité d'eau dans un champ de canneberges.

L'optimisateur interne d'HYDRUS-1D n'impose pas de limites comme l'indique le tableau 8 pour le point de mesure 26 et les tableaux 10 et 12 pour les points de mesure 27 et 28 dans les annexes V et VI. Toutefois, en imposant les contraintes de Mayer (1999), on a observé au tableau 9 pour le point de mesure 26 et aux tableaux 11 et 13 pour les points de mesure 27 et 28 dans les annexes V et VI que les résultats des paramètres de Van Genuchten sont physiquement réalistes tout en conservant des critères statistiques précis.

L'optimisateur interne d'HYDRUS-1D, en imposant les limites de Mayer (1999), fournit de meilleurs résultats que ceux de l'optimisateur externe PEST puisque, lors d'une simulation avec le programme HYDRUS-1D, on obtient des paramètres plus réalistes ainsi que des critères statistiques plus précis (voir tableau 17).

Dans le but d'améliorer les résultats d'optimisation, une simulation a été effectuée au point de mesure 26 (voir tableau 9) et aux points de mesure 27 et 28 (voir tableaux 11 et 13 dans les annexes V et VI) en apportant des corrections aux profondeurs du tensiomètre, soit 7,8, 12 et 13 cm. Selon les résultats obtenus, il semble y avoir une erreur sur la profondeur du tensiomètre au point de mesure 28 puisqu'on a obtenu un RMSE de l'ordre de 27,49 cm à 13 cm de profondeur au lieu d'un RMSE de 66,42 cm à 10 cm de profondeur (voir tableau 13).

Étant donné qu'au point de mesure 26, le niveau de la nappe phréatique est plus proche de la zone racinaire comme le montre la figure 10, les résultats obtenus de calibration du modèle d'HYDRUS-1D sont meilleurs qu'au point de mesure 27 où le niveau de la nappe est plus éloigné de la surface. Pour garantir une bonne qualité de simulation, il est nécessaire de mettre en évidence les propriétés du sol et l'influence du phénomène de la capillarité.

L'ajout du phénomène d'hystérèse dans ce projet donne de meilleurs résultats pour le point de mesure 27 alors qu'il n'y en a pas aux points de mesure 26 et 28. Ainsi au point de mesure 27, une simulation avec hystérèse a donné un RMSE de l'ordre de 65,14 cm à 10 cm de profondeur au lieu de 172,97 cm (voir tableau 18) sans hystérèse. Donc, on ne recommande l'utilisation de l'hystérèse qu'avec le point de mesure 27

Dans cette étude, on a utilisé une densité de distribution racinaire linéaire et uniforme. Cette façon de répartir le prélèvement racinaire dans le sol prouve que la densité racinaire a un effet important sur les résultats et la calibration du modèle. Le tableau 9 pour le point de mesure 26 et les tableaux 11 et 13 dans les annexes V et VI pour les points de mesure 27 et 28 indiquent que dans la plupart des cas la distribution racinaire uniforme a donné de meilleurs résultats que ceux du linéaire.

Le modèle HYDRUS-1D est très sensible aux données initiales et aux conditions initiales et limites imposées au profil matriciel. De plus, ce modèle dépend des contraintes imposées aux paramètres de Van Genuchten.

Pour mieux gérer la quantité d'irrigation et, d'après les résultats de simulations avec HYDRUS-1D en imposant les limites de Mayer (1999), on constate que le débit d'irrigation de 4 mm/h pendant trois heures par jour durant la période de 2012/07/05 jusqu'au 2012/07/26 a donné de bons résultats au point de mesure 26 où l'on a obtenu un RMSE faible et, sur le plan visuel, une bonne concordance entre le potentiel matriciel mesuré et simulé.

Bien que la méthode inverse du programme HYDRUS-1D ait certaines lacunes dont l'incapacité d'imposer ses propres limites et aussi au niveau du nombre limité d'itérations durant les simulations, elle demeure néanmoins la méthode la plus performante pour l'optimisation des paramètres hydrauliques de l'équation de Van Gunechten.

Chapitre 8 : Recommandations

Le travail présenté dans ce mémoire fournit une calibration d'un modèle à l'aide du programme HYDRUS-1D. Toutefois, il y a des parties qui restent à élaborer plus en profondeur.

Les voici :

- Étudier la sensibilité du modèle selon les paramètres qui influencent le plus les résultats.
- Développer une méthode pour déterminer la quantité d'eau prélevée par les racines des canneberges.
- Étudier la relation entre le niveau de la nappe et le prélèvement racinaire.
- Appliquer et calibrer le modèle d'HYDRUS-1D pour simuler le potentiel matriciel à l'endroit le plus proche de la nappe.
- Calibrer un modèle à l'aide du programme HYDRUS-1D en augmentant le nombre des couches dans le profil de sol comme dans le cas du point de mesure 27 de cette étude.
- Étudier la relation entre la fonction $\alpha(h)$ et le paramètre empirique α dans le cas de la culture de canneberges

