

Programme d'appui pour un secteur agroalimentaire innovateur

La dynamique de l'eau dans le sol, un outil de planification et de gestion de l'irrigation

Paul Deschênes M.Sc., agr.

Carl Boivin M.Sc., agr.

Daniel Bergeron M.Sc., agr.

Décembre 2012

Équipe de réalisation

FERME FRANÇOIS GOSSELIN

Louis Gosselin Producteur agricole
Gabriel Gosselin Producteur agricole

INSTITUT DE RECHERCHE ET DE DÉVELOPPEMENT EN AGROENVIRONNEMENT
(IRDA)

Carl Boivin Chercheur
Paul Deschênes Professionnel de recherche
Stéphane Nadon Technicien agricole

MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE, DE L'ALIMENTATION ET DES PÊCHERIES DU
QUÉBEC (MAPAQ)

DIRECTION RÉGIONALE DE LA CAPITALE NATIONALE (DRCN)

Daniel Bergeron Conseiller en horticulture

Table des matières

Équipe de réalisation	ii
1. Mise en contexte.....	1
2. Objectifs	2
3. Méthodologie	2
4. Calendrier de réalisation.....	5
5. Résultats et discussion.....	6
5.1. Prévoir la dynamique de l'eau d'irrigation dans différents types de sols avec le logiciel HYDRUS 2D/3D.....	6
5.1.1. Paramètres de modélisation.....	6
5.1.2. Simulations du transport hydrique suite à des épisodes d'irrigation.....	11
5.2. Comparer l'approche prévisionnelle (HYDRUS) avec des mesures quantitatives (TDR) .	12
5.2.1. Données observées	12
5.2.2. Régressions entre les valeurs observées et simulées.....	17
5.3. Prévenir le lessivage des éléments minéraux en limitant le volume d'eau d'irrigation qui atteint la zone de sol inexplorée par les racines	19
5.4. Proposer une méthode d'utilisation basée sur un nombre limité de caractéristiques physiques du sol à considérer.....	21
6. Conclusion.....	24
7. Remerciements	26
8. Bibliographie.....	27
Annexe	- 1 -
A. Conversion du débit d'irrigation théorique, en litre par minute par dix mètres (l/min/10m), au débit appliqué sur l'ensemble de la limite.....	- 1 -

Liste des figures

Figure 1. Schéma du positionnement des sondes TDR (a. butte entière, b. demi-butte).	4
Figure 2. Installation des 22 sondes TDR dans la butte de sol, champ 1.	4
Figure 3. Positionnement des 11 tensiomètres dans la demi-butte: unité de mesure des tensiomètres dans la paroi droite de la tranchée, boîtiers des tensiomètres sur le plastique de la butte.	5
Figure 4. Géométrie des domaines (a. deux dimensions, b. trois dimensions).	7
Figure 5. Propriétés du domaine: distribution des matériaux.	8
Figure 6. Propriétés du domaine: distribution du prélèvement en eau des racines.	9
Figure 7. Conditions initiales exprimées en pression selon la profondeur.	9
Figure 8. Limites du domaine.	10
Figure 9. Évolution de la teneur en eau volumique (a) et de la pression (b), champ 1.	11
Figure 10. Évolution de la teneur en eau volumique (a) et de la pression (b), champ 2.	12
Figure 11. Variations de la teneur en eau volumique des sondes 1-1 à 1-11 du 9 au 12 septembre 2011.	13
Figure 12. Variations de la teneur en eau volumique des sondes 1-12 à 1-22 du 9 au 12 septembre 2011.	13
Figure 13. Variations de la teneur en eau volumique des sondes 1-23 à 1-33 du 9 au 12 septembre 2011.	14
Figure 14. Variations de la teneur en eau volumique des sondes 2-1 à 2-11 du 4 au 8 août 2011.	14
Figure 15. Variations de la teneur en eau volumique des sondes 2-12 à 2-22 du 4 au 8 août 2011.	15
Figure 16. Variations de la teneur en eau volumique des sondes 2-23 à 2-33 du 4 au 8 août 2011.	15
Figure 17. Variations de tension (kPa) entre les positions 1-1 à 1-11 du 9 au 12 septembre 2011.	16
Figure 18. Courbes de désorption moyennes des 3 profondeurs pour les champs 1 et 2.	16

Figure 19. Distribution de la teneur en eau volumique post-irrigation (a. champ 1 T=96h, b. champ 2 T=120h).19

Figure 20. Comparaison de la teneur en eau volumique et de la pression entre les différents espacements entre les goutteurs, champ 1 (a. espacement 30 cm, b. espacement 20 cm).20

Figure 21. Représentation en trois dimensions de la pression de l'eau dans le sol suite à un épisode d'irrigation (a. espacement goutteurs 20 cm, b. espacement goutteurs 10 cm).21

Liste des tableaux

Tableau 1. Caractéristiques physiques des sols.....5

Tableau 2. Paramètres physiques des sols utilisés pour la modélisation des simulations.....6

Tableau 3. Régressions entre les valeurs observées et simulées de teneur en eau volumique.....18

1. Mise en contexte

Au Québec, l'irrigation par goutte à goutte est utilisée dans plusieurs productions agricoles d'importance. Ce système est habituellement installé sur le sol au centre de la butte ou du rang en culture, voire même de chaque côté de la plante. Comparé à l'irrigation par aspersion, la gestion de l'irrigation par goutte à goutte est plus complexe. En effet, comme les apports en eau sont très localisés, il est difficile d'atteindre l'ensemble du volume de sol colonisé par les racines. De plus, une proportion de ce volume est indirectement alimentée par la redistribution de l'eau suite à un épisode d'irrigation. Ainsi, même à la portée du système d'irrigation, des zones de sol peuvent être insuffisamment alimentées en eau et ne pas répondre aux besoins hydriques de la plante. Aussi, plus le volume de sol à la portée du système d'irrigation est inférieur au volume de sol total, plus le risque que la plante subisse un stress hydrique est important. En effet, le volume de sol gérable étant restreint, les apports en eau devront être plus nombreux et le suivi entre les apports très rigoureux. Le choix d'un système d'irrigation (espacement entre les goutteurs, débit, etc.) est souvent le résultat d'essais et d'erreurs. Toutefois, pour rendre l'irrigation par goutte à goutte plus efficace, une connaissance accrue de la dynamique de l'eau dans le sol doit être envisagée, tant pour le choix d'un système que pour le positionnement du tensiomètre qui gère la fréquence des apports. Comme les prévisions fournies par le logiciel HYDRUS 2D/3D (version 2.01) sont fondées sur des données découlant des caractéristiques physiques du sol, ce logiciel pourrait rapidement devenir un outil efficace pour connaître la dynamique de l'eau dans le sol.

L'assèchement du sol dans les cultures irriguées par goutte à goutte constitue une problématique importante au Québec. Divers essais ayant trait à la micro-irrigation dans le fraisier ont été réalisés dans les dernières années au Québec (Gosselin et al., 2006; Bergeron, 2010; Boivin et Deschênes, 2011). Ces essais, en démontrant la perte d'eau en profondeur, ont permis de diminuer la durée des irrigations en augmentant leur fréquence. Toutefois, la problématique précédemment décrite survient encore.

Comme les apports en eau sont très localisés, il est difficile d'atteindre l'ensemble du volume de sol colonisé par les racines. Un projet réalisé en 2009 et 2010 à la Ferme François Gosselin à l'Île d'Orléans dans la fraise à jours neutres a bien illustré cette problématique (Boivin et Deschênes, 2011). En effet, selon les caractéristiques du système d'irrigation (12 systèmes différents), le volume de sol à la portée des apports en eau n'excédait pas 70 %, favorisant ainsi de potentielles carences hydriques. De plus, des variations de rendements, jusqu'à 20 %, ont été observées selon l'espacement entre les goutteurs. Ce projet considérait la conductivité hydraulique du sol, l'espacement et le débit des goutteurs, la tension de l'eau dans le sol et la durée d'un épisode d'irrigation. Toutefois, les coûts reliés à la réalisation de tels projets sont trop importants (équipements, main d'œuvre, etc.) pour utiliser cette approche dans le but de caractériser l'ensemble des sols cultivés par une entreprise. En validant l'utilisation d'une approche utilisant un logiciel de modélisation comme HYDRUS, l'établissement d'un système d'irrigation, actuellement par essais et erreurs, laisserait la place à une méthode raisonnée utilisant les propriétés physiques du sol en culture.

2. Objectifs

Afin de valider l'utilité de l'approche suggérée, un projet est réalisé en contexte de production commerciale sur une entreprise située à l'Île d'Orléans, spécialisée dans la production de fraises.

Ce projet a comme objectif principal de prévoir la dynamique de l'eau qui est appliquée par un système goutte à goutte dans la zone de sol en culture afin d'orienter le choix du système d'irrigation et la gestion des apports d'eau à partir des propriétés physiques spécifiques à un sol.

Plus spécifiquement, ce projet vise à:

1-Prévoir la dynamique de l'eau d'irrigation dans différents types de sols avec le logiciel HYDRUS 2D/3D;

2-Comparer l'approche prévisionnelle (HYDRUS) avec des mesures quantitatives (TDR);

3-Prévenir le lessivage des éléments minéraux en limitant le volume d'eau d'irrigation qui atteint la zone de sol inexplorée par les racines;

4-Proposer une méthode d'utilisation basée sur un nombre limité de caractéristiques physiques du sol à considérer.

3. Méthodologie

Le projet se déroule à la Ferme François Gosselin située à l'Île d'Orléans. En production depuis 20 ans, l'entreprise compte maintenant 28 ha en production de fraisiers à jours courts et à jours neutres et collabore régulièrement à différents projets de recherche. Les essais sont réalisés en contexte de production commerciale selon la régie de culture du producteur (travail du sol, implantation, fertilisation et traitements phytosanitaires). L'implantation de la fraisière (cv *Seascape*) a eu lieu vers la mi-mai. À la suite de l'implantation, des sondes mesurant la teneur en eau volumique ont été introduites dans le sol dans deux champs de la ferme. Comme cet équipement permet de mesurer la teneur en eau du sol en continu, il permet de suivre le mouvement de l'eau horizontalement et verticalement en temps réel. En plus de suivre le mouvement de l'eau, la proportion de la butte de sol sous conditions humides ainsi que sa teneur en eau par zone étaient constamment connues.

Au même moment, des analyses de sols ont été effectuées afin de déterminer certaines propriétés physiques des sols en culture. La courbe de désorption, la densité apparente du sol et la granulométrie ont servi à valider les prévisions fournies par le logiciel HYDRUS (version 2.01.1090). Des tensiomètres ont également été installés près des sondes TDR afin de faire un suivi des valeurs de tension matricielle du sol, un paramètre relié à la quantité d'eau dans le sol et à la texture de ce dernier.

Les données recueillies durant la saison estivale ont été analysées et utilisées pour produire des scénarios avec le logiciel HYDRUS 2D/3D. Ce dernier, conçu par la compagnie PC-Progress

(www.pc-progress.com), est un logiciel reconnu mondialement qui est utilisé dans un contexte de recherche dans plusieurs domaines se rapportant aux sols (agronomie, mines, décontamination des sols, hydrogéologie, environnement, etc.) (Sansoulet et al., 2008; Mubarak et al., 2009; Zhou et al., 2007). Ce logiciel offre un environnement produisant des modélisations qui permettent l'analyse de l'écoulement de l'eau, du transport des solutés ainsi que des transferts de chaleur dans un milieu à saturation variable. L'utilisation du logiciel HYDRUS 2D/3D, à des fins appliquées et sa validation en contexte de production commerciale en champ comme outil de gestion, servira à déterminer les caractéristiques d'un système d'irrigation (espacement entre les goutteurs, débit par goutteur, etc.) afin qu'il considère le type de sol et les besoins en eau de la culture.

La distribution de l'eau dans le sol lors des épisodes d'irrigation et la redistribution de cette dernière suivant l'épisode a été mesurée avec des sondes de type TDR (time domain reflectometry) (CS605 et CS610, Campbell Scientific). Ces sondes mesurent la teneur en eau volumique (θ_v) du sol. Les données sont enregistrées dans un acquiiseur de données de type CR1000 (Campbell Scientific) à une fréquence de cinq minutes entre 6h00 et 18h00 et de 60 minutes entre 18h00 et 6h00. Les sondes TDR sont disposées dans la butte de sol afin de couvrir l'ensemble du volume de sol. Pour une butte de sol cultivée sur 30 cm (12 pouces) de profondeur et sur une largeur d'environ 80 cm (32 pouces), soit à peu près la zone colonisée par le système racinaire des fraisières, 22 sondes TDR ont été utilisées pour être en mesure d'illustrer la distribution de l'eau. De plus, 11 sondes ont été introduites à l'intérieur d'une moitié de butte (Figure 1 et Figure 2). Chaque butte ou moitié de butte correspond à un site d'observation. Les mesures ont été faites sur quatre sites répartis dans deux champs (une butte et une moitié de butte par champ). Au total, 66 sondes TDR ont été utilisées dans le dispositif expérimental. Ces données ont servi de témoins pour évaluer la performance du logiciel HYDRUS, car il s'agit de mesures quantitatives très fiables. Les différents scénarios générés par le logiciel à partir des caractéristiques physiques mesurées en laboratoire pour le sol retenu, ont été comparés à ce qui a été mesuré au champ avec les sondes TDR.

