



**UNIVERSITE D'ANTANANARIVO**

\*\*\*\*\*

**INSTITUT D'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR D'ANTSIRABE  
VAKINAKARATRA**

\*\*\*\*\*

**DEPARTEMENT DES MINES**

\*\*\*\*\*

**MENTION : SCIENCES D'INGENIERIE MINIERE**

\*\*\*\*\*

**PARCOURS : GEOLOGIE DE L'ENVIRONNEMENT  
ET DE L'AMENAGEMENT**

\*\*\*\*\*

*Mémoire de fin d'études  
en vue de l'obtention du Diplôme de Licence*

***ANALYSE CINEMATIQUE DE L'ECOULEMENT D'EAU EN MILIEU***

***POREUX***

Présenté par

HASINA Fitiavana

**Soutenu le 06 avril 2017 devant les membres de jury :**

**Président :**

Monsieur ANDRIANAIVO Lala, Professeur titulaire

**Rapporteur :**

Monsieur RAJOMALAHY Julie Aimé, Doctorant à l'ESPA

**Examineur :**

Madame ANDRIAMIFIDISOA Vololomihaja, Doctorant à l'ESPA



## **REMERCIEMENTS**

Mon premier remerciement s'adresse à Dieu Tout Puissant pour son amour et sa grâce infinis, pour avoir été là tout au long de nos vies, plus particulièrement dans l'accomplissement de ce travail.

Ce travail n'aurait jamais vu le jour sans les contributions de nombreuses personnes. Les mots ne seront jamais suffisants pour exprimer mes reconnaissances et mes remerciements à toutes ces personnes qui ont participé à la réalisation de ce mémoire, particulièrement à :

- Monsieur RAJAONARISON Eddie Franck, Directeur de l'Institut d'Enseignement Supérieur d'Antsirabe-Vakinankaratra, d'avoir accepté la présentation de nos travail
- Monsieur ANDRIANAIVO Lala, Professeur titulaire, d'avoir accepté de présider et de diriger la soutenance de notre travail. Mes profondes gratitude lui sont attribuées.
- Madame ANDRIAMIFIDISOA Vololomihaja ; Doctorant à l'ESPA, d'avoir accepté de consacrer leur temps respectifs pour examiner notre travail et d'en apporter les critiques et les corrections amélioratrices. Veuillez recevoir ici mes grands remerciements et reconnaissances pour vos louables efforts.
- Monsieur RAJOMALAHY Julien Aimé, notre encadreur pédagogique, qui a bien voulu accepter de m'encadrer et de me guider tout au long de ce travail, et qui n'a ménagé ni son temps ni ses conseils ni sa patience malgré ses multiples occupations. Qu'il soit rassuré de notre profonde et sincère reconnaissance.
- Mes familles pour leur amour, leur encouragement et leur soutien inconditionnel.

Sans oublier toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail.

Que Dieu, le Tout Puissant, vous comble de santé, de bonheur, de prospérité et vous accorde une longue vie.

Merci infiniment!