Bibliographie

- Abou Nahra, Joumana, 2006. Modeling Phosphorus Transport in Soil and Water. Thèse doctorat. Montréal, Canada : Université de McGill, Département des ressources biologiques.
- Arbat, G, Puig-Bargués, J, Barragan, J. Bonany, J. et Ramirez de Cartagena, F. 2008. Monitoring soil water status for micro-irrigation management versus modelling approach. *Biosystems Engineering*. 100 (2008) : 286-296.
- Bonin, S., 2008. Régie agroenvironnementale de l'irrigation dans la production de canneberges (*Vaccinium Macrocarpon* Ait). Thèse mémoire. Québec, Québec : Université Laval, Département des sols et de génie agroalimentaire.
- Bonin, S. 2010. Suivi de l'irrigation par tensiomètres: l'expérience des producteurs de canneberges. *Un résumé du colloque sur l'irrigation en horticulture*. 1-5. Notre-Dame-de-Lourdes, Québec: Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec.
- Chabot, R., 2001. Influence des prélèvements racinaires sur le fonctionnement hydraulique du drainage. Application à une culture de canne à sucre. Thèse doctorat. Paris, France : Institut national agronomique Paris-Grignon.
- Cheviron, B. PEST. 2010. (Parameter estimation) et sensan (Sensitivity analysis). *Compte rendu 12ème journée Cascimodot*. Tours, France: Université Paris V1.
- Daniell, K. A. 2008. Co-engineering participatory modeling processes for water planning and management. Thèse de doctorat. Canberra, Australie: Australian National University, l'Institut en Sciences et Industries du Vivant et de l'Environnement.
- Deb, Sanjit K, Shukla, Manoj K., Simunek, Jiri et Mexal, John G. 2013. Evaluation of Spatial and Temporal Root Water Uptake Patters of a Flood-Irrigated Pecan Tree Using the HYDRUS (2D/3D) Model. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 2013.139:599-611.
- De Silva, M. S., Nachabe, M. H., Simunek, J. et Carnahan R. 2007. Simulating Root Water Uptake from a Heterogeneous Vegetative Cover. *Journal of Irrigation and drainage Engineering*. 10.1061/(ASCE)0733-9437(2008)134-2(167).
- Dabach, S., Lazarovitch, N., Simunek, J. et Uri, S. 2011. Numerical investigation of irrigation scheduling based on soil water status. *Irrigation Science*. DOI 10.1007/s00271-011-0289-x.
- Elsheikh, Mahmoud A, Saleh, Hazem I., Rashwan, Ibrahim M. et Et-Samadoni, Mohammed M. 2013. Hydraulic modelling of water supply distribution for improving its quantity and quality. *Sustainable Environment Resources*. 23(6): 403-411.

- Fredlund, D.G. et Xing, A. 1994. Equations for the soil-water characteristic curve. *Canadian Geotechnical Journal*. Vol. 31, num. 3: 521-532.
- Gallichand, J. 2012. Irrigation, notes de cours. Université Laval.
- Gottardi, G. et Venutelli, M. 1993. Richards: Computer program for the numerical simulation of one-dimensional infiltration into unsaturated soil. *Computers & Geosciences*. Vol. 19, num. 9:1236-1266.
- Gleason, David Jamin. 2013. Evapotranspiration-based irrigation scheduling tools for use in eastern Colorado. Thèse M A. Fort Collins, Colorado: Colorado State University, Département du sol et des sciences vivrières.
- Gumière, Silvio Josée. 2009. Contribution à la modélisation déterministe spatialisée de l'érosion hydrique des sols à l'échelle des petits bassins versants cultivés. Thèse doctorat. Montpellier, France: Université de Montpellier II, INRA.
- Gumière, Silvio Josée. 2012. Communication personnelle : les données des graphiques de l'évapotranspiration et de précipitation et les données estimées des paramètres hydrauliques m'ont été fournies.
- Gunawan, R., Toride, N., Sakai, M. et Simunek, J. 2013. A Hysteretic Model of Hydraulic Properties for Dual-Porosity Soils. *Soil Science Society of America Journal*. DOI:10.2136/sssaj2012.0339n.
- Hopmans, J. W., J. Šimunek, N. Romano et W. Durner, 2002. Chapitre 3.6.2. Inverse Modeling of Transient Water Flow, In: *Methods of Soil Analysis, Part 1, Physical Methods*. 963-1008. Madison, WI : Eds. J. H. Dane and G. C. Topp.
- Hosseini, E., Gallichand, J. et Marcotte, D. 1994. Theoretical and Experimental Performance of Spatial interpolation Methods for Soil Salinity Analysis. *American Society of Agricultural Engineers* : 37(6) 1799-1807.
- HYDRUS-1D, 2009. The HYDRUS-1D Software Package for Simulating the One-Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably-Saturated Media. Ver. 4.08. Riverside, California : University of California Riverside.
- Jhorar, R.K., Bastiaanssen, W.G.M., Feddes, R.A. et Van Dam, J.C. 2002. Inversely estimating soil hydraulic functions using evapotranspiration fluxes. *Journal of Hydrology*. Vol. 258, num. 1-4: 198-213.
- Karimov, A., Simunek, J., A. Hanjrac, M., Avliyakov, M. et Forkutsa, I. 2014. Effects of the shallow water table on water use of winter wheat and ecosystem health: Implications for unlocking the potential of groundwater in the Fergana Valley (Central Asia). *Agricultural Water Management*. 131: 57– 69.