Les caractéristiques physiques du sol de chaque champ sont présentées au Tableau 1. Des échantillonnages ont été effectués en profondeur par strates de 10 cm allant jusqu'à une profondeur de 30 cm. La matière organique a été mesurée par la méthode d'oxydation par voie humide de Walkley Black (Allison, 1965) tandis que la granulométrie a été déterminée par la méthode de l'hydromètre en six points suivis d'un tamisage des sables (Gee et Bauder, 1986). Pour chacun des champs, deux systèmes de goutte à goutte ont été comparés (espacement des goutteurs de 20 et 30 cm). Enfin, les données recueillies au champ avec les sondes TDR ont été comparées à ce que le logiciel a simulé.

Un suivi de la tension (potentiel) a été effectué par l'utilisation de tensiomètres (Tx-80, HORTAU). Des tensiomètres ont été positionnés, de la même manière que les sondes TDR préalablement mentionnées, afin de couvrir la surface transversale d'une demi-butte de sol (Figure 3). Ces données sont enregistrées en continu dans un ordinateur par le logiciel Irrolis Light (version 1.9, HORTAU).

La conductivité hydraulique saturée (K_s) a été mesurée grâce à un infiltromètre à charge constante, selon la méthode décrite par Banton et al. (1991). Ces mesures ont été effectuées dans le cadre d'un projet précédent situé sur le même site expérimental (Boivin et Deschênes, 2011).

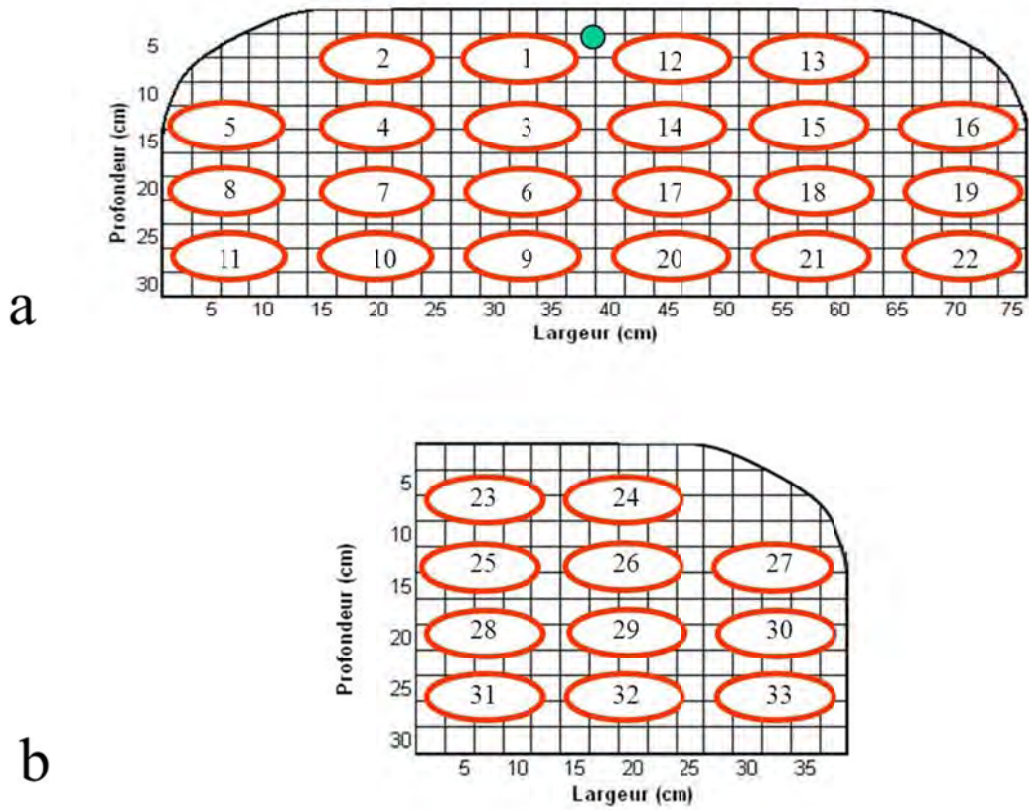


Figure 1. Schéma du positionnement des sondes TDR (a. butte entière, b. demi-butte).



Figure 2. Installation des 22 sondes TDR dans la butte de sol, champ 1.

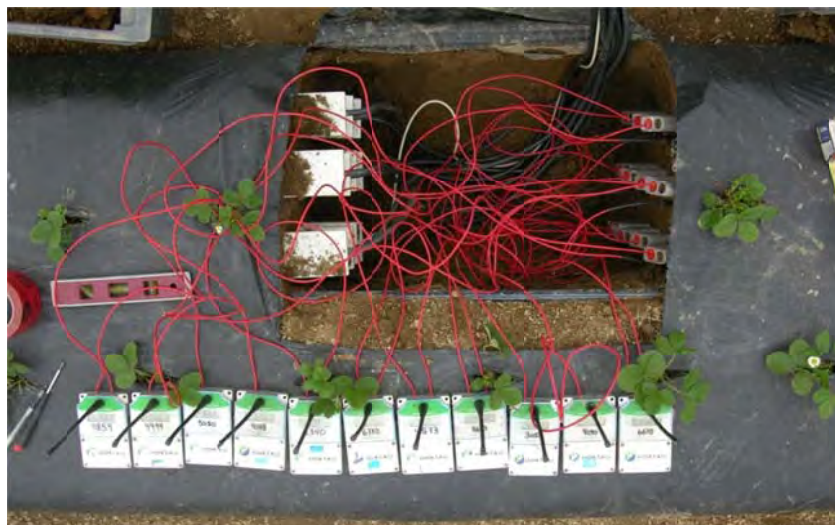


Figure 3. Positionnement des 11 tensiomètres dans la demi-butte: unité de mesure des tensiomètres dans la paroi droite de la tranchée, boîtiers des tensiomètres sur le plastique de la butte.

Tableau 1. Caractéristiques physiques des sols.

Échantillon	Détritus* %	Matière organique %	Sable %	Limon %	Argile %	Densité g/cm ³	Texture
Champ 1							
0-10 cm	25,6	5,50	52	22	26	1,04	Loam sablo-argileux
10-20 cm	25,2	4,99	51	28	21	1,14	Loam
20-30 cm	23,4	5,85	50	27	23	1,21	Loam sablo-argileux
Champ 2							
0-10 cm	25,3	4,03	53	25	22	1,22	Loam sablo-argileux
10-20 cm	25,9	4,39	51	27	22	1,32	Loam sablo-argileux
20-30 cm	25,8	4,30	52	23	25	1,46	Loam sablo-argileux

*Particules >2 mm de diamètre

4. Calendrier de réalisation

Étapes	Date de réalisation
Rencontre pré-saison	Avril 2011
Installation des équipements de mesure dans le sol	Avril 2011
Échantillonnages de sol (courbes de désorption, granulométrie, etc.)	Mai 2011
Suivi fonctionnement des équipements	Mai à octobre 2011
Désinstallation des équipements	Octobre 2011
Rencontre post saison	Décembre 2011
Analyses des données recueillies et modélisation avec HYDRUS	Décembre 2011 à décembre 2012
Rédaction du rapport et de la fiche de transfert	Septembre à décembre 2012
Participation à une journée de diffusion (journée régionale du MAPAQ)	Juillet 2011
	Journée champêtre, Île d'Orléans

5. Résultats et discussion

5.1. Prévoir la dynamique de l'eau d'irrigation dans différents types de sols avec le logiciel HYDRUS 2D/3D

5.1.1. Paramètres de modélisation

Afin de créer un modèle virtuel du sol à l'étude, plusieurs paramètres physiques de ce dernier doivent être utilisés. Parmi ces paramètres, certains sont facilement mesurables au champ tandis que d'autres sont estimés. Ces paramètres sont présentés au Tableau 2. La teneur en eau à la capacité au champ (θ_{cc}) ainsi qu'à la saturation (θ_{sat}) peut être obtenue grâce à l'étude de la courbe de désorption du sol. Ces valeurs indiquent la proportion d'eau, en terme volumique, suite à un ressuyage de l'eau libre d'une durée allant de 24 à 48 heures (θ_{cc}) et lorsque l'ensemble de la porosité du sol est occupé par de l'eau (θ_{sat}). Ces deux valeurs ont été mesurées *in situ* grâce à l'étude de la courbe de désorption correspondant aux échantillons de sol prélevés aux différents champs (θ_{sat}) et par l'observation des variations de tension du sol par des tensiomètres (θ_{cc}). La conductivité hydraulique saturée (K_s) est également mesurable par l'utilisation d'un infiltromètre. Les valeurs utilisées, également *in situ*, correspondent à celles d'un projet antérieur au même site expérimental (Boivin et Deschênes, 2011) et ont été mesurées par un infiltromètre à charge constante de Côté (Banton et al., 1991). Cette donnée correspond à la vitesse d'écoulement de l'eau dans un sol étant saturé d'eau. La longueur capillaire macroscopique ($1/\alpha$, exprimé α dans le logiciel) est une variable servant à décrire quantitativement la conductivité hydraulique non-saturée ($K(h)$) (Radcliffe et Simunek, 2010). Ce paramètre n'a pu être mesuré, mais la valeur élevée utilisée se justifie par la forte proportion de particules de diamètre supérieur à 2 mm et à la similitude des observations terrains et simulées. Un facteur de tortuosité (I) est utilisé (Radcliffe et Simunek, 2010). La valeur par défaut de 1 est conservée étant donné que cette dernière n'a pu être déterminée sur le terrain. La variable n est un paramètre de la fonction de rétention de l'eau du sol. Cette dernière est estimée en fonction de la composition texturale et la densité du sol ainsi que de θ_{cc} et θ_{sat} (Radcliffe et Simunek, 2010). Les valeurs de n ont été calculées par le logiciel HYDRUS.

Tableau 2. Paramètres physiques des sols utilisés pour la modélisation des simulations.

	θ_{cc}	θ_{sat}	α	n	K_s	I
	%	%			cm/h	
Champ 1						
0-10 cm	24,34	60,53	2,5	1,4772	20	1
10-20 cm	25,99	56,66	2,5	1,3795	20	1
20-30 cm	31,10	59,41	2,5	1,3128	20	1
Champ 2						
0-10 cm	26,60	53,44	2,5	1,4022	20	1
10-20 cm	31,81	53,06	2,5	1,3443	20	1
20-30 cm	34,60	47,01	2,5	1,4373	20	1

En plus des caractères physiques énumérés précédemment, d'autres informations d'importance doivent être incluses dans la création du domaine de transport dans lequel la modélisation, ou

simulation, aura lieu. Ces informations sont décrites ci-dessous, dans l'ordre auquel l'utilisateur du logiciel HYDRUS devra les fournir afin de créer un domaine de transport.

Une géométrie représentative de l'espace où le transport hydrique doit être simulé est nécessaire. Dans le cas de ce projet, l'espace investigué est une section (trois dimensions) ou une coupe transversale (deux dimensions) d'une butte de sol allant jusqu'à une profondeur de 33 cm, englobant ainsi les sondes TDR positionnées au plus profond de cette dernière (Figure 4). Le domaine de transport est constitué d'une demi-butte. Ce choix s'explique par une vitesse de calcul de la simulation plus rapide par le logiciel. L'hypothèse que l'écoulement de l'eau est symétrique de part et d'autre du tube de goutte à goutte doit donc être posée. Une telle schématisation a déjà été utilisée pour représenter le transport hydrique dans un contexte d'irrigation souterraine par goutte à goutte (subsurface drip irrigation (SDI)) (Assouline, 2002; Cote et al., 2003; Elmaloglou et Diamantopoulos, 2009; Hanson et al., 2008; Kandelous et al., 2011; Lazarovitch et al., 2007; Provenzano, 2007; Rodriguez-Sinobas et al., 2012; Skaggs et al., 2004). Les dimensions utilisées correspondent aux tailles observées au champ.

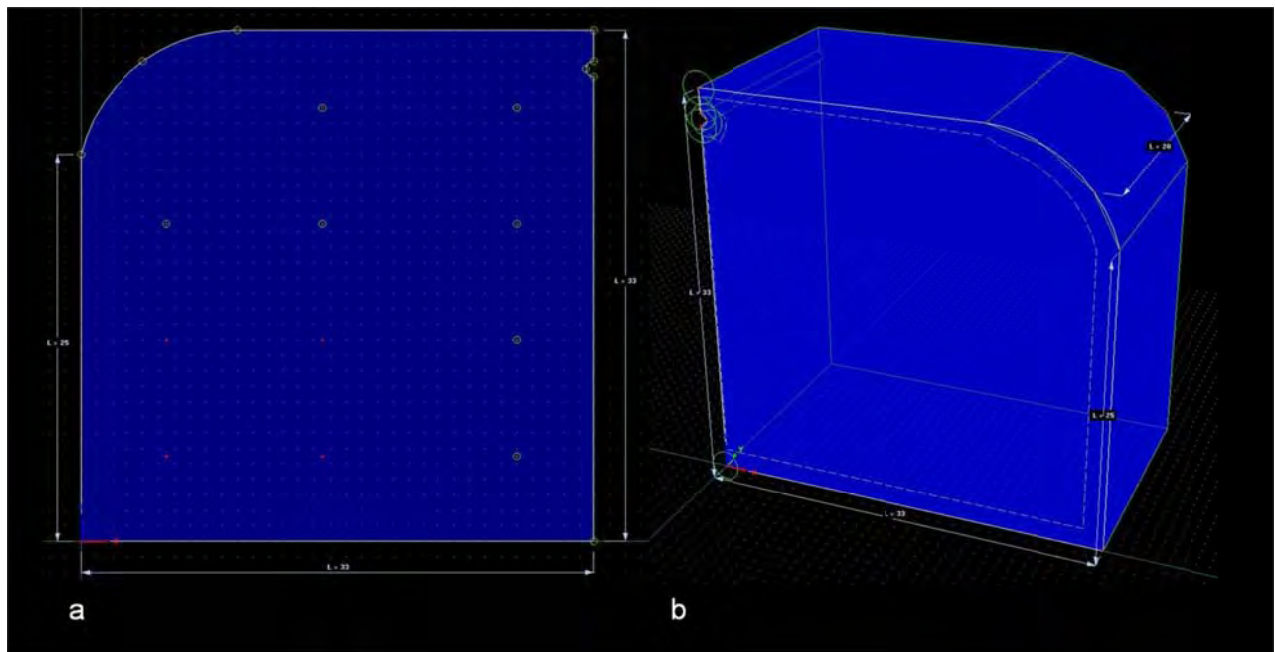


Figure 4. Géométrie des domaines (a. deux dimensions, b. trois dimensions).