# SOMMAIRE

<b>REMERCIEMENTS</b>	<b>I</b>
<b>LISTE DES FIGURES</b>	<b>V</b>
<b>LISTE DE TABLEAUX</b>	<b>VII</b>
<b>GLOSSAIRE DES PRINCIPAUX SYMBOLES MATHÉMATIQUES ET DE LA TERMINOLOGIE TECHNIQUE</b>	<b>VIII</b>
<b>INTRODUCTION</b>	<b>1</b>
<b>CHAPITRE I : ECOULEMENT EN MILIEU POREUX</b>	<b>3</b>
1 GENERALITES	3
1.1 <i>Le milieu poreux.</i>	3
1.2 <i>Ecoulement d'infiltration</i>	4
2 PROCESSUS D'ECOULEMENT DANS LES SOLS	5
2.1 <i>Détermination par le calcul des processus d'écoulement</i>	5
3 INFILTRATION D'HUILE	6
4 CONDUCTEURS HYDROGÉOLOGIQUES ET CONTRÔLES DE L'INFILTRATION	7
5 MODÉLISATION DE L'INFILTRATION	9
6 MODÈLE D'INFILTRATION DE L'ÉQUATION GREEN-AMPT	12
<b>CHAPITRE II : METHODOLOGIE</b>	<b>15</b>
1 DÉTERMINATION DES PARAMÈTRES D'ENTRÉE	15
1.1 <i>Masse volumique de l'huile</i>	16
1.2 <i>Viscosité dynamique</i>	16
1.3 <i>Tension de surface</i>	19
1.4 <i>Conductivité hydraulique</i>	20
1.5 <i>Facteur de géométrie du sol</i>	24
2 METHODOLOGIE MATHÉMATIQUE	26
3 METHODOLOGIE EXPÉRIMENTALE	27
4 ANALYSE DE SENSIBILITÉ	30
<b>CHAPITRE III : RESULTATS</b>	<b>33</b>
1 ÉVALUATION UTILISANT DU SABLE GROSSIER	33
1.1 <i>Sable grossier et eau</i>	34
1.2 <i>Sable grossier et huile</i>	36
2 ÉVALUATION UTILISANT DU SABLE FIN	39
2.1 <i>Sable fin et eau</i>	40
2.2 <i>Sable fin et huile</i>	42
<b>CHAPITRE IV : DISCUSSIONS</b>	<b>45</b>
1 ÉVALUATION UTILISANT DU SABLE GROSSIER	46
1.1 <i>Sable grossier et eau</i>	46
1.2 <i>Sable grossier et huile</i>	47

2	ÉVALUATION UTILISANT DU SABLE FIN	49
2.1	<i>Sable fin et eau</i>	50
2.2	<i>Sable fin et huile</i>	51
	<b>CONCLUSION</b>	<b>54</b>
	<b>ANNEXE</b>	<b>LI</b>
	<b>BIBLIOGRAPHIE</b>	<b>LVIII</b>
	<b>WEBOGRAPHIE</b>	<b>LIX</b>
	<b>RESUME</b>	<b>A</b>

## LISTE DES FIGURES

<b>Figure 1.</b> Schéma d'une fuite de pipeline; La lumière NAPL (rouge) s'infiltré à la nappe phréatique où elle se déplace le long du haut dans la direction de l'eau dominante. ....	6
<b>Figure 2.</b> Changement de la capacité d'infiltration (fp) d'un sol à mesure que la teneur en eau augmente jusqu'à ce qu'elle atteigne sa capacité d'infiltration d'équilibre ou de saturation (fc) (Fetter, 2001). ....	8
<b>Figure 3.</b> Graphiques montrant (a) les trois zones d'humidité à l'intérieur d'une courbe d'infiltration et (b) la progression des fronts d'humidité à l'intérieur du sol au fil du temps (Chow, et al., 1988). ....	9
<b>Figure 4.</b> Axes tridimensionnels pour modéliser le mouvement d'une particule d'huile. ....	10
<b>Figure 5.</b> Schéma montrant l'infiltration selon l'équation de Green-Ampt (Chow, et al., 1988). ....	13
<b>Figure 7.</b> Taille D Le viscosimètre Rheotek à tube en U et l'ampoule de remplissage de la pipette utilisée pour le calcul de la viscosité dynamique. ....	18
<b>Figure 8.</b> Équipement utilisé pour la détermination mécanique de la viscosité de l'huile (TA Instruments, Rheometric Scientific, ARES). ....	19
<b>Figure 9.</b> Équipement utilisé pour mesurer la tension superficielle de l'huile par analyse géométrique d'une gouttelette (caméra: Sanyo, et programme d'analyse: FTA 200). ....	20
<b>Figure 10.</b> Configuration expérimentale pour le calcul de la conductivité hydraulique à l'aide d'un entonnoir de filtration. ....	21
<b>Figure 11.</b> Représentation graphique du calcul expérimental du gradient hydraulique (USDA, 2013). ....	22
<b>Figure 12.</b> Configuration expérimentale pour la deuxième méthode de calcul de la conductivité hydraulique. ....	22
<b>Figure 14.</b> Image du montage expérimental pour l'évaluation du modèle. ....	28
<b>Figure 15.</b> Image en gros plan du tube de sortie de liquide et de la goulotte d'admission au sommet du domaine du sol. ....	29
<b>Figure 16.</b> Graphique du pourcentage de sensibilité de la sortie de l'équation d'infiltration verticale à la variation en pourcentage dans chacune des entrées. ....	31
<b>Figure 17.</b> Graphique du pourcentage de sensibilité de la sortie de l'équation d'infiltration horizontale à la variation en pourcentage dans chacune des entrées. ....	32