- Kavetski, D., Kuczera, G. et Franks, S., 2006. Calibration of conceptual hydrological models revisited: 1. Overcoming numerical artefacts. *Journal of Hydrology*. 320 (2006),173-186.
- Kavetski, D., Kuczera, G. et Franks, S. 2006. Calibration of conceptual hydrological models revisited: 2. Improving optimisation and analysis. *Journal of Hydrology*. 320 (2006), 187-201.
- Kool, J. B. et Parker, J. C. 1988. Analysis of the inverse problem for transient unsaturated flow. *Water Resources Research*. 24(6): 817-830.
- Lagacé, R. 1981. Quatre méthodes d'évaluation de la porosité de drainage. *Canadian Agricultural Engineering*. 23: 85-90.
- Lagacé, R. 2010. Infiltration et drainage, notes de cours. Université Laval.
- Li, K.Y., De Jong, R et Boisvert, J.B, 2001.. Comparison of Root-Water-Uptake Models. Articles sélectionnées de 10^e conférence internationale de l'organisation de la conservation du sol, 1112 – 1117. West Lafayette, Indiana : University of Purdue.
- Majdoub, R. Gallichand, J. et Caron, J. 2000. Modélisation du drainage au champ par la méthode numérique des lignes. *Canadian Agricultural Engineering*. Vol. 42, No. 2: 65-74.
- Mbonimpa, M., Bédard, C., Aubertin, M. et Bussière, B. 2004. A Model to Predict the Unsaturated Hydraulic Conductivity from Basic Soil Properties. 57ième Congrès canadien de Géotechnique. 16-23.
- Minasny, B., Bethune, M., Thayalakumaran, T. et Chandra, S. 2011. Applicability of Richards's equation models to predict deep percolation under surface irrigation. *Geoderma*. Vol. 160, num. 3-4: 569-578.
- Naseri A.A, Hoseini Y, Moazed H, Abbasi F, Samani H.M.V, Sakebi S.A. 2011. Phosphorus Transport Through a Saturated Soil Column: Comparison Between Physical Modeling and Hydrus-3D Outputs. *Journal of Applied Sciences*. DOI: 10.3923/jas.2011.815.823.
- Pelletier, V., Gallichand, J. Gumière, S. et Caron, J. 2012. Problématique de drainage en production de canneberges. *Un compte-rendu d'INPACQ Canneberges 2012*. Québec, Québec: département génie agroalimentaire, Université Laval.
- Périard, Yann, Caron, Jean, Jutras, Sylvain et Lafond, Jonathan. 2013. Optimisation de la gestion de l'irrigation de la laitue en sol organique: 2013. Centre de recherche en horticulture. Québec, Québec: Université Laval.
- Periard, Yann, Gumière, Silvio José, Rousseau, Alain N., Caron, Jean et Hallema, Dennis W.: 2014. Sensitivity of drainage efficiency of cranberry fields to edaphic conditions. *Geophysical Research Abstracts*: Vol. 16, EFU2014-8204, 2014.

- PEST, 2005. PEST, Model Independent Parameter Estimation. 5^e édition. Moscow, Idaho : Watermark Numerical Computing, University of Idaho.
- Radcliffe, David E. et Simunek, Jiri. 2010. *Soil Physics with Hydrus Modeling and Applications*. Boca Raton, United States : CRC Press.
- Refsgaard, Jens Christian. 1996. Parameterisation, calibration and validation of distributed hydrological models. *Journal of Hydrology*. 198 (1997), 69-97.
- Rivera Villarreyes, C.A., Baroni, G. et Oswald, S.E. 2012. Estimation of effective soil hydraulic properties at field scale via ground albedo neutron sensing. EGU General Assembly 2012. Geophysical Research Abstracts. Vol. 14, EGU2012-222.
- Romano, N., Brunone, B. et Santini, A. 1998. Numerical analysis of one-dimensional unsaturated flow in layered soils. *Advances in Water Resources*. Vol. 21, num. 4: 315-324.
- Russo, D., Bresler, E., Shani, U. et Parker, J.C.. 1991. Analysis of infiltration events in relation to determining soil hydraulic properties by inverse problem methodology. *Water Resources Research*. 27(6):1361-1373.
- Schaap, Marcel G. et Van Genuchten, M. Th. 2006. A Modified Mualem-van Genuchten Formulation for Improved Description of the Hydraulic Conductivity near Saturation. *Vadose Zone J.* Vol. 5, février: 27-34.
- Selon Jonathan Lafond, Jean Caron, Silvio J. Silvio and Yann Périard (irrigation et drainage en sols organiques: Quelques avancées en recherche depuis les 5 dernières années, Les journées horticoles, Québec, Québec: Université Laval, Faculté des sciences de l'agriculture et de l'alimentation).
- Skaggs, T.H., Trout, T.J., Simunek, J. et Shouse, P.J., 2004. Comparison of Hydrus-2D Simulations of Drip Irrigation with Experimental Observations. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. DOI 10.1061/(ASCE)0733-9437(2004)130:4(304), 304-310.
- Simunek, J., Van Genuchten, M. Th. et Sejna, M. 2012. Hydrus: Model use, Calibration, and Validation. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*. Vol. 55, num. 4: 1261-1274.
- Simunek, J. et Van Genuchten, Martinus Th. Using the HYDRUS-1D and HYDRUS-2D Codes for Estimating Unsaturated Soil Hydraulic and Solute Transport Parameters. *Agriculture Research Magazine*. 1523-1538.
- Simunek, Jiri, Rasouli Fatemeh et Kiani Pouya, Ali. 2013. Modeling the effects of saline water use in wheat-cultivated lands using the UNSATCHEM model. DOI : 10.1007/s00271-012-0383-8.