Les propriétés du domaine doivent ensuite être établies. Ce dernier est divisé en trois profondeurs afin d'inclure les différentes valeurs des paramètres physiques cités précédemment (Figure 5). Une valeur théorique du prélèvement de l'eau par les racines, propre aux fraisiers, est fournie par le logiciel. La distribution racinaire est ensuite établie par l'utilisateur selon les axes du domaine (Figure 6). La profondeur maximale du système racinaire simulé est d'environ 15 cm. Cette profondeur a été considérée pour faciliter les simulations, malgré le fait que les racines de fraisiers dans ces sols peuvent être observées jusqu'à 30 cm de profondeur (Boivin et Deschênes, 2011). Des points d'observation sont disposés à l'intérieur du domaine afin d'avoir une valeur

précise de la teneur en eau et de la pression¹ (pressure head (cm)) à ces derniers tout au long de la simulation. Ces points sont visibles sur la représentation en deux dimensions du domaine à la Figure 4. Les valeurs mesurées au champ, correspondant au même positionnement des points d'observation, seront comparées à celles de la simulation. Des facteurs d'anisotropie peuvent être appliqués à l'ensemble ou à certaines parties du domaine afin de représenter plus adéquatement l'écoulement hydrique observé au champ. Dans le cadre des simulations effectuées, un facteur d'anisotropie (A2=5) a été appliqué à l'axe y, favorisant l'observation d'un transport vertical constaté au champ.

Les conditions initiales du domaine, soit exprimées en teneur en eau ou en pression, peuvent être disposées uniformément ou en fonction de la profondeur. Une pression variant linéairement en fonction de la profondeur, de -50 à -200 cm, est utilisée lors de la modélisation (Figure 7). La pression plus faible de -200 cm (\approx -20 kPa) se retrouve en surface du domaine et celle de -50 cm (\approx -5 kPa) aux points le plus bas du domaine. Ces conditions représentent adéquatement la tension du sol pouvant être observée précédemment à un épisode d'irrigation. Les conditions initiales exprimées en pression génèrent de meilleurs résultats, quant à une corrélation entre les données observées et simulées, comparativement à celles exprimées en teneur en eau.

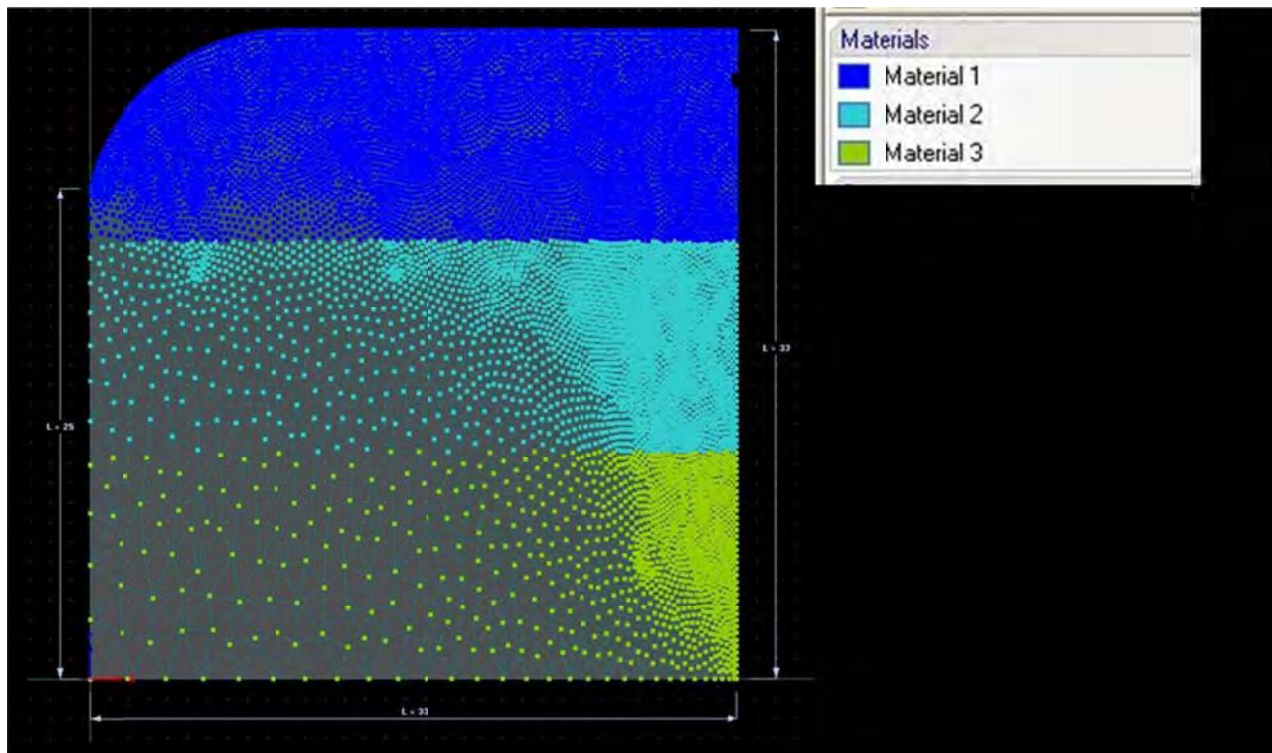


Figure 5. Propriétés du domaine: distribution des matériaux.

¹ La pression (ou pressure head), exprimée en cm, peut être convertie en potentiel (kPa) par la formule

$$\Psi_t = \rho_w g H$$

où Ψ_t potentiel total de l'eau du sol (kPa), ρ_w densité de l'eau à 25°C (997 kg/m³), g accélération gravitationnelle (9,81 m/s) et H pression (cm) (Radcliffe et Simunek, 2010).

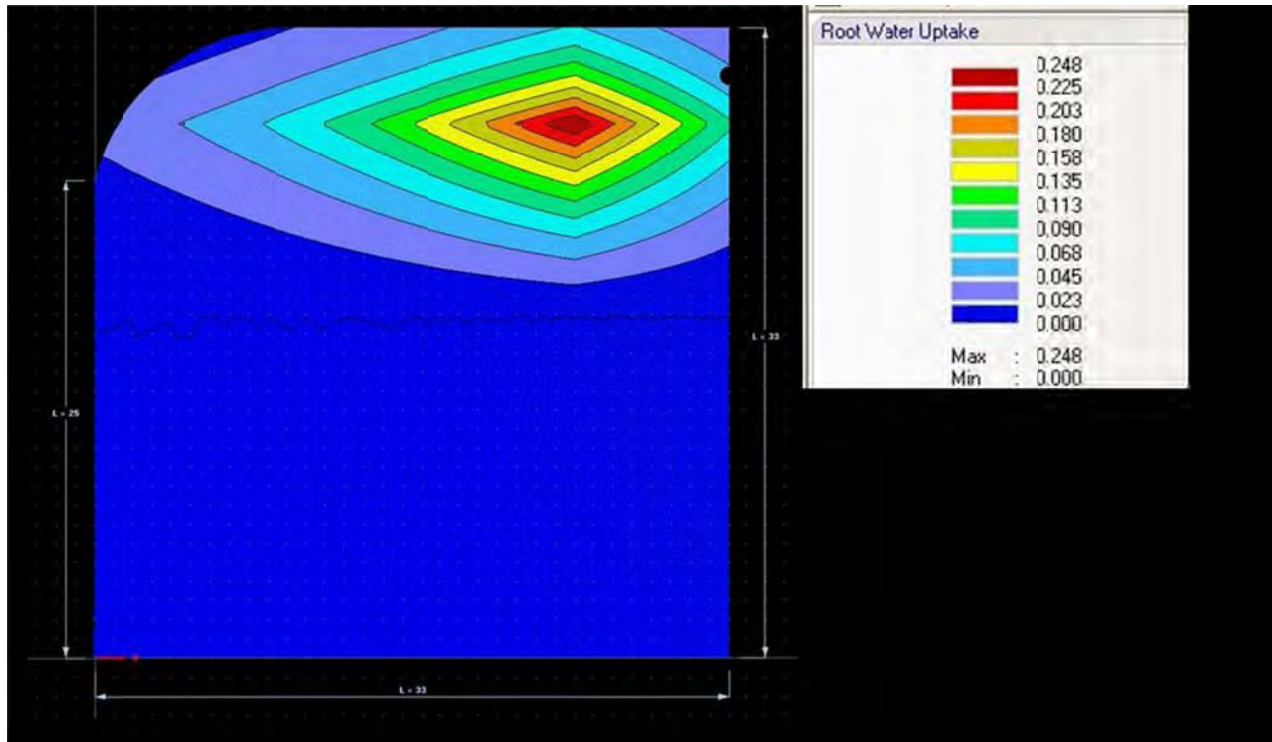


Figure 6. Propriétés du domaine: distribution du prélèvement en eau des racines.

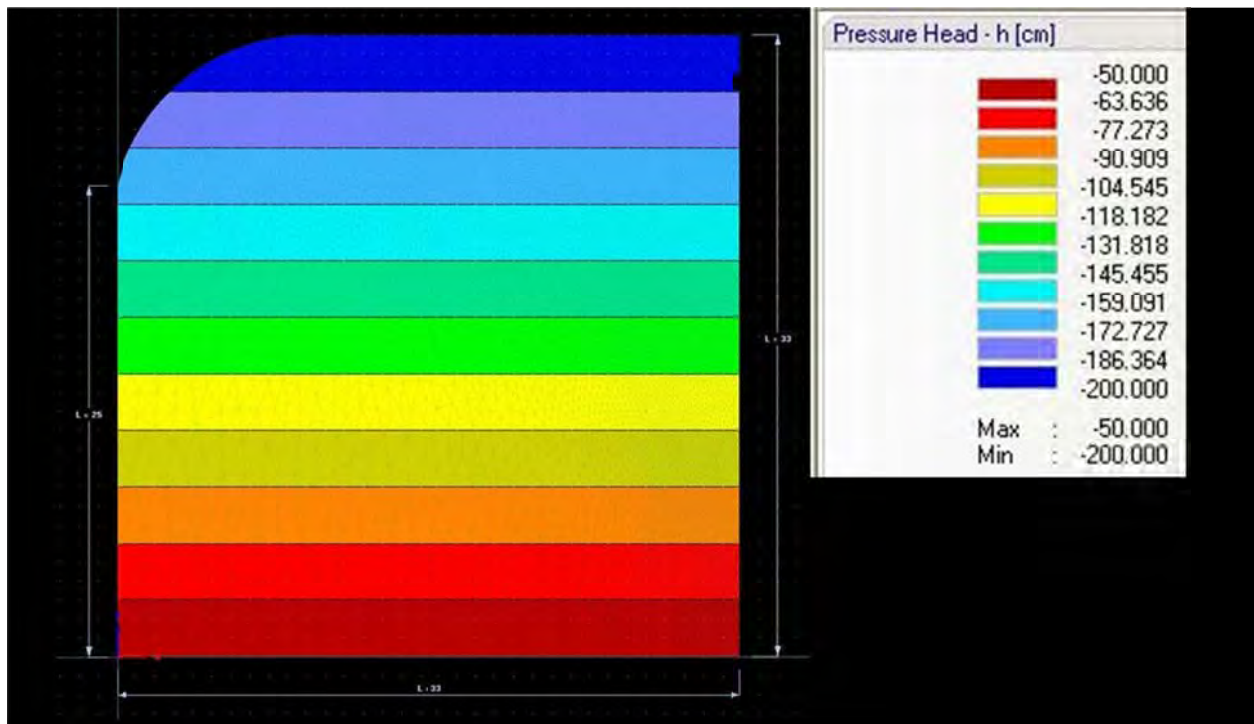
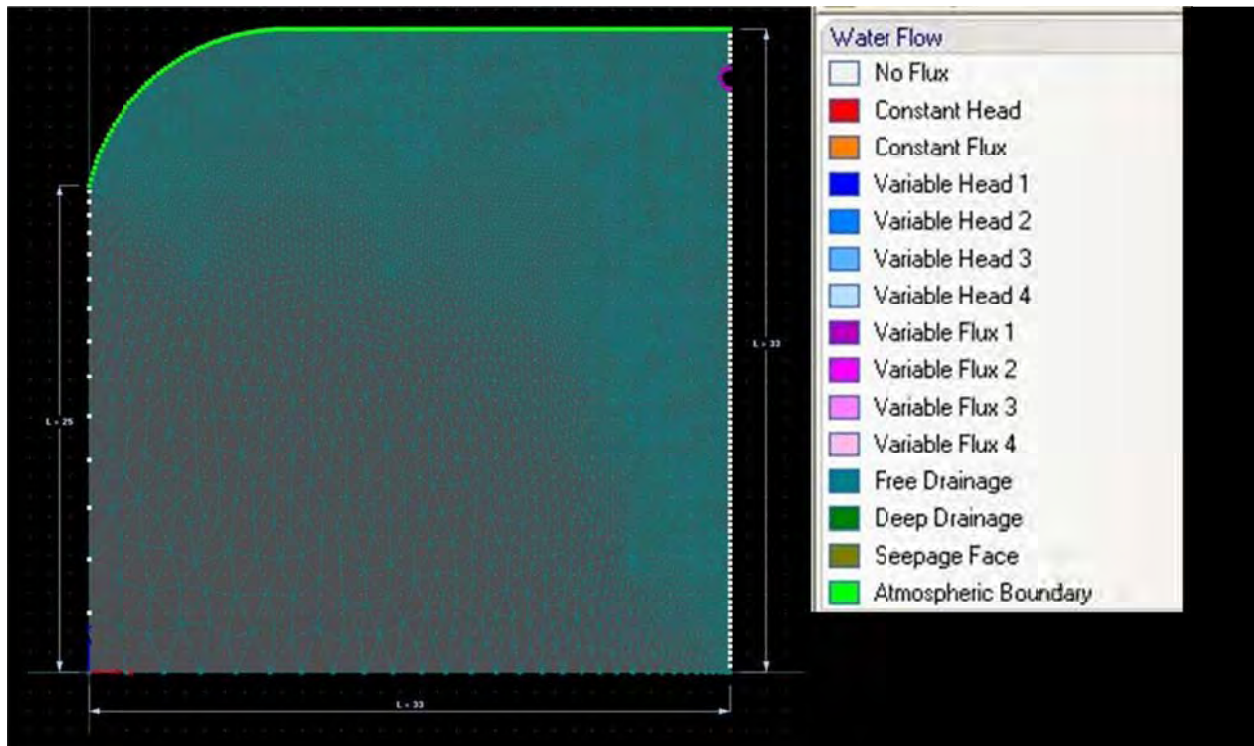


Figure 7. Conditions initiales exprimées en pression selon la profondeur.