<b>Figure 18.</b> Capture d'image de l'expérience finale (à 10,5 secondes) pour l'eau qui s'écoule dans le sable grossier. ....	34
<b>Figure 19.</b> Graphiques comparant l'expérience et les résultats du modèle de (1) l'étendue frontale mouillée dans la direction $z +$ , (2) la propagation horizontale à partir de l'épicentre du déversement et (3) les différences dans la zone de déversement (pour l'eau circulant dans le sable grossier).....	35
<b>Figure 20.</b> Images superposées de l'expérience et courbes d'infiltration du modèle pour l'eau s'écoulant à travers du sable grossier à quatre temps différents (3, 5, 7 et 9 secondes). ....	36
<b>Figure 21.</b> Capture d'image de l'expérience finale (à 18 minutes) pour l'huile s'écoulant dans le sable grossier. ....	37
<b>Figure 22.</b> Graphiques comparant l'expérience et les résultats du modèle de (1) l'étendue frontale mouillée dans la direction $z +$ , (2) la propagation horizontale à partir de l'épicentre du déversement et (3) les différences dans la zone de déversement (pour l'huile circulant dans le sable grossier).....	38
<b>Figure 23.</b> Images superposées de l'expérience et courbes d'infiltration du modèle pour l'huile s'écoulant à travers du sable grossier à quatre temps différents (4, 8, 12 et 16 minutes). ....	39
<b>Figure 24.</b> Capture d'image de l'expérience finale (à 4 minutes 15 secondes) pour l'eau s'écoulant dans du sable fin. ....	40
<b>Figure 25.</b> Graphiques comparant l'expérience et les résultats du modèle de (1) l'étendue frontale mouillée dans la direction $z +$ , (2) la propagation horizontale à partir de l'épicentre du déversement et (3) les différences dans la zone de déversement (pour l'eau circulant dans le sable fin). ....	41
<b>Figure 26.</b> Images superposées de l'expérience et courbes d'infiltration du modèle pour l'eau s'écoulant à travers du sable fin à quatre temps différents (1, 2, 3 et 4 minutes). ....	42
<b>Figure 27.</b> Capture d'image de l'expérience finale (à 7 heures et 0,2 seconde) pour l'huile s'écoulant à travers du sable fin. ....	43
<b>Figure 28.</b> Graphiques comparant l'expérience et les résultats du modèle de (1) l'étendue frontale mouillée dans la direction $z +$ , (2) la propagation horizontale à partir de l'épicentre du déversement et (3) les différences dans la zone de déversement (pour l'huile circulant dans le sable fin). ....	43
<b>Figure 29.</b> Images superposées de l'expérience et des courbes d'infiltration du modèle pour l'huile s'écoulant à travers du sable fin à quatre temps différents (1,5, 3, 4,5 et 6 heures). ....	44

## LISTE DE TABLEAUX

<b>Tableau 1 :</b> Dénominations adoptées en fonction de la grosseur des grains.....	3
<b>Tableau 2 :</b> Valeurs utilisées pour calculer la viscosité dynamique de l'huile à 19 ° C. La viscosité dynamique de l'eau utilisée dans le calcul a été donnée pour une température de 20 ° C présentée dans Serway (1996). .....	18
<b>Tableau 3 :</b> Valeurs utilisées pour calculer la conductivité hydraulique des deux sols avec chacun des deux liquides.....	23
<b>Tableau 4 :</b> Valeurs utilisées pour calculer la perméabilité intrinsèque des deux sols. ....	23