- Simunek, J., et de Vos, J. A, 1999. Inverse optimization, calibration and validation of simulation models at the field scale. *Workshop of EurAgEng's Field of Interest on Soil and Water*. 431-445.
- Simunek, Jiri et van Genuchten, Martinus Th., 1997. Estimating unsaturated soil hydraulic properties from multiple tension disc Infiltrometer Data. *Soil Science*, 162 (6), 383-398.
- Simunek, J. et Nimmo, John R. 2005. Estimating soil hydraulic parameters from transient flow experiments in a centrifuge using parameter optimization technique. *Water Resources Research*. Vol. 41, W04015, doi: 10.1029/2004WR003379.
- Simunek, J., et Van Genuchten, M. Th. 1996. Estimating unsaturated soil hydraulic properties from tension disc infiltrometer data by numerical inversion. *Water Resources Research*. 32(9): 2683-2696.
- Tan, Xuezhi, Shao, Dongguo et Liu, Huanhuan. 2014. Simulating soil water regime in lowland paddy fields under different water managements using HYDRUS-1D. *Agricultural Water Management*. Vol. 132: 69-78.
- Tocci, Michael D. et Kelley, C.T. 1997. Accurate and economical solution of the pressure-head form of Richards' equation by the method of lines. *Advances in Water Resources*. Vol. 20, num. 1: 1-14.
- Touma, J. Comparison of different capillary models to predict the hydraulic conductivity from the water retention curve. *Compte-rendu du 15ième congrès international d'ISCO*. Budapest, Hongrie: ISCO.
- Van Dam, J.C. et Feddes, R.A. 233. 2000. Numerical simulation of infiltration, evaporation and shallow groundwater levels with the Richards equation. *Journal of Hydrology*. Vol. 233, num. 1-4: 72-85.
- Van Dam, J. C., Stricker, J.N.M. et Droogers, P. 1994. Inverse method to determine soil hydraulic functions from multistep outflow experiment. *Soil Science Society of America Journal*. 58: 647-652.
- Van Genuchten, M. Th. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of American Journal*. Vol. 44: 892-898.
- Van Genuchten, M. Th. Et Leij,, F.J. 1997. Characterization and Measurement of the Hydraulic Properties of Unsaturated Porous Media. *In Proc. of the International Workshop*. 1-13. Riverside, California: Department of Environmental Sciences, University of California.
- Vereecken, H., Weynants, M., Javaux M., Pahepsky Y. Schaap, M.G. et Van Genuchten, M.Th. 2010. Using Pedotransfer Functions to Estimate the Van Genuchten - Mualem Soil Hydraulic Properties: A Review. *Vadose Zone Journal*. Vol. 9: 795-820.

- Vrugt, J.A., Hopmans, J.W. et Simunek, J., 2001. Calibration of a Two-Dimensional Root Water Uptake Model. *Soil Science Society of America Journal*. 65, 4, 1027-1037.
- Vrugt, J. A., P. H. Stauffer, T. Wöhling, B. A. Robinson, et V. V. Vesselinov. 2008. Inverse modeling of subsurface flow and transport properties: A review with new developments. *Vadose Zone Journal*, 7(2):843-864.
- Wohling, Thomas, Vrugt, Jasper A. et Barkle, Gregory F., 2008. Comparaison of Three Multiobjective Optimization Algorithms for Inverse Modeling of Vadose Zone Hydraulic Properties. *Soil Science Society of America*. 72, 2, 305-319.
- Yang, Xu et You, Xueyi. 2013. Estimating Parameters of Van Genuchten Model for Soil Water Retention Curve by Intelligent Algorithms. *Applied Mathematics & Information Sciences*. Vol. 7, num. 5: 1977-1983.
- Zamyadi, Arash. 2006. Comparaison de différentes méthodes d'estimation de la charge pour les sédiments et l'azote à l'exutoire d'un petit bassin versant. Mémoire. Québec, Québec: Université Laval, département de génie agroalimentaire.
- Zamyadi, A., Gallichand, J. et Duchemin, M. 2007. Comparison of methods for estimating sediment and nitrogen loads from a small agricultural watershed. *Canadian Biosystems Engineering*. Vol. 49, 1.27-1.36.
- Zhang, Xiangwei. 2008. Modélisation physique et numérique des interactions sol-structure sous sollicitations dynamiques transverses. Thèse de doctorat. Grenoble, France: Université de Grenoble, l'École doctorale I-MEP2.