Chaque bordure du domaine est considérée comme une limite. Afin de caractériser adéquatement le transport hydrique à l'intérieur du domaine, les limites doivent représenter les échanges s'effectuant entre l'intérieur et l'extérieur du domaine (Figure 8). La limite correspondant à la

surface du sol, recouvert du paillis de plastique, est en contact avec l'atmosphère, cependant aucune évaporation n'a été considérée. Les limites latérales ne laissent passer aucun flux afin de préserver l'aspect symétrique de l'écoulement hydrique. La limite du fond du domaine correspond à un drainage libre, laissant donc l'eau d'irrigation et du sol évoluer de part et d'autre de cette dernière. Le tube de goutte à goutte est représenté par une limite de flux variable. Autrement dit, aux moments représentant les irrigations, cette limite déverse une quantité d'eau représentative des irrigations effectuées au champ sur une durée d'une heure, durée utilisée au champ. Contrairement à un véritable goutte à goutte, la limite représentant ce dernier produit un flux sur l'ensemble de sa périphérie et non seulement par un point de contact sur le dessus de ce dernier. Cette représentation a été utilisée afin de conserver la procédure utilisée par plusieurs autres auteurs d'études (Cote et al., 2003; Kandelous et al., 2011; Provenzano, 2007; Radcliffe et Simunek, 2010; Rodriguez-Sinobas et al., 2012) ainsi que celle utilisée dans des documents de formation de PC-Progress pour le logiciel HYDRUS. Pour le domaine en trois dimensions, l'espacement entre les goutteurs peut être représenté en sélectionnant les nœuds appropriés sur la limite correspondant au tube de goutte à goutte. La conversion du débit d'irrigation en litre par minute par dix mètres (l/min/10m) théorique au débit appliqué sur l'ensemble de la limite est présentée en annexe de ce document. Les débits appliqués pour les tubes de goutte à goutte avec espacement entre les goutteurs de 30 cm et de 20 cm sont de 9,55 cm par heure (cm/h) et de 7,63 cm/h respectivement.



5.1.2. Simulations du transport hydrique suite à des épisodes d'irrigation

Grâce aux paramètres appliqués aux domaines créés, des simulations du transport hydrique sont générées. Plusieurs données sont ainsi visualisables : la teneur en eau volumique, la pression (ou tension), les vecteurs de vitesse et le prélèvement de l'eau des plants. Les variations de teneur en eau volumique ainsi que de la pression sont présentées ci-dessous (Figure 9 et Figure 10) pour les champs 1 et 2 respectivement. Les périodes affichées correspondent à l'état initial du sol (T=0h), au moment du premier épisode d'irrigation (T=10h champ 1, T=11h champ 2) et au temps situé entre le premier et le deuxième épisode d'irrigation. Une augmentation de la teneur en eau volumique est observable directement sous le goutteur lors de la période d'irrigation. L'augmentation se produit principalement en profondeur et atteint le bas du profil de sol pour les deux champs. Par des différences texturales entre les deux sites, une teneur en eau volumique plus importante se bâtit dans l'horizon 10-20 cm dans le domaine du champ 2, dès le premier épisode d'irrigation. Un faible transport hydrique latéral s'effectue lentement suite à l'apport d'eau d'irrigation qui permet une humectation d'une zone d'un volume approximatif du tiers de la demi-butte pour une augmentation de teneur en eau volumique maximale de $0,05 \text{ cm}^3$ de d'eau par cm^3 de sol. La variation de pression est également observable et une saturation du sol, correspondant à la zone située sous le goutteur, se produit lors de l'épisode d'irrigation. Un assèchement est observable à l'endroit où un maximum de prélèvement d'eau par la plante est présent (voir Figure 6). Ce prélèvement a pour effet de hausser la pression, malgré les apports d'eau par irrigation. Cette zone d'assèchement, principalement pour le champ 1, tend à se déplacer vers l'extrémité supérieure de la demi-butte. Cette observation correspond à la problématique d'assèchement du sol sur les côtés de la butte de sol énoncée dans la mise en situation du projet.

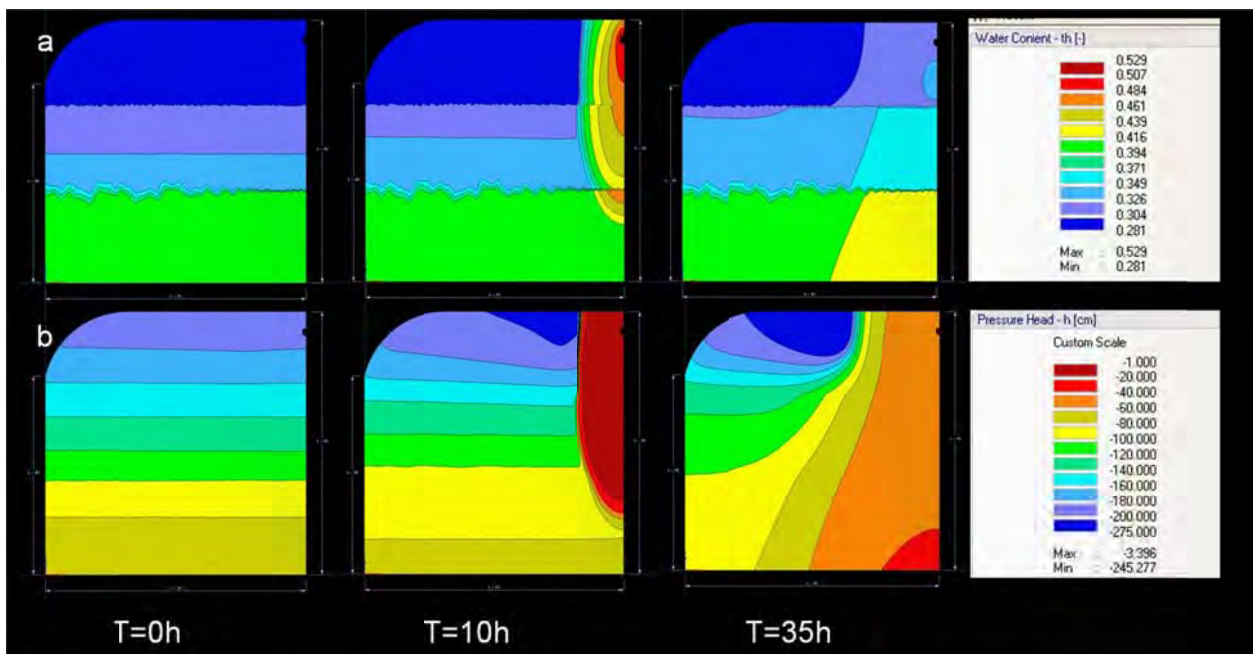


Figure 9. Évolution de la teneur en eau volumique (a) et de la pression (b), champ 1.

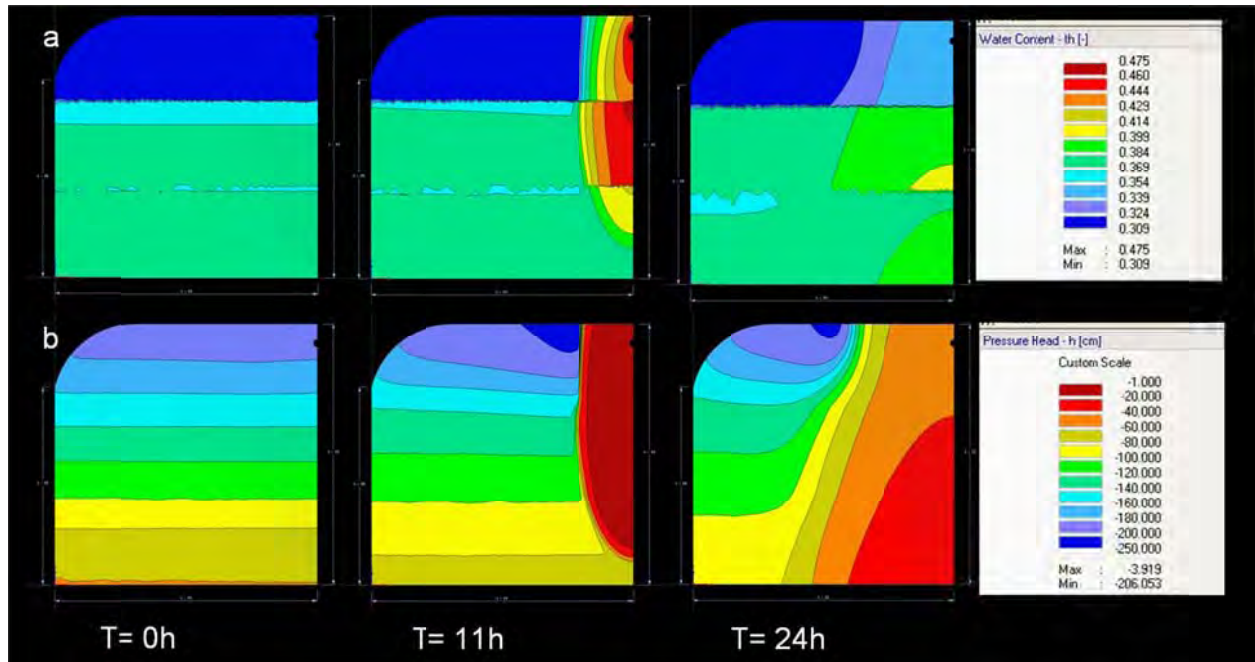


Figure 10. Évolution de la teneur en eau volumique (a) et de la pression (b), champ 2.

5.2. Comparer l'approche prévisionnelle (HYDRUS) avec des mesures quantitatives (TDR)

5.2.1. Données observées

Les principales données utilisées dans cette expérimentation sont les valeurs de teneur en eau volumique exprimées en cm^3 d'eau par cm^3 de sol (θ_v). Ces dernières ont été mesurées du 29 juin au 28 octobre 2011 pour les 4 sites par les 66 sondes TDR. Différentes périodes ont été ciblées suivant certaines considérations techniques qui doivent être soulignées. Ce projet vise à évaluer l'efficacité du logiciel HYDRUS à produire des simulations de transport de l'eau d'irrigation dans le sol et à comparer ces dernières aux situations observées dans le champ. Des périodes sans précipitations, incluant des épisodes d'irrigation, ont donc été ciblées. Les périodes du 9 au 12 septembre 2011 et du 4 au 8 août 2011 ont été choisies pour le champ 1 et 2 respectivement. Ces périodes de quelques jours se prêtent bien aux simulations du logiciel, afin que ces dernières offrent une meilleure précision ainsi qu'un temps de calcul adéquat.

Les variations de teneur en eau volumique sont présentées dans les figures suivantes (Figure 11 à Figure 16). Chaque figure affiche les mesures effectuées par les 11 sondes, correspondant à une moitié de butte, dont la disposition est présentée à la Figure 1. Le premier chiffre correspond au champ. Les épisodes d'irrigation sont représentés par des histogrammes. Ces derniers sont clairement visibles par une augmentation marquée et rapide de la teneur en eau volumique pour certaines sondes. Ces dernières sont les 3, 6, 9, 10, 12, 14, 17, 20, 23, 25, 28, 31, 32 pour le champ 1 et les 1, 3, 6, 9, 12, 14, 17, 20, 23, 25, 28, 31 pour le champ 2. Ces sondes correspondent à la zone de sol étant directement sous le goutteur indiquant donc un transport de l'eau

principalement vertical. Cette observation a également été notée par Boivin et Deschênes (2011) lors d'une étude précédente dans le même type de sol.