**GLOSSAIRE DES PRINCIPAUX SYMBOLES MATHÉMATIQUES**  
**ET DE LA TERMINOLOGIE TECHNIQUE**

Terme	Symbole	Unités
Densité	$\rho$	$\text{kg/m}^3$
Viscosité Dynamique	$\mu$	$\text{kg/m.s}$
Conductivité hydraulique	K	m/s
Charge hydraulique		m
Perméabilité intrinsèque	k	$\text{m}^2$
Viscosité cinématique		$\text{m}^2 / \text{s}$
Porosité	n	
Perméabilité relative	$k_r$	$\text{m}^2$
Facteur de géométrie du sol	B	
Tension superficielle	$\sigma$	$\text{kg} / \text{s}^2$

## INTRODUCTION

Le problème d'écoulement ou d'infiltration de fluides à travers les milieux poreux se pose dans de nombreuses activités industrielles et environnementales telles l'extraction de pétrole ou de gaz présents dans le sous-sol, le stockage de déchets radioactifs ou non, le génie chimique, ... En particulier, la majorité des espaces maritimes littoraux aux risques de pollution par hydrocarbures. Certains de ces produits s'infiltrent dans la couche sédimentaire, et peuvent être fixés pour être transportés par hydrodynamique. Un modèle mathématique sera très utile pour prévoir ces phénomènes. Aussi, nous nous intéressons à «l'analyse cinématique de l'écoulement d'eau en milieu poreux ».

Dans la littérature, un certain nombre de chercheurs ont abordé des problèmes similaires. Gioia & Urciuolo, (2006) se sont intéressés à l'étude de l'écoulement d'hydrocarbure, sous l'effet combiné du nombre de Bond (Bo) et du nombre capillaire (Ca), dans une colonne à garnissage remplie de billes de verre saturé en eau. Pour atteindre la saturation, les expériences ont été menées avec des valeurs de vitesse d'écoulement d'eau situées à l'extérieur du domaine de validité de la loi de Darcy. L'infiltration d'huile, dans des lits de billes de verre saturés avec une phase aqueuse, a été étudiée, tant théoriquement qu'expérimentalement, par Gioia *et al.*, (2003). Cette étude leur a permis de mettre au point un modèle « stochastique » très simple pour décrire la structure poreuse des lits de billes et de définir un critère pour déterminer la probabilité de mobilisation de fragments d'huile issus de l'huile initiale.

Bouamrani, (2005) a proposé une synthèse sur les différents types de polluants d'hydrocarbures susceptibles de s'infiltrer dans le sable. Des mesures sont données dans le cas d'un écoulement monophasique pour un milieu poreux hétérogène.

Dans ce travail, l'objectif consiste à proposer un modèle d'infiltration, qui pourra être appliqué au cas des déversements d'hydrocarbures, et à évaluer l'efficacité de ses prévisions. Le modèle sera basé sur les deux solutions de l'équation de Green-Ampt, et évalué d'une manière purement expérimentale sur des sables bruts non saturé en eau.

Le présent mémoire est structuré en quatre chapitres en plus de l'introduction et de conclusion.

Dans le chapitre I, nous parlerons de l'écoulement en milieu poreux. Ensuite, le deuxième chapitre présentera la méthodologie. L'ensemble des résultats sera exposé en Chapitre III pour être discuté dans le dernier chapitre.

# **Chapitre I : ECOULEMENT EN MILIEU POREUX**

## **1 Généralités**

### **1.1 Le milieu poreux.**

Les milieux poreux sont largement répandus dans différents secteurs d'activité comme en mécanique, en géologie (structure des sols, les forages pétroliers,...). En réalité, leur utilisation est très étendue.

On définit par milieu poreux la matrice de solide qui englobe des vides appelés pores. Ces vides, ou interstices, peuvent communiquer entre eux et contenir une ou plusieurs phases fluides pouvant s'écouler ou encore, échanger de l'énergie entre elles et/ou avec la matrice solide.

Dans cette étude, nous utilisons deux types de milieux poreux constitués respectivement par deux gammes de sables : sable grossier et sable fin.

Géologiquement parlant, le sable est un matériau granulaire constitué de petites particules provenant de la désagrégation d'autres roches dont la dimension est comprise entre 0,063 et 2 mm.

Tableau 1 : Dénominations adoptées en fonction de la grosseur des grains

Diamètre du grain	Appellation
$20 \mu < d < 0,2 \text{ mm}$	sable fin
$0,2 \text{ mm} < d < 2 \text{ mm}$	sable grossier

Dans le monde des agrégats, on parlera de sable pour des particules allant de 0 à 4 mm (voir 5 ou 6 mm parfois).