ANNEXES

Annexe I. Fonctionnement d'HYDRUS-1D

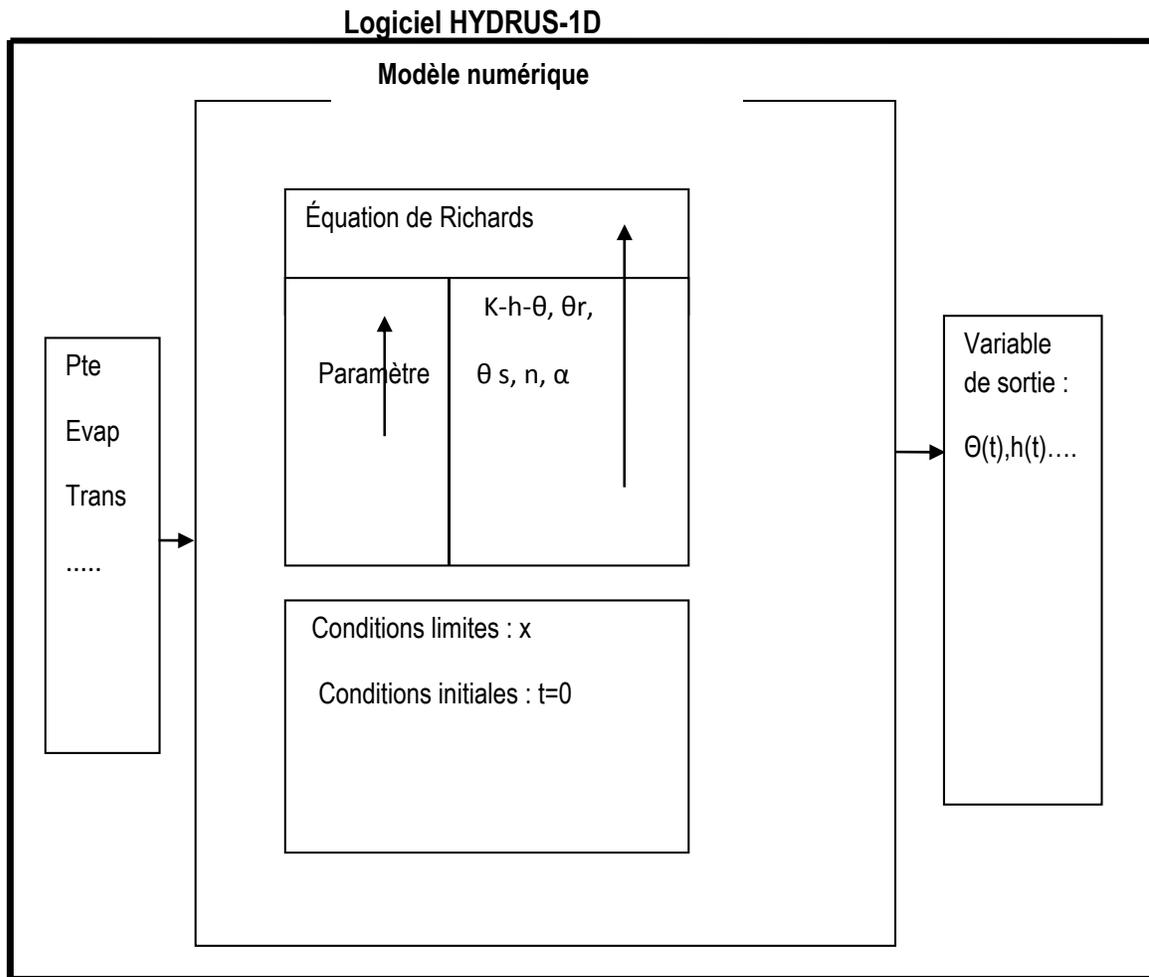
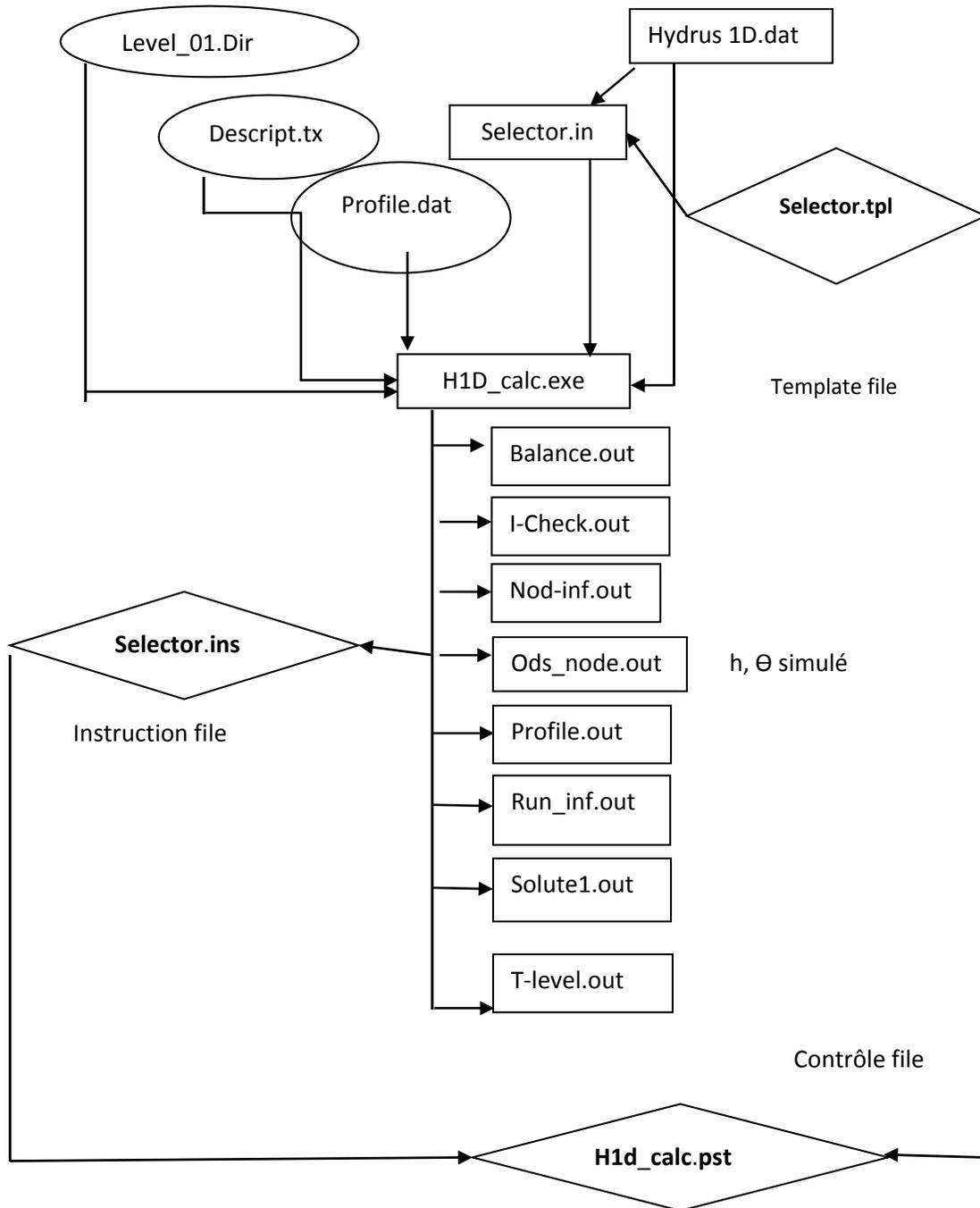