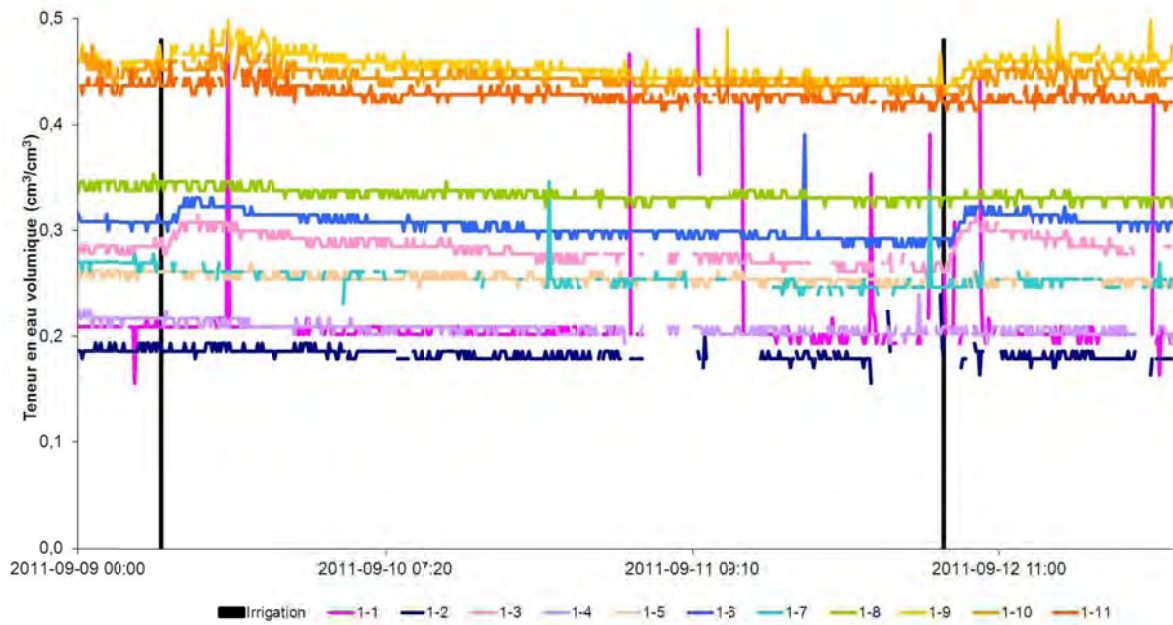


Figure 11. Variations de la teneur en eau volumique des sondes 1-1 à 1-11 du 9 au 12 septembre 2011.



Figure 12. Variations de la teneur en eau volumique des sondes 1-12 à 1-22 du 9 au 12 septembre 2011.

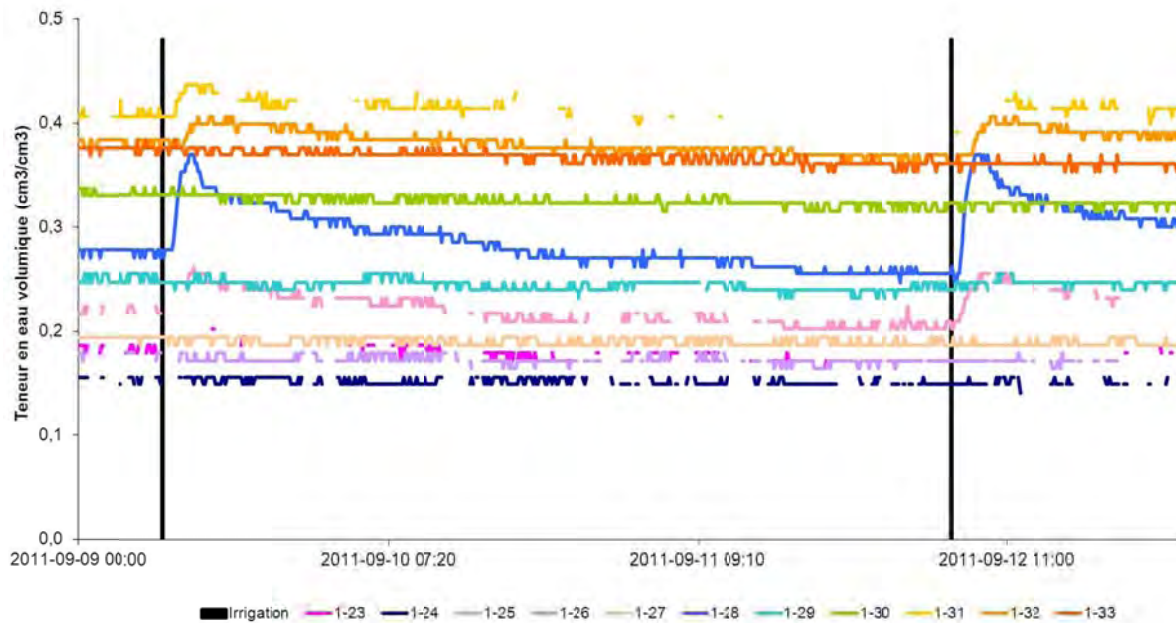


Figure 13. Variations de la teneur en eau volumique des sondes 1-23 à 1-33 du 9 au 12 septembre 2011.

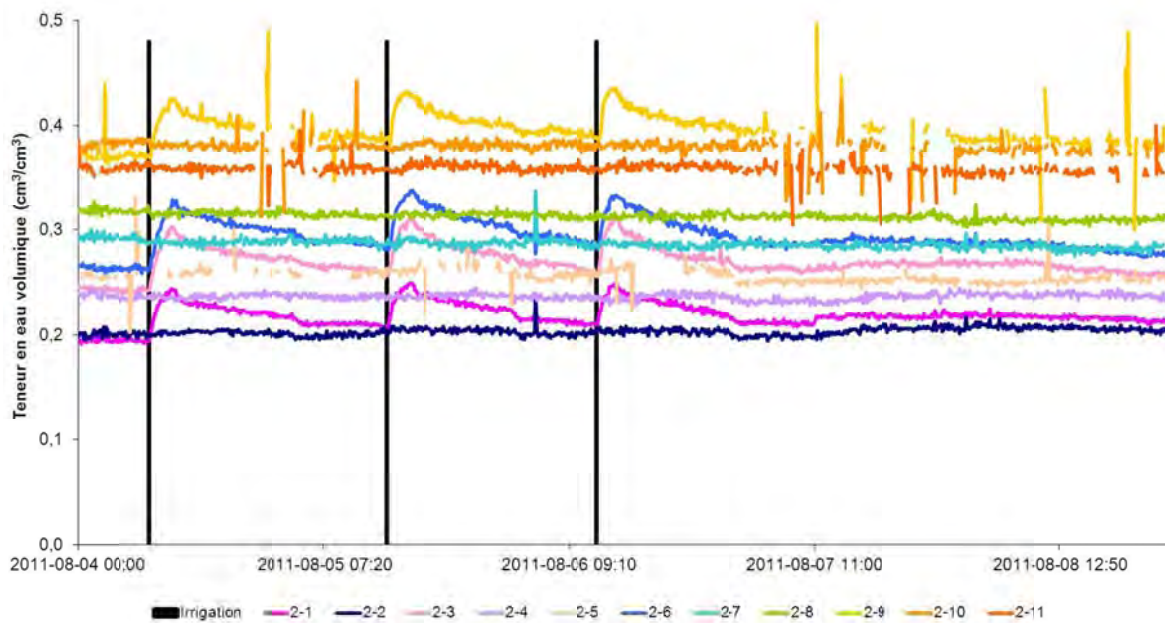


Figure 14. Variations de la teneur en eau volumique des sondes 2-1 à 2-11 du 4 au 8 août 2011.

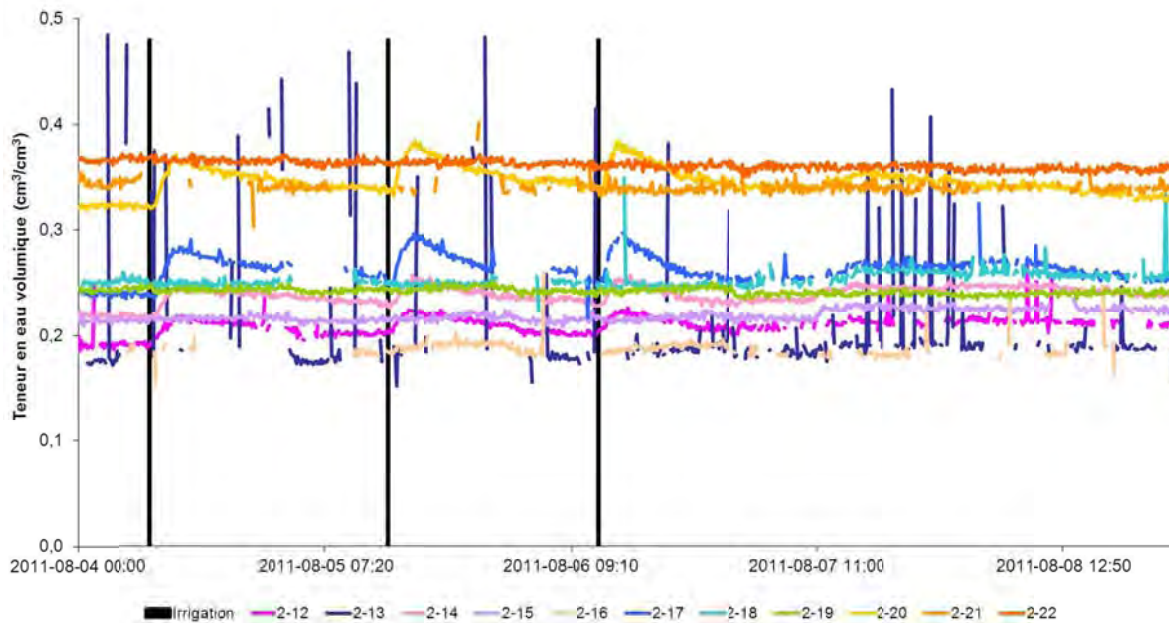


Figure 15. Variations de la teneur en eau volumique des sondes 2-12 à 2-22 du 4 au 8 août 2011.

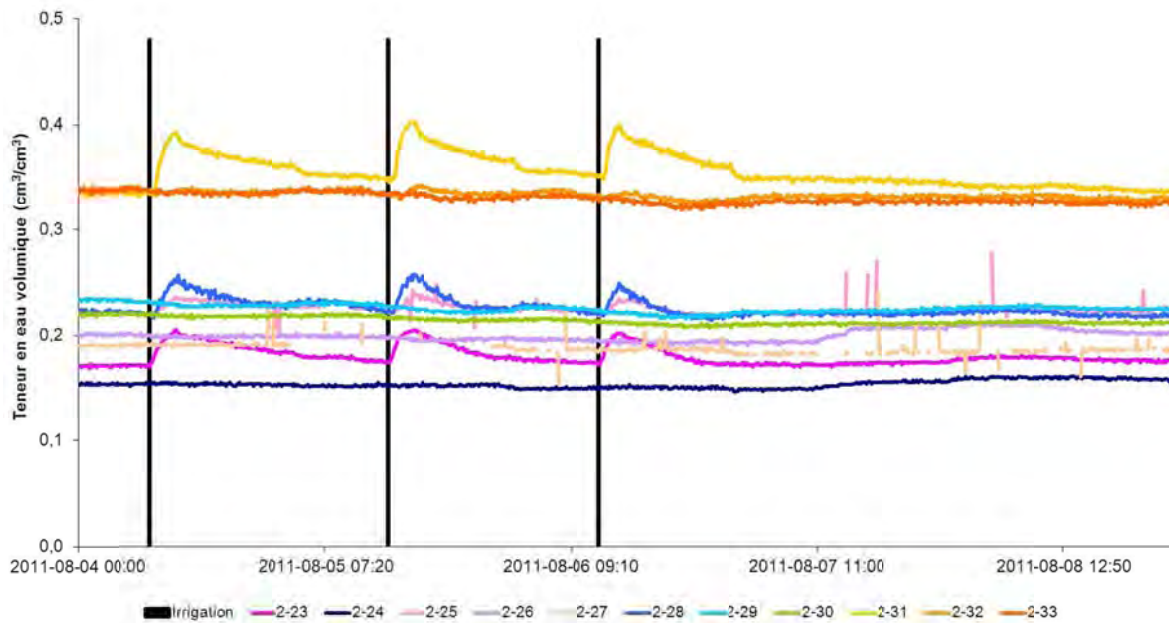


Figure 16. Variations de la teneur en eau volumique des sondes 2-23 à 2-33 du 4 au 8 août 2011.

La tension a été mesurée pour l'ensemble de la saison par des tensiomètres positionnés identiquement aux sondes TDR dans la demi-butte contenant les sondes TDR 1-1 à 1-11 (Figure 17). Les variations de tension sont facilement observables lors des épisodes d'irrigation (baisse de tension) et après ces dernières (hausse de tension). Ces variations correspondent à celles observées grâce aux sondes TDR. Une autre similitude entre les valeurs de tension et de teneur en eau volumique s'observe quant à l'absence ou la présence de variations pour certaines zones du sol. Généralement, les zones démontrant des variations de teneur en eau volumique démontreront également des variations de tension. Cependant, la zone 1-7 subit une baisse de tension suite aux

épisodes d'irrigation sans démontrer une hausse de teneur en eau. Cette observation peut s'expliquer par la nature de la courbe de désorption de ce sol (Figure 18). Lorsque la teneur en eau du sol correspond à une valeur de tension supérieure à la capacité au champ, la courbe de désorption présente un plateau. Lors de cette situation, une très grande variation de tension ne résultera qu'en une très faible variation de la teneur en eau volumique et, inversement, une légère variation de teneur en eau volumique provoquera une forte variation de tension. Ainsi, par la nature du sol, il est plausible de constater une légère, ou absente, variation de teneur en eau volumique suite à un épisode d'irrigation. Les valeurs de tension des tensiomètres correspondant aux positions 4, 5, 6 et 8 ne sont pas présentées, car ces derniers étaient hors fonction. Cette situation s'explique par une accessibilité très réduite aux tensiomètres lorsqu'ils sont enfouis et par leur positionnement très rapproché. Pour accéder à un tensiomètre hors fonction, le positionnement de plusieurs tensiomètres en bon état risquait fortement d'être perturbé, risquant d'obtenir des valeurs biaisées.