Le sable est une matière minérale siliceuse ou calcaire qui se présente dans le sol sous la forme de grains ou de poudre, suivant qu'il s'agit de sable grossier ou de sable fin; suivant leur composition. Ils sont de couleur blanche, jaune, grise ou rougeâtre.

## 1.2 Écoulement d'infiltration

L'écoulement d'un fluide dans un milieu poreux est un phénomène extrêmement complexe.

On parle d'écoulement d'infiltration en hydrologie d'un fluide (eau) dans des couches de sol telles que le sable, lorsqu'un fluide remplit plus ou moins des pores de la couche de sol non saturée en eau et se déplace vers le bas en direction de couches de sol plus profondes sous l'effet de la force de gravité. Pour que les eaux d'infiltration ne soient pas retenues, il faut que le sol soit perméable.

D'après Pioger (1954), c'est le "Mouvement de l'eau pénétrant dans un milieu poreux depuis la surface du sol". Dans ce sens, pour la plupart des auteurs modernes, l'infiltration est distinguée de la filtration qui désigne le mouvement de l'eau dans un milieu poreux saturé : " le nom de filtration est attribué au phénomène de traversée ou de franchissement d'une certaine épaisseur de milieu poreux saturé, tandis que l'infiltration s'identifie avec la pénétration dans un milieu non saturé"

L'infiltration d'un fluide doit tenir compte de la perméabilité du sol qui est définie par le coefficient de perméabilité du sol  $K$  en m/s, et dépend de la taille de grain et de l'espace poreux exploitable. Dans les sols moins perméables, il est possible que les eaux d'infiltration soient temporairement retenues. Lorsque les eaux d'infiltration arrivent sur une couche de sol imperméable, comme par exemple une roche imperméable, l'infiltration est stoppée et les eaux d'infiltration sont retenues de manière durable. Ces accumulations d'eaux en sous-sol forment ce qu'on appelle eaux souterraines.

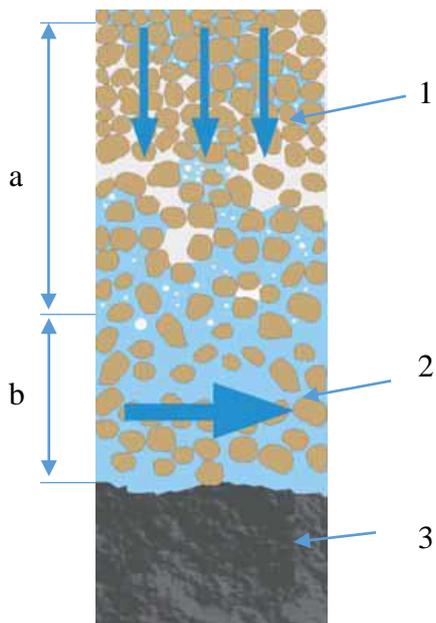


Figure 1 : différents types d'eaux du sol

**a** : couche de sol non saturée en eau, contenant de l'air,

**b** : couche de sol saturée en eau, tous les pores sont remplis d'eau,

**1** : eaux d'infiltration,

**2** : eaux souterraines,

**3** : couche des sols imperméables (roche)

## 2 Processus d'écoulement dans les sols

Les processus d'écoulement ont lieu dans les couches de sol saturées d'eau, dans les eaux souterraines, dans les eaux de retenue, au-dessus des eaux souterraines, et dans les eaux d'infiltration.

Ces mouvements de l'eau dans le sol sont dus à des différences de potentiel. L'eau se déplace toujours depuis des endroits ayant un potentiel élevé, et donc une énergie potentielle élevée, vers des endroits ayant un potentiel plus faible. Le mouvement de l'eau se poursuit jusqu'à ce qu'un équilibre entre les potentiels se soit établi.

### 2.1 Détermination par le calcul des processus d'écoulement

La détermination précise des processus d'écoulement est difficile du fait de l'hétérogénéité du sol traversé. On suppose donc pour le calcul des processus d'écoulement que les conditions sont idéales. Pour la plupart des problèmes rencontrés, l'application de la loi de Darcy permet d'obtenir une précision suffisante.