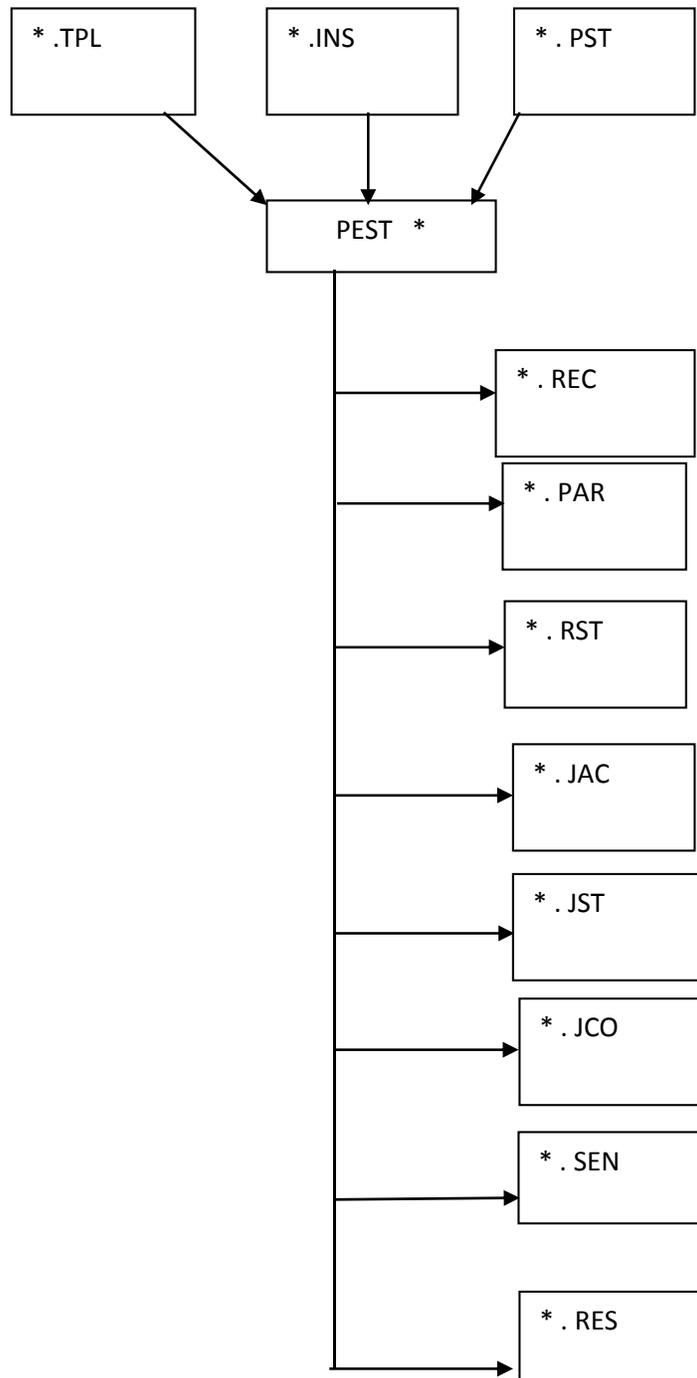
Figure 35. Schéma de fonctionnement du logiciel HYDRUS-1D