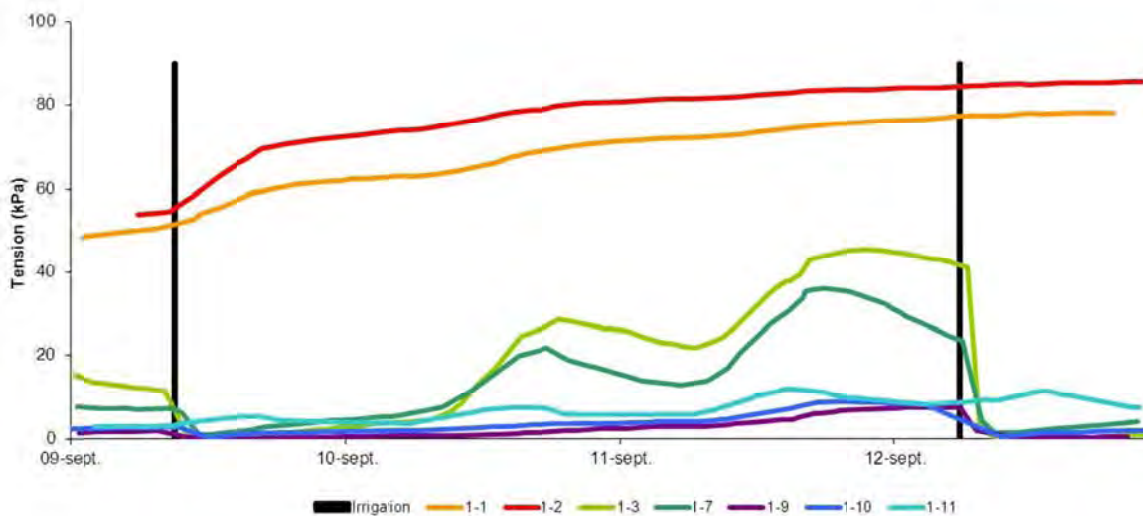


Figure 17. Variations de tension (kPa) entre les positions 1-1 à 1-11 du 9 au 12 septembre 2011.

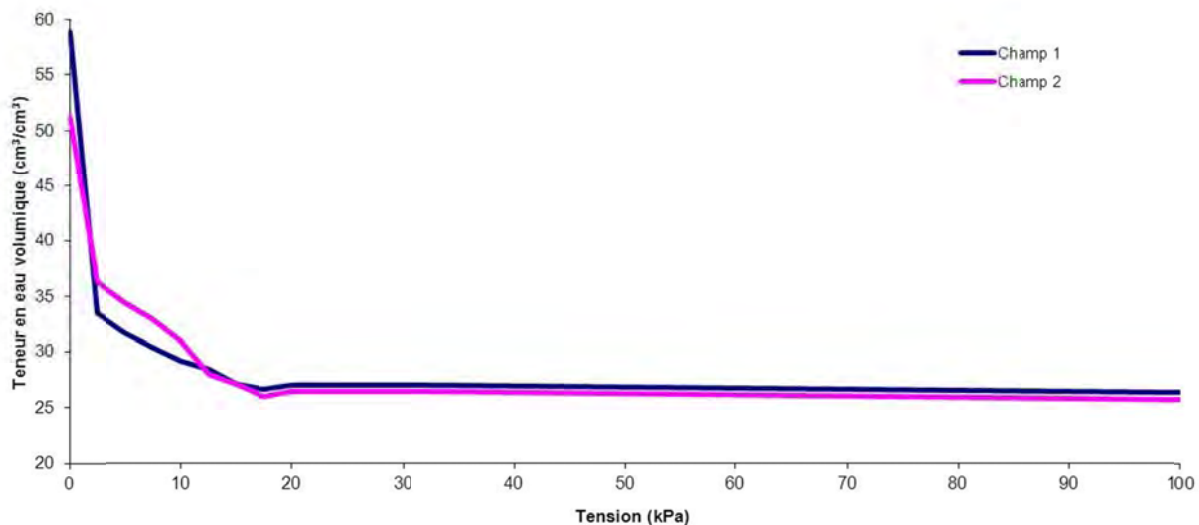


Figure 18. Courbes de désorption moyennes des 3 profondeurs pour les champs 1 et 2.

5.2.2. Régressions entre les valeurs observées et simulées

Comme mentionnées précédemment, les conditions initiales du sol ont été considérées dans les paramètres de la modélisation du sol dans le logiciel HYDRUS. Les épisodes d'irrigations simulées ont été positionnés dans le temps aux moments observés au champ. La simulation génère des résultats aux heures durant 96 ou 120 heures pour le champ 1 et 2 respectivement, qui englobe les épisodes d'irrigation. Les données au champ utilisées sont donc celles également observées aux heures pour un total de 96 ou 120 données par sonde TDR, donc 858 ou 1320 données par demi-butte. Des domaines en deux dimensions seulement ont pu être modélisés afin de les comparer aux données terrains. Le logiciel HYDRUS ne permet pas cette fonction pour les domaines en trois dimensions. Les valeurs de régressions entre les données de teneur en eau volumique observées et simulées sont présentées au Tableau 3. Les différentes simulations pour le champ 1 ont fait ressortir de fortes similitudes entre les données observées et simulées. Effectivement, des valeurs de coefficient de détermination comprises entre 0,69 et 0,81 révèlent que les résultats générés par le logiciel HYDRUS, pour ce champ, étaient très près de la réalité, et ce malgré la différence entre les espacements des goutteurs. L'effet de l'espacement des goutteurs, entre 20 ou 30 cm, ne semble pas avoir influencé grandement la répartition hydrique à l'intérieur de la butte de sol. La demi-butte contenant les sondes D1-1 à E1-3 était irriguée par un tube avec des espacements entre les goutteurs de 20 cm, le R^2 obtenu suite à la simulation était de 0,75. La même simulation, mais avec un espacement de 30 cm, retournait une valeur de R^2 de 0,74, soit presque le même résultat que la simulation propre au système d'irrigation en place.

Ces résultats ne se sont pas reproduits pour le champ 2, par l'obtention de coefficients de détermination faibles variant entre 0,08 et 0,25. Cette situation peut être expliquée en partie par l'analyse physique de l'échantillon de sol représentant le champ 2. La valeur de θ_{sat} de l'horizon 10-20 cm est très similaire à la valeur de l'horizon 0-10 cm (Tableau 2). Cette similitude entre ces deux valeurs fait en sorte de créer une accumulation d'eau à l'intérieur du deuxième horizon, contrairement à ce qui est observé dans les simulations du champ 1 (Figure 19). L'horizon 20-30 cm du champ 2 possède une valeur de teneur en eau à la saturation plus faible que celle observée dans celle de 10-20 cm. Il est donc normal d'observer une accumulation d'eau à la jonction des deux horizons, étant donné la capacité de rétention de l'eau supérieure de l'horizon 10-20 cm. La même tendance est observable quant aux valeurs de corrélations lors d'une modification de la valeur réelle de l'espacement entre les goutteurs, telle que mentionnée pour le champ 1. Effectivement, la valeur de R^2 diminuait à 0,15 en simulant un espacement de 20 cm, contrairement à la situation réelle d'un espacement de 30 cm. Des valeurs de K_s légèrement plus faibles auraient pu faire en sorte d'améliorer les résultats de corrélations pour ce champ. Les valeurs de densité observées, plus élevées pour l'ensemble des échantillons de sol, peuvent faire en sorte de ralentir le transport de l'eau en profondeur.

Tableau 3. Régressions entre les valeurs observées et simulées de teneur en eau volumique.

Demi-butte	Espacement	R ²
	cm	
Champ 1		
A1-1 à B1-3	30	0,81
B1-4 à C1-6	30	0,69
D1-1 à E1-3	20	0,75
Champ 2		
A2-1 à B2-3	20	0,25
B2-4 à C2-6	20	0,08
D2-1 à E2-3	30	0,16

Ces résultats démontrent l'importance des différents paramètres physiques des échantillons de sol prélevés. Presque la totalité des échantillons prélevés a été décrite comme ayant une texture de loam sablo-argileux. De plus, les valeurs de teneur en eau à la capacité au champ et à la saturation possèdent toutes le même ordre de grandeur. Malgré toutes ces similitudes, les simulations propres au champ 2 n'ont pas révélé de corrélations satisfaisantes comparativement au champ 1. La forte hétérogénéité des sols permet d'affirmer que des échantillons prélevés à un endroit différent du champ 2 auraient pu permettre d'obtenir des comparaisons, entre les données observées et simulées, plus fortes. Les données observées du champ 2 ont été comparées avec les données simulées du champ 1. Les valeurs de corrélation obtenues étaient similaires à celles obtenues par les valeurs observées et simulées du champ 1, soit des coefficients de détermination forts. Cette comparaison fait ressortir une très forte ressemblance entre le transport hydrique mesuré dans les deux champs à l'étude, malgré les faibles corrélations entre les valeurs simulées et observées du champ 2.

Les représentations graphiques des valeurs de pression (Figure 9b et 10b) démontrent que le transport de l'eau d'irrigation apporte cette dernière aux abords de la limite inférieure de la butte de sol après une période d'une dizaine d'heures. Le front d'humectation observé grâce aux sondes TDR permet d'affirmer que cette période est plutôt de seulement quelques minutes. En effet, les augmentations de teneur en eau relatives au passage de l'eau d'irrigation sont visibles par des pics très bien dessinés de sondes TDR citées précédemment. Ces pics surviennent aux mêmes moments pour les sondes TDR localisées en surface et en profondeur, démontrant un transport vertical beaucoup plus rapide que celui apparaissant dans les simulations. Une telle observation permet d'affirmer que les simulations n'ont pu reproduire avec exactitude le délai de migration de l'eau à l'intérieur du sol.

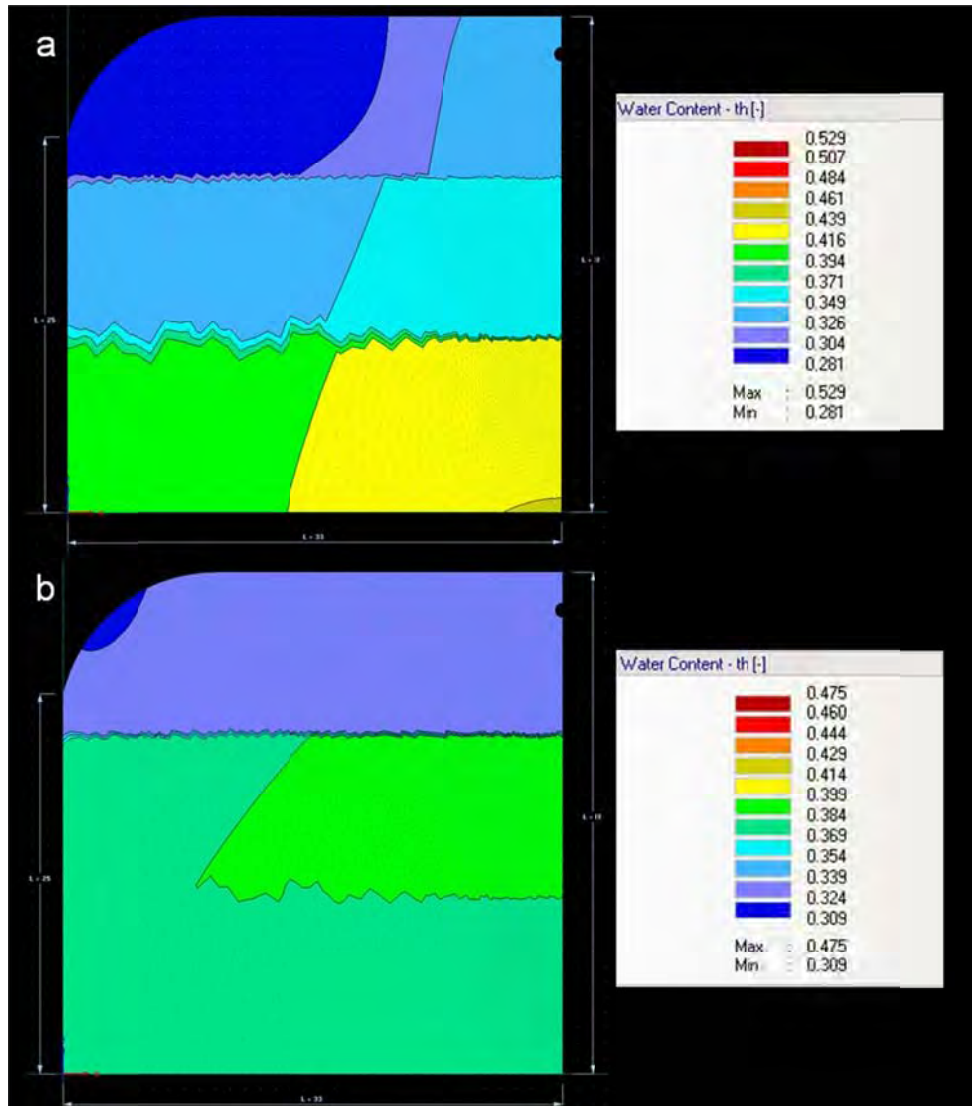


Figure 19. Distribution de la teneur en eau volumique post-irrigation (a. champ 1 T=96h, b. champ 2 T=120h).