Selon Darcy, la vitesse de filtration  $V$  est proportionnelle à la perte de charge  $\Delta h$  sur la longueur  $L$ . La grandeur sans dimensions  $\frac{\Delta h}{L}$  est appelée gradient hydraulique  $i$ . La loi de Darcy sur la filtration est la suivante :

$$V = K_f \frac{\Delta h}{L} = K_f i \quad (1)$$

### 3 Infiltration d'huile

Le mouvement souterrain de liquide dans la zone vadose peut être divisé en deux composantes principales : infiltration et percolation, redistribution subséquentes.

Dans le milieu naturel, le liquide peut se propager dans les milieux poreux jusqu'à ce qu'il atteigne la nappe phréatique ou un aquifère. Le liquide comprenant de la NAPL (liquide à phase non aqueuse) légère flotte alors le long de la surface de la nappe phréatique, créant une "zone de frottis" dans la direction du mouvement d'eau dominant.

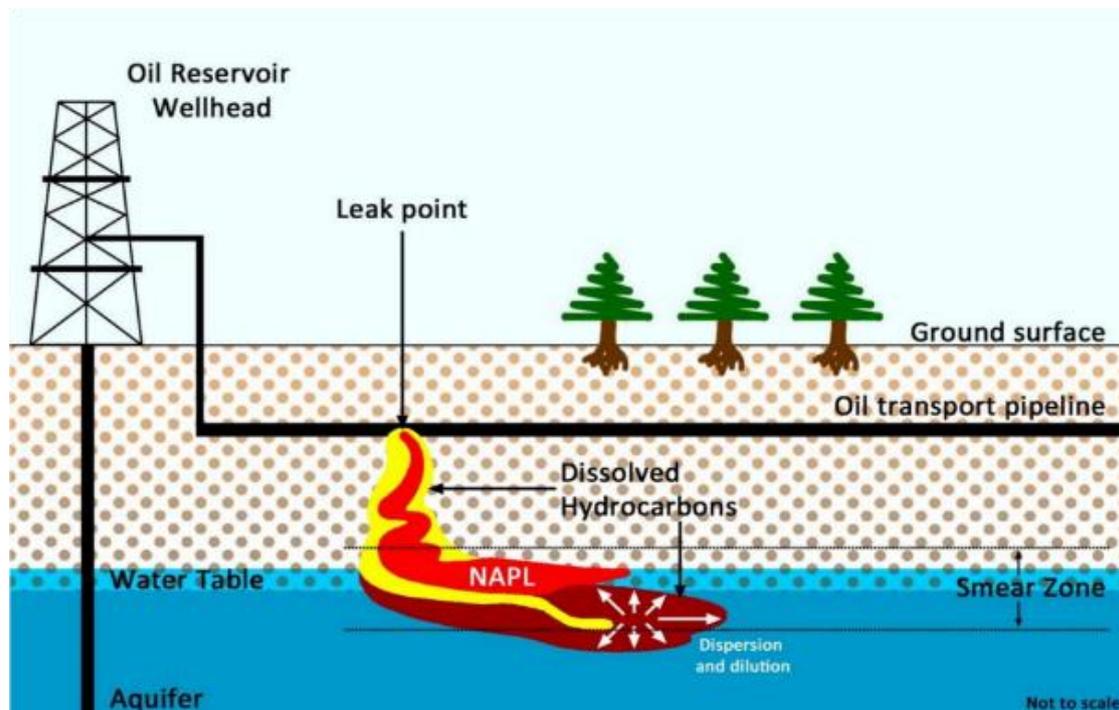


Figure 1. Schéma d'une fuite de pipeline; La lumière NAPL (rouge) s'infiltré à la nappe phréatique où elle se déplace le long du haut dans la direction de l'eau dominante. La zone jaune représente les composants volatils et le rouge profond signifie les hydrocarbures dissous qui contaminent davantage le domaine du sol et l'aquifère. (Basé sur Stewart et al. 2008).