Annexe II. Fonctionnement de PEST et d'HYDRUS-1D

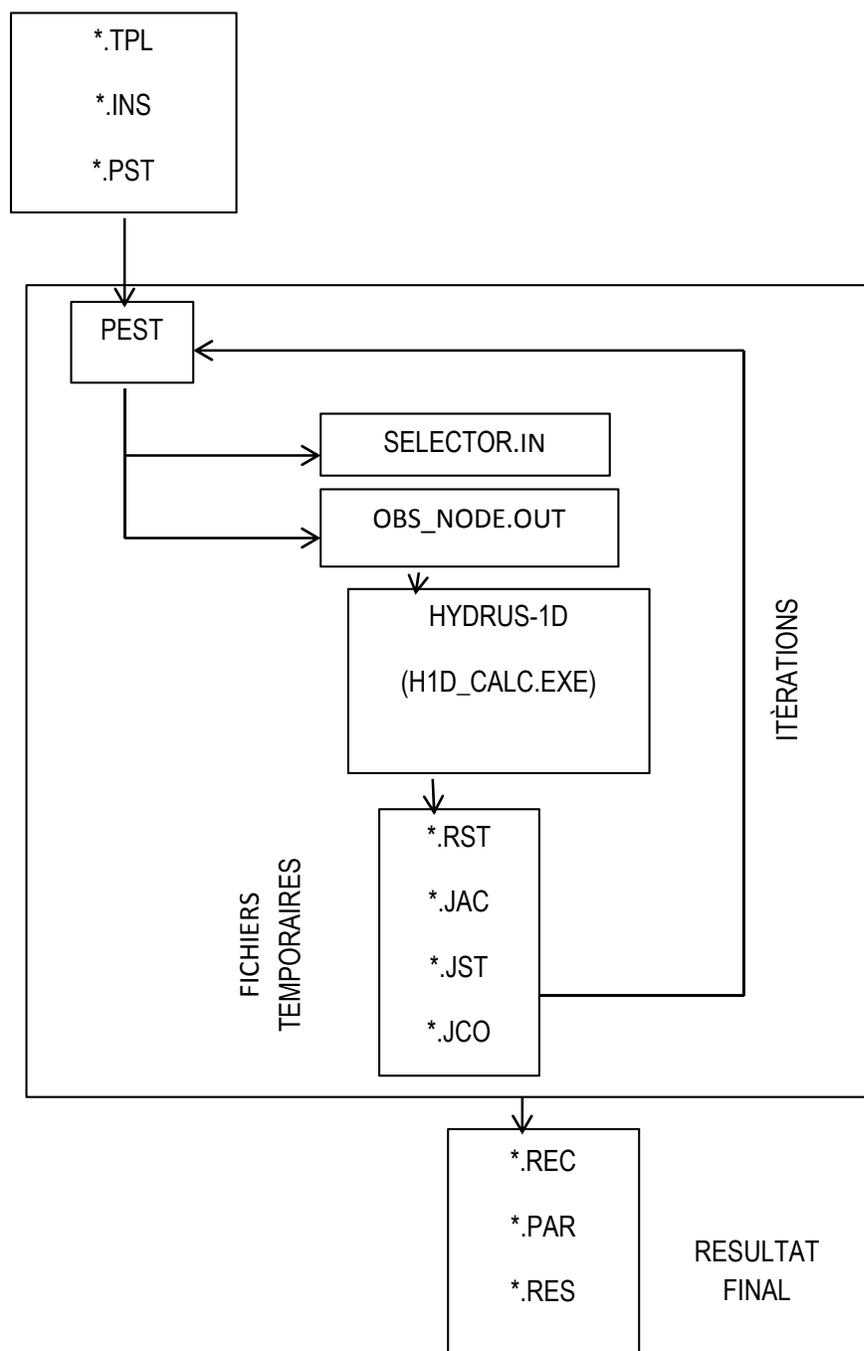


Annexe III. Fichiers exécutés et générés par PEST

Fichiers de PEST



Annexe IV. Exécution entre PEST et d'HYDRUS-1D



* : Nom du fichier

**Annexe V. Effet de la profondeur du tensiomètre sur l'optimisation du point de mesure 27
en tenant compte et sans tenir compte des limites de Meyer**

Tableau 10. Résultats d'effet de la profondeur du tensiomètre sur l'optimisation du point de mesure 27

sans tenir compte des limites de Meyer

Point de mesure	Correction de PT cm	DR	θ_s (cm ³ cm ⁻³)	α (cm ⁻¹)	n	Ks (cm/h)	R ²	RMSE (cm)	DM (cm)	EAM (cm)	
Point de mesure 27	7 cm	Linéaire	0,056	0,055	2,4	3,8	0,62	223,65	9,95	11,24	
		Uniforme	0,1	0,074	1,93	7,55	0,72	207,08	9,21	10,42	
	8 cm	Linéaire	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC
		Uniforme	0,78	0,046	0,66	2,98E+07	0,81	284,39	12,65	12,66	
	10 cm	Linéaire	0,083	0,0509	1,75	3,86	0,70	193,66	8,61	9,21	
		Uniforme	0,094	0,059	2,23	4,31	0,74	163,46	7,27	8,31	
	12 cm	Linéaire	0,4	0,02	0,83	1,51E+06	0,81	194,6	8,65	8,74	
		Uniforme	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	
	13 cm	Linéaire	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC
		Uniforme	0,091	0,051	2,51	3,57	0,78	125,83	5,59	6,25	

NC : ne converge pas, DR : distribution racinaire, PT : profondeur de tensiomètre (cm), DR : distribution racinaire

Tableau 11. Résultats d'effet de la profondeur du tensiomètre sur l'optimisation du point de mesure 27
en tenant compte des limites de Meyer

Point de mesure	Correction de PT cm	Distribution racinaire	θ_s (cm ³ cm ⁻³)	α (cm ⁻¹)	n	Ks (cm/h)	R ²	RMSE (cm)	DM (cm)	EAM (cm)	
Point de mesure 27	7 cm	Linéaire	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	
		Uniforme	0,24	0,06	1,95	11,5	0,69	216,5	-9,63	10,77	
	8 cm	Linéaire	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC
		Uniforme	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC
	10 cm	Linéaire	0,443	0,062	1,96	1,9	0,70	230,91	10,27	11,56	
		Uniforme	0,245	0,068 7	1,95	9,01	0,71	172,97	-7,69	8,36	
	12 cm	Linéaire	0,2	0,068	1,96	1,64	0,70	230,91	10,27	11,56	
		Uniforme	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	
	13 cm	Linéaire	0,2	0,06	3,62	2,3	0,70	210,29	-9,35	10,68	
		Uniforme	0,2	0,06	3,62	4,5	0,75	190,33	8,49	9,87	

NC : ne converge pas, DR : distribution racinaire, PT : profondeur de tensiomètre (cm)

Annexe VI. Effet de la profondeur du tensiomètre sur l'optimisation du point de mesure 28 en tenant compte et sans tenir compte des limites de Meyer

Tableau 12. Résultats d'effet de la profondeur du tensiomètre sur l'optimisation du point de mesure 28
sans tenant compte des limites de Meyer