5.3. Prévenir le lessivage des éléments minéraux en limitant le volume d'eau d'irrigation qui atteint la zone de sol inexplorée par les racines

Les simulations permettent de visualiser le transport hydrique, tel qu'observé précédemment. Les débits et volumes d'irrigation peuvent être modifiés afin d'empêcher ou de diminuer le lessivage des éléments minéraux. À titre d'exemple, pour le champ 1, une légère différence est visuellement observable entre les deux espacements entre les goutteurs (Figure 20). La profondeur d'augmentation de teneur en eau volumique et de saturation en eau, suite à la durée d'irrigation (T=10h), est moindre pour le système d'irrigation appliquant 7,63 cm/h (espacement de 20 cm) comparativement à celui appliquant 9,55 cm/h (espacement de 30 cm). Cette différence n'est cependant que d'une profondeur d'environ 4 cm et n'est plus visible 2 heures suivant l'irrigation. Pour ces simulations, représentant un sol à fort potentiel drainant, cette différence d'espacement ne diminuerait que de peu le lessivage d'éléments minéraux présents

dans la phase liquide du sol, tels les nitrates. Des simulations d'un autre sol, avec des valeurs de K_s plus faibles, renverraient des patrons de transport hydrique probablement fort différents que ceux observés dans ce projet, signifiant que des différences d'espacement entre les goutteurs du même ordre pourraient générer des améliorations quant au lessivage potentiel de ces derniers éléments.

Le logiciel HYDRUS permet la simulation du transport hydrique en trois dimensions. Outre le fait que ce mode ne permette pas la comparaison entre des données observées et celles simulées, cette représentation permet d'obtenir de l'information quant à la gestion de l'irrigation par les tensiomètres. Effectivement, le positionnement de cet appareil est important, car il doit représenter les conditions hydriques du sol entourant le système racinaire des plants cultivés. Les représentations en trois dimensions permettent d'apprécier l'évolution de la teneur en eau et de la pression (ou tension) en fonction des paramètres du système d'irrigation par goutte à goutte. Une zone de positionnement du tensiomètre peut donc être localisée visuellement grâce aux simulations (Figure 21). Dans le cas d'un espacement de 20 cm entre les goutteurs, une pression supérieure persiste entre les points d'apport d'eau comparativement à un espacement de 10 cm. Ces conditions plus sèches se répercutent aussi latéralement, vers le positionnement des plants, observable par la convergence de la zone de pression de -300 à -200 cm (couleur verte) vers la position du tube de goutte à goutte. Cette observation met en évidence l'importance du positionnement du tensiomètre en relation avec celui des goutteurs.

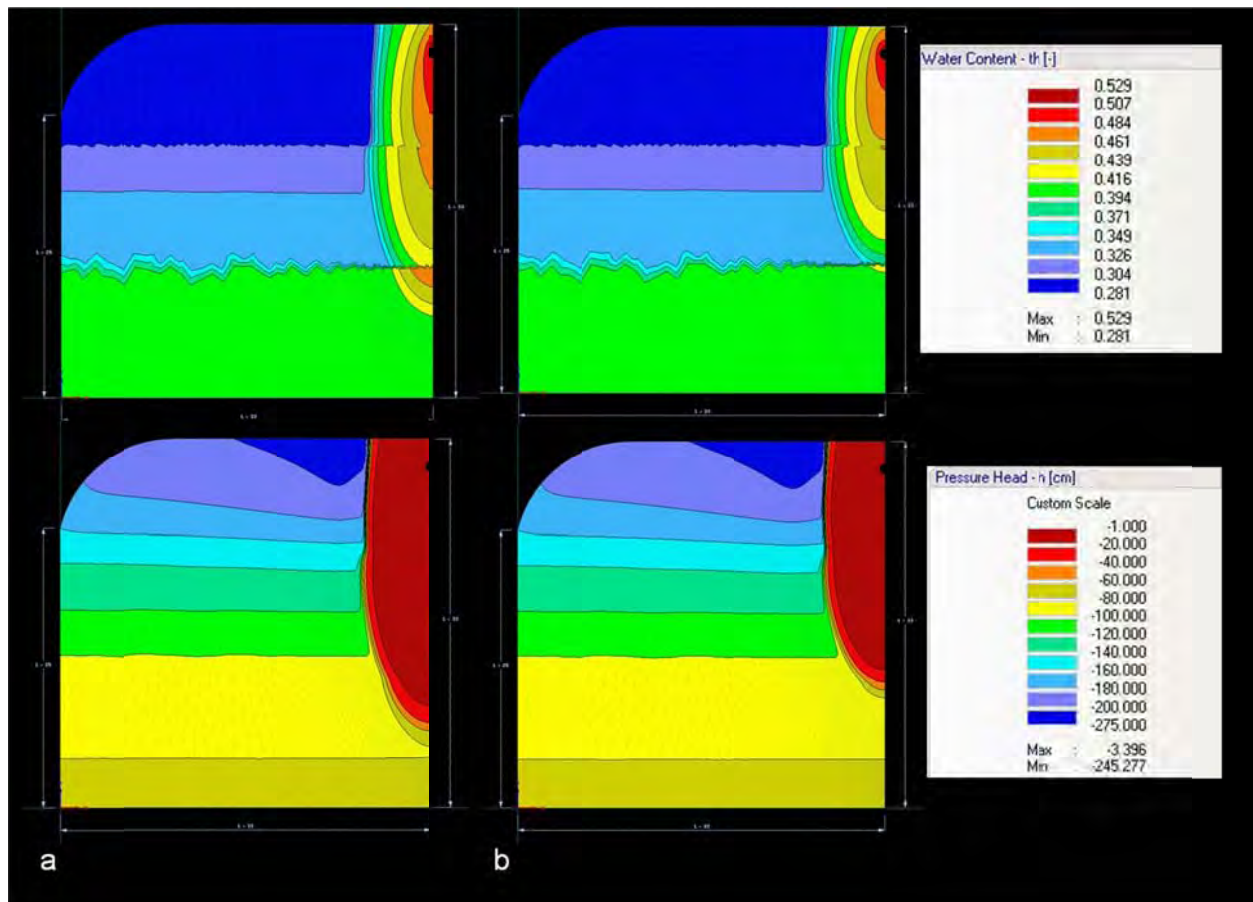


Figure 20. Comparaison de la teneur en eau volumique et de la pression entre les différents espacements entre les goutteurs, champ 1 (a. espacement 30 cm, b. espacement 20 cm).

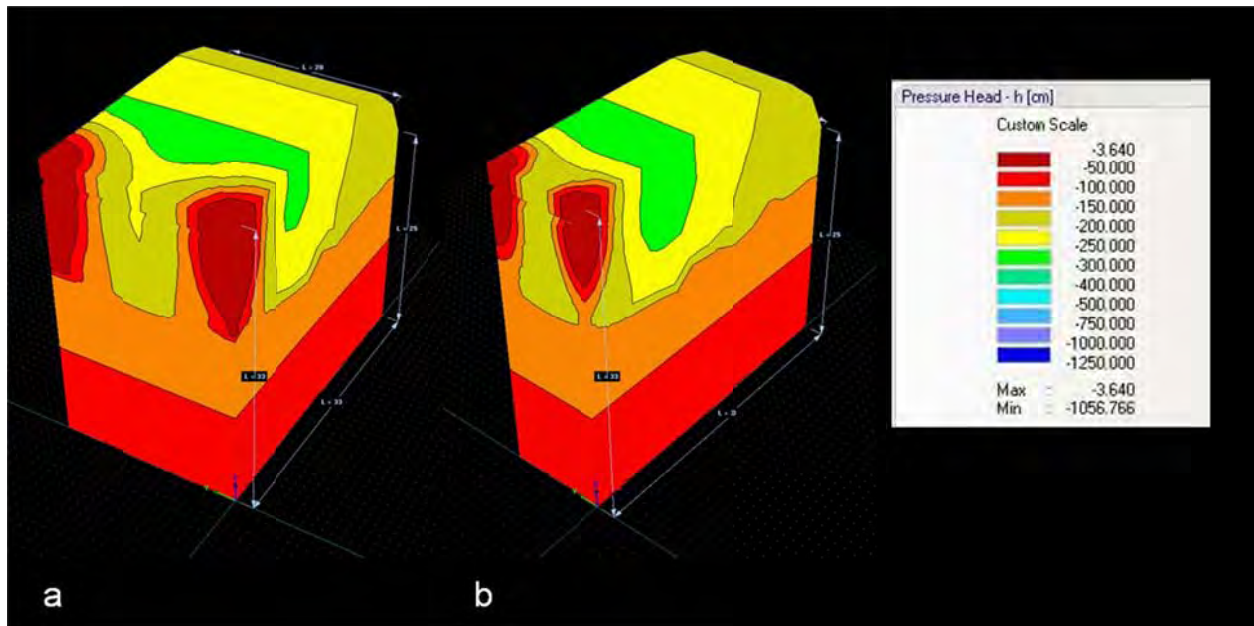


Figure 21. Représentation en trois dimensions de la pression de l'eau dans le sol suite à un épisode d'irrigation (a. espacement goutteurs 20 cm, b. espacement goutteurs 10 cm).

5.4. Proposer une méthode d'utilisation basée sur un nombre limité de caractéristiques physiques du sol à considérer

Plusieurs caractéristiques physiques des sols ont dû être considérées dans le cadre de ce projet afin de représenter adéquatement le transport hydrique suivant plusieurs épisodes d'irrigation, par un système goutte à goutte. Ces derniers sont : la texture, la proportion de particules de diamètre supérieur à 2 mm, la densité apparente, la conductivité hydraulique saturée et les valeurs de teneur en eau volumique à la capacité au champ, à la saturation et au point de flétrissement permanent. Afin que les simulations soient réalistes, par l'obtention de corrélations fortes ($R^2 \approx 0,70$), certains de ces paramètres se sont avérés nécessaires pour raffiner ces dernières.

Les sols à l'étude démontraient de fortes proportions de particules de diamètre supérieur à 2 mm qui font en sorte d'accentuer leur caractère drainant. En effet, ce caractère serait beaucoup moins important en ne considérant que la texture, d'un loam sablo-argileux, mais le transport hydrique n'aurait pu être similaire à celui observé au champ. Cet effet mentionné peut être quantifié par K_s , car les valeurs *in situ* de K_s mesurées sont plutôt de l'ordre d'un sable (Radcliffe et Simunek, 2010). Effectivement, par l'utilisation de la valeur de K_s mesurée, l'effet des macropores, résultant de ces particules à diamètre élevé, est considéré. Ainsi, des comportements propres à des sols de texture plus légère s'appliquent au loam sablo-argileux étudié.

Le logiciel HYDRUS utilise les valeurs de teneur en eau volumique à la capacité au champ et à la saturation afin de générer les simulations. Ces deux paramètres peuvent être obtenus par la densité apparente et la texture du sol provenant d'une banque de données propre à plusieurs résultats d'études antérieures. Des valeurs de teneurs en eau volumiques propres aux sols à l'étude sont favorables afin d'obtenir des résultats étant les plus fidèles aux observations faites au champ.

La valeur de teneur en eau volumique à la capacité au champ doit représenter la véritable capacité au champ *in situ* et non la valeur théorique obtenue à une tension de 33 kPa couramment utilisée, sous peine d'obtenir des résultats inadéquats. Afin d'obtenir cette valeur, une courbe de désorption doit être tracée. Cette dernière met en relation la teneur en eau volumique et la tension du sol étudié. La tension à la capacité au champ peut être mesurée par un tensiomètre de 24 à 48 heures suivant des précipitations ayant saturé le sol et lors d'une absence d'évapotranspiration. En situant cette dernière valeur sur la courbe de désorption, la véritable valeur de teneur en eau volumique à la capacité au champ peut ainsi être connue. La texture est également un paramètre d'importance quant à la mise en place d'hypothèses si jamais les paramètres nécessaires à la génération des données simulées doivent être raffinés.

Les paramètres d'importance à considérer pour optimiser les simulations de transport hydrique, face aux observations faites au champ, sont la courbe de désorption, afin de cibler les valeurs de teneur en eau volumique à la saturation et à la capacité au champ, la conductivité hydraulique saturée ainsi que la texture. Ces paramètres peuvent être facilement obtenus par l'entremise d'un laboratoire agricole d'analyses physiques, tel que le laboratoire d'analyses agroenvironnementales de l'IRDA². La conductivité hydraulique saturée peut aussi être mesurée au champ grâce à un infiltromètre.

Tel que mentionné précédemment, une importante considération quant aux points d'échantillonnage du sol doit être portée. Ces échantillons doivent être représentatifs des phénomènes observés et mesurés grâce aux différentes sondes introduites au champ. Toutefois, le sol est un milieu fortement hétérogène, ainsi des différences peuvent quand même survenir entre les données observées et simulées. Plusieurs méthodes d'échantillonnage sont présentées dans le Guide de référence en fertilisation du CRAAQ (2003). De plus, s'informer auprès du laboratoire qui effectuera les analyses afin d'être au fait de la méthode adéquate de prélèvement et de conservation des échantillons peut être également à considérer.

Suite à l'obtention des résultats des diverses analyses, le processus de simulation des données peut débiter par l'utilisation du logiciel HYDRUS. Ce logiciel a été utilisé par de nombreuses équipes de recherche dans plusieurs pays, qui a démontré la pertinence et la rigueur des résultats produits par ce dernier. Cependant, son utilisation s'adresse à des personnes bien au fait des divers concepts de la physique et de l'hydrodynamique des sols ainsi que de la modélisation en deux et trois dimensions. Un utilisateur novice en ces divers domaines aura fort probablement des difficultés à produire des simulations se rapprochant d'observations terrains quantifiées. Pour les intervenants agricoles possédant cependant de telles connaissances, le logiciel HYDRUS se révélera un outil intéressant lors de l'élaboration d'un système d'irrigation. Toutefois, aucune recommandation quant à l'établissement d'un système d'irrigation ainsi que de sa gestion ne devrait émaner de simulations produites par le logiciel HYDRUS, préalablement à une observation détaillée du transport hydrique réel au champ. Effectivement, tel que démontré dans

² 2700, Einstein, Québec, Qc G1P 3W8

Bureau de réception : B.1.205 (attn : Emmanuel Gagné ou Patrick Dubé)

Téléphone : 418 643-2380 poste 810

Télécopieur : 418 644-6855

Courrier électronique : patrick.dube@irda.qc.ca

Site internet : <http://www.irda.qc.ca>

ce rapport, de bonnes corrélations pour un site ne sont pas garantes d'une situation semblable pour un second site. Le logiciel HYDRUS s'avèrera donc être un bon outil pour des intervenants en recherche et des conseillers agricoles dans le cadre de développements en irrigation, tant pour des considérations économiques qu'environnementales.

L'expertise développée dans ce projet permettrait d'éventuelles collaborations entre des conseillers agricoles œuvrant dans le domaine de l'irrigation, des producteurs horticoles et des intervenants en recherche appliquée afin d'adapter au contexte québécois les meilleures technologies d'irrigation disponibles. Cette situation serait favorable à l'adoption de pratiques permettant de demeurer à jour en ce qui a trait aux technologies disponibles afin d'améliorer la compétitivité économique des entreprises agricoles québécoises. De plus, la capacité du logiciel HYDRUS à simuler le transport des solutés, tels des éléments fertilisants, permettrait une approche environnementale lors de l'étude de ces technologies.

6. Conclusion

Ce projet, réalisé par l'utilisation du logiciel HYDRUS 2D/3D de PC-Progress, a permis d'étudier l'utilité de ce dernier quant à l'établissement de systèmes d'irrigation goutte à goutte. Grâce à plusieurs caractéristiques physiques du sol de 2 champs (la texture, la proportion de particules de diamètre supérieur à 2 mm, la densité apparente, la conductivité hydraulique saturée et les valeurs de teneur en eau volumique à la capacité au champ, à la saturation et au point de flétrissement permanent), l'utilisateur d'HYDRUS peut simuler le transport hydrique à travers ce même sol. Une prévision de la dynamique de l'eau, appliquée par un système goutte à goutte dans la zone de sol en culture, est ainsi obtenue afin d'orienter le choix du système d'irrigation et la gestion des apports d'eau à partir des propriétés physiques spécifiques à ce sol.

Les différentes simulations pour le champ 1 ont fait ressortir de fortes similitudes entre les données observées et simulées. Effectivement, des valeurs de coefficient de détermination (R^2) comprises entre 0,69 et 0,81 révèlent que les résultats générés par le logiciel HYDRUS, pour ce champ, étaient très près de la réalité. Cependant, ces résultats ne se sont pas reproduits pour le champ 2, par l'obtention de coefficients de détermination faibles variant entre 0,08 et 0,25. Ces résultats démontrent l'importance des différents paramètres physiques des échantillons de sol prélevés. Presque la totalité des échantillons prélevés a été décrite comme ayant une texture de loam sablo-argileux. De plus, les valeurs de teneur en eau à la capacité au champ et à la saturation possèdent toutes le même ordre de grandeur. Malgré toutes ces similitudes, les simulations propres au champ 2 n'ont pas révélé de corrélations satisfaisantes comparativement au champ 1. La forte hétérogénéité des sols permet d'affirmer que des échantillons prélevés à un endroit différent du champ 2 auraient pu permettre d'obtenir des comparaisons, entre les données observées et simulées, plus fortes.

Outre le fait que les simulations propres au champ 1 ont produit des coefficients de détermination élevés, le temps de migration du front d'humectation était beaucoup trop lent comparativement à celui observé par les sondes TDR (10h comparativement à quelques minutes). Cet aspect est d'importance, car il influencera la durée des périodes d'irrigation nécessaire pour que le front d'humectation puisse rejoindre la plus grande profondeur colonisable par le système racinaire de la culture. De plus, une considération environnementale entre en jeu. En surestimant grandement le temps de migration en profondeur de l'eau d'irrigation, les simulations du transport hydrique feront en sorte de sous-estimer de potentielles pertes par lessivage d'éléments fertilisants. Une telle situation augmente les risques de contamination des eaux souterraines.

Le sol étudié (loam sablo-argileux) dans le cadre de ce projet a une forte proportion de détritiques (particules de diamètre > 2 mm) (25,2%). Cette particularité fait en sorte que la classe texturale seule ne peut être considérée pour prévoir le transport hydrique dans ce sol, car l'hydrodynamique y est trop modifiée. Le logiciel HYDRUS doit considérer ce caractère afin de produire des simulations justes des conditions réelles. Cependant, différentes manipulations de paramètres doivent être effectuées afin de modifier les résultats des simulations pour que ces dernières se rapprochent des observations terrains.

Ce logiciel a été utilisé par de nombreuses équipes de recherche dans plusieurs pays, qui ont démontré la pertinence et la rigueur des résultats produits par ce dernier. Cependant, son

utilisation s'adresse à des personnes bien au fait des divers concepts de la physique et de l'hydrodynamique des sols ainsi que de la modélisation en deux et trois dimensions. Un utilisateur novice en ces divers domaines aura fort probablement des difficultés à produire des simulations se rapprochant d'observations terrains quantifiées. Pour les intervenants agricoles possédant cependant de telles connaissances, le logiciel HYDRUS se révélera un outil intéressant lors de l'élaboration d'un système d'irrigation. Toutefois, aucune recommandation quant à l'établissement d'un système d'irrigation ainsi que de sa gestion ne devrait émaner de simulations produites par le logiciel HYDRUS, préalablement à une observation détaillée du transport hydrique réel au champ. Effectivement, tel que démontré dans ce rapport, de bonnes corrélations pour un site ne sont pas garanties d'une situation semblable pour un second site. Le logiciel HYDRUS s'avèrera donc être un bon outil pour des intervenants en recherche et des conseillers agricoles dans le cadre de développements en irrigation, tant pour des considérations économiques qu'environnementales.

L'expertise développée dans ce projet permettrait d'éventuelles collaborations entre des conseillers agricoles œuvrant dans le domaine de l'irrigation, des producteurs horticoles et des intervenants en recherche appliquée afin d'adapter au contexte québécois les meilleures technologies d'irrigation disponibles. Cette situation serait favorable à l'adoption de pratiques permettant de demeurer à jour en ce qui a trait aux technologies disponibles afin d'améliorer la compétitivité économique des entreprises agricoles québécoises. De plus, la capacité du logiciel HYDRUS à simuler le transport des solutés, tels des éléments fertilisants, permettrait une approche environnementale lors de l'étude de ces technologies.

7. Remerciements

Ces travaux ont été réalisés grâce à une aide financière du Programme d'appui à l'innovation en agroalimentaire, un programme issu de l'accord du cadre Cultivons l'avenir conclu entre le ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation et Agriculture et Agroalimentaire Canada.

8. Bibliographie

Allison L.E., 1965. *Organic Carbon*, C.A. Black et al. (ed.), Methods of Soil Analysis, Part 2, Agronomy Monograph no. 9, American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin, p. 1367-1378.

Assouline S., 2002. *The effect of microdrip and conventional drip irrigation on water distribution and uptake*, Soil Science Society of America Journal, vol. 66, pp.1630-1636.

Banton O., D. Côté et M. Trudelle, 1991. *Détermination au champ de la conductivité hydraulique saturée à l'aide de l'infiltromètre à charge constante de Côté: théorie et approximations mathématiques*, Canadian Journal of Soil Science, vol. 71, pp.119-126.

Bergeron D., 2010. *Régie de l'irrigation goutte à goutte dans la production de fraises à jours neutres au Québec*, Thèse de maîtrise, Département sols et environnement, Faculté des sciences de l'agriculture et de l'alimentation, Université Laval, Québec (Qc), Canada.

Boivin C. et P. Deschênes, 2011. *Stratégies d'irrigation dans la fraise à jours neutres*, Projet 6348, Rapport final présenté au Conseil pour le développement de l'agriculture au Québec (CDAQ) dans le cadre du Programme canadien d'adaptation agricole (PCAA) d'Agriculture et agroalimentaire Canada (AAC).

Cote C.M., K.L. Bristow, P.B. Charlesworth, F.J. Cook et P.J. Thorburn, 2003. *Analysis of soil wetting and solute transport in subsurface trickle irrigation*, Irrig. Sci., vol. 22, pp.143-156.

CRAAQ, 2003. Guide de référence en fertilisation, 1^{ère} édition, Québec, Qc, G1V 2M2

Elmaloglou S. et E. Diamantopoulos, 2009. *Simulation of soil water dynamics under subsurface drip irrigation from line sources*, Agricultural Water Management, vol. 96, pp.1587-1595.

Fernandez-Galvez J. et L.P. Simmonds, 2006. *Monitoring and modeling the three-dimensional flow of water under drip irrigation*, Agricultural Water Management, vol. 83, pp.197-208.

Gee G.W. et J.W. Bauder, 1986. *Particle-size analysis*, A. Klute (ed) Methods of soil analysis, Part 1. ASA. Monograph No 9, 2nd edition, Madison, WI., p. 383-411.

Gosselin L., D. Bergeron et J. Noreau, 2006. *La gestion de l'eau en fraisière*, Colloque sur l'irrigation: L'eau, source de qualité et de rendement, CRAAQ, 10 février 2006. http://www.agrireseau.qc.ca/petitsfruits/documents/Gosselin_Bergeron_Noreau.pdf

Hanson B., J.W. Hopmans et J. Simunek, 2008. *Leaching with subsurface drip irrigation under saline, shallow groundwater conditions*, Vadose Zone Journal, vol. 7, no. 2, pp.810-818.

Kandelous M.M, J. Simunek, M.T.V. Genuchten et K. Malek, 2011. *Soil water content distributions between two emitters of a subsurface drip irrigation system*, Soil Science Society of America Journal, vol. 75, no. 2, pp.488-497.

Lazarovitch N., A.W. Warrick, A. Furman et J. Simunek, 2007. *Subsurface water distribution from drip irrigation described by moment analyses*, Vadose Zone Journal, vol. 6, pp.116-123.

Mubarak I., J.C. Mailhol, R. Angulo-Jaramillo, S. Bouarfa et P. Ruelle, 2009. *Effect of temporal variability in soil hydraulic properties on simulated water transfer under high-frequency drip irrigation*, Agricultural Water Management, vol. 96, pp.1547-1559.

Provenzano G., 2007. *Using HYDRUS-2D simulation model to evaluate wetted soil volume in subsurface drip irrigation systems*, Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE, vol. 133, no. 4, pp.342-349.

Radcliffe D.E. et J. Simunek, 2010. *Soil physics with HYDRUS, modeling and applications*, CRC Press, Taylor and Francis Group, 6000 Broken Sound Parkway NW, Suite 300, Boca Raton, FL.

Rodriguez-Sinobas L., M. Gil, R. Sanchez et J. Benitez, 2012. *Evaluation of drip and subsurface drip irrigation in a uniform loamy soil*, Soil Science, vol. 177, no. 2, pp.147-152.

Sansoulet J., Y.M. Cabidoche, P. Cattan, S. Ruy et J. Simunek, 2008. *Spatially distributed water fluxes in an andisol under banana plants: experiments and three-dimensional modeling*, Vadose Zone Journal, vol. 7, no. 2, pp.819-829.

Skaggs T.H., T.J. Trout, J. Simunek et P.J. Shouse, 2004. *Comparaison of HYDRUS-2D simulations of drip irrigation with experimental observations*, Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE, vol. 130, no. 4, pp.304-310.

Zhou Q., S. Kang, L. Zhang et F. Li, 2007. *Comparison of APRI and HYDRUS-2D models to simulate soil water dynamics in a vineyard under alternate partial root zone drip irrigation*, Plant Soil, vol. 291, pp.211-223.

Annexe

A. Conversion du débit d'irrigation théorique, en litre par minute par dix mètres (l/min/10m), au débit appliqué sur l'ensemble de la limite

Lien de la démonstration :

<http://www.pc-progress.com/en/Default.aspx?h3d-lib-drip#k1>

Rayon du goutteur

$$r = 0,5cm$$

Circonférence du goutteur

$$L = 2\pi r$$

$$L = 2 \times 3,1416 \times 0,5cm$$

$$L = 3,1416cm$$

Débit

$$Q = 0,5litre(l) / min / 10m$$

$$Q = 3l / m / h$$

$$Q = 3000cm^3 / m / h$$

$$Q = 720cm^2 / jour$$

Flux appliqué à la limite représentant le goutteur

$$q = Q / L$$

$$q = (720cm^2 / jour) / 3,1416cm$$

$$q = 229,20cm / jour$$

$$q = 9,55cm / h$$