Point de mesure	Correction de PT (cm)	Distribution racinaire	θ_s (cm ³ cm ⁻³)	α (cm ⁻¹)	n	Ks (cm/h)	R ²	RMSE (cm)	DM (cm)	EAM (cm)
Point de mesure 28	7 cm	Linéaire	0,12	0,051	1,59	6,13	0,74	99,97	4,44	5,68
		Uniforme	0,1	0,049	2,39	5,28	0,72	77,36	3,44	5,26
	8 cm	Linéaire	0,11	0,05	1,69	6,02	0,75	83,91	3,73	5,10
		Uniforme	0,13	0,066	2,32	0,18	0,72	61,38	2,73	4,75
	10 cm	Linéaire	0,125	0,04	1,6	4,25	0,77	54,05	2,4	4
		Uniforme	0,17	0,076	1,4	26,4	0,77	48,35	2,1	3,9
	12 cm	Linéaire	0,2	0,034	1,31	7,56	0,79	21,95	0,97	3,03
		Uniforme	0,2	0,025	1,36	4,28	0,79	21,98	0,97	3,04
	13 cm	Linéaire	0,32	0,019	1,25	4,68	0,8	6,71	0,29	2,7
		Uniforme	0,18	0,024	1,41	3,78	0,8	2,65	0,11	2,73

PT : profondeur de tensiomètre (cm)

Tableau 13. Résultats d'effet de la profondeur du tensiomètre du point de mesure 28

en tenant compte des limites de Meyer

Point de mesure	Correction de PT (cm)	Distribution racinaire	θ_s (cm ³ cm ⁻³)	α (cm ⁻¹)	n	Ks (cm/h)	R ²	RMSE (cm)	DM (cm)	EAM (cm)
Point de mesure 28	7 cm	Linéaire	0,25	0,0678	1,96	3,16	0,77	129,45	-5,76	6,34
		Uniforme	0,24	0,098	2,01	4,04	0,77	124,49	-5,53	6,22
	8 cm	Linéaire	0,254	0,099	1,68	5,51	0,75	86,53	-3,85	5,15
		Uniforme	0,26	0,078	1,96	3,65	0,77	106,33	-4,73	5,55
	10 cm	Linéaire	0,31	0,096	1,66	3,02	0,78	70,68	-3,14	4,28
		Uniforme	0,286	0,096	1,96	3,08	0,78	66,42	-2,95	4,2
	12 cm	Linéaire	0,25	0,096	1,97	3,27	0,78	26,61	-1,18	3,15
		Uniforme	0,39	0,096	1,97	2,68	0,78	26,57	-1,18	3,16
	13 cm	Linéaire	0,34	0,098	1,98	3,71	0,79	27,65	-1,23	3,17
		Uniforme	0,39	0,096	1,67	2,85	0,78	27,49	-1,22	3,17

PT : profondeur du tensiomètre

Annexe VII. Optimisation avec PEST du point de mesure 27

Tableau 16. Résultats d'optimisation avec PEST du point de mesure 27

Point de mesure	Correction de PT (cm)	Distribution racinaire	θ_s (cm ³ cm ⁻³)	α (cm ⁻¹)	n	Ks (cm/h)	R ²	RMSE (cm)	DM (cm)	EAM (cm)
Point de mesure 27	7 cm	Linéaire	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC
		Uniforme	0,44	0,02 2	1,12	1	0,61	341,38	15,19	22,23
	8 cm	Linéaire	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC
		Uniforme	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC
	10 cm	Linéaire	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC
		Uniforme	0,44	0,02 2	1,12	1	0,63	281,03	12,50	20,32
	12 cm	Linéaire	Nc	Nc	Nc	Nc	Nc	Nc	Nc	Nc
		Uniforme	0,44	0,02 2	1,12	1	0,63	240,76	10,71	19,16
	13 cm	Linéaire	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC
		Uniforme	0,44	0,02 2	1,12	1	0,63	218,33	9,71	18,71

NC : ne converge pas, PT : profondeur de tensiomètre en centimètre

Annexe VIII. Optimisation par PEST du point de mesure 28

Tableau 17. Résultats d'optimisation par PEST du point de mesure 28

Point de mesure	Correction de PT (cm)	Distribution racinaire	θ_s (cm ³ cm ⁻³)	α (cm ⁻¹)	n	Ks (cm/h)	R ²	RMSE (cm/h)	DM (cm)	EAM (cm)
Point de mesure 28	7 cm	Linéaire	Nc	Nc	Nc	Nc	Nc	Nc	Nc	Nc
		Uniforme	Nc	Nc	Nc	Nc	Nc	Nc	Nc	Nc
	8 cm	Linéaire	Nc	Nc	Nc	Nc	Nc	Nc	Nc	Nc
		Uniforme	Nc	Nc	Nc	Nc	Nc	Nc	Nc	Nc
	10 cm	Linéaire	Nc	Nc	Nc	Nc	Nc	Nc	Nc	Nc
		Uniforme	0,16	0,077	1,5	24,29	0,87	44,16	1,96	3,89
	12 cm	Linéaire	Nc	Nc	Nc	Nc	Nc	Nc	Nc	Nc
		Uniforme	0,35	0,01	1,36	1,75	0,88	31,39	1,39	3,17
	13 cm	Linéaire	Nc	Nc	Nc	Nc	Nc	Nc	Nc	Nc
		Uniforme	0,34	0,02	1,21	7,45	0,9	2,82	0,12	2,69

NC : ne converge pas, PT : profondeur de tensiomètre en centimètre