#### **4 Conducteurs hydrogéologiques et contrôles de l'infiltration**

L'infiltration de liquide dans un sol est entraînée par les forces de gravité, par la pression et par l'action de capillarité (Miller, 1977). Les taux d'infiltration sont déterminés par les propriétés du liquide et du sol (Miller, 1977).

Un autre facteur influençant l'infiltration dans le sol est la condition aux limites au point d'entrée du liquide (Todd & Mays, 2005) qui est, dans ce cas, l'état de la surface du sol. En outre, la pente topographique peut influencer sur les débits d'afflux de liquide (Ward & Robinson, 2000).

Une fois aspiré dans le sol, le débit est déterminé à la fois par le potentiel capillaire et la conductivité capillaire (Miller, 1977). Le potentiel capillaire exprime la tension superficielle entre l'air, le sol et le liquide. La conductivité capillaire est en fonction de l'humidité, de la structure et de la porosité du sol (Miller, 1977).

La conductivité capillaire pour un domaine initialement sec est inférieure à celle d'une couche humide (Miller, 1977). Elle est faible tout au long d'un domaine sec et le potentiel capillaire initial (à la surface du sol) est important (Miller, 1977).

La capacité d'infiltration d'un sol est la vitesse la plus rapide à laquelle elle peut absorber le liquide dans un état donné d'humidité du sol (Jones, 1997). Ce taux d'infiltration est plus rapide au début lorsque les forces capillaires dominent (Schwartz & Zhang, 2003). Par la suite, elle diminue, tendant vers une limite d'équilibre, à mesure que la teneur en liquide du sol augmente (Fetter, 2001). Désigné comme la capacité d'infiltration saturée d'un sol, cette limite est généralement très lente et constante (Jones, 1997).

La figure 2 représente la relation entre le temps et la capacité d'infiltration d'un sol choisi pendant une période d'afflux de liquide constant. La capacité d'infiltration ( $f_p$ ) est régie par l'équation de Horton (donnée dans la figure 2).

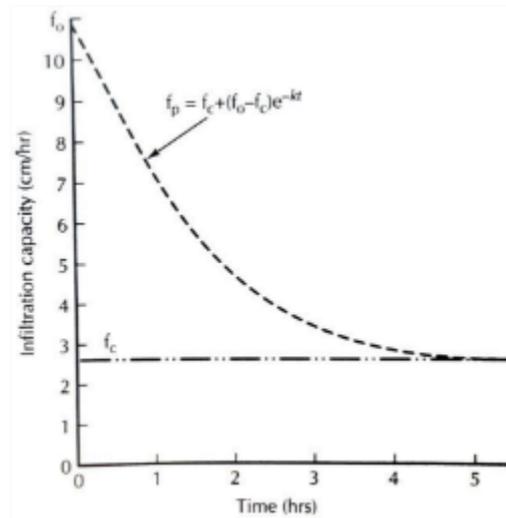


Figure 2. Changement de la capacité d'infiltration ( $f_p$ ) d'un sol à mesure que la teneur en eau augmente jusqu'à ce qu'elle atteigne sa capacité d'infiltration d'équilibre ou de saturation ( $f_c$ ) (Fetter, 2001).

Dans les sols insaturés, la conductivité d'un liquide à travers un milieu varie également avec le temps. Cependant, ces changements dépendent du degré de saturation dans la zone humide, avec une conductivité maximale lorsque le sol est proche de la saturation (Schwartz & Zhang, 2003).

Une fois l'infiltration initiée, la teneur en liquide d'un milieu poreux change en fonction de l'espace et du temps. L'interface entre le milieu insaturé et le sol qui contient du liquide est appelée front humide. Dans toute la zone mouillée, le gradient de saturation n'est pas toujours uniforme. La saturation différentielle peut être divisée en trois zones principales; La zone de saturation, la zone de transmission et la zone de mouillage (représentée sur la figure 3a). Au fil du temps, les fronts de saturation interne progressent également vers le bas à travers la zone mouillée (figure 3b). Cependant, pour simplifier le modèle, on suppose que la totalité de la zone mouillée contenue dans la courbe d'infiltration est saturée à 100% pendant toute la simulation. Ceci justifie l'utilisation d'une valeur constante de conductivité hydraulique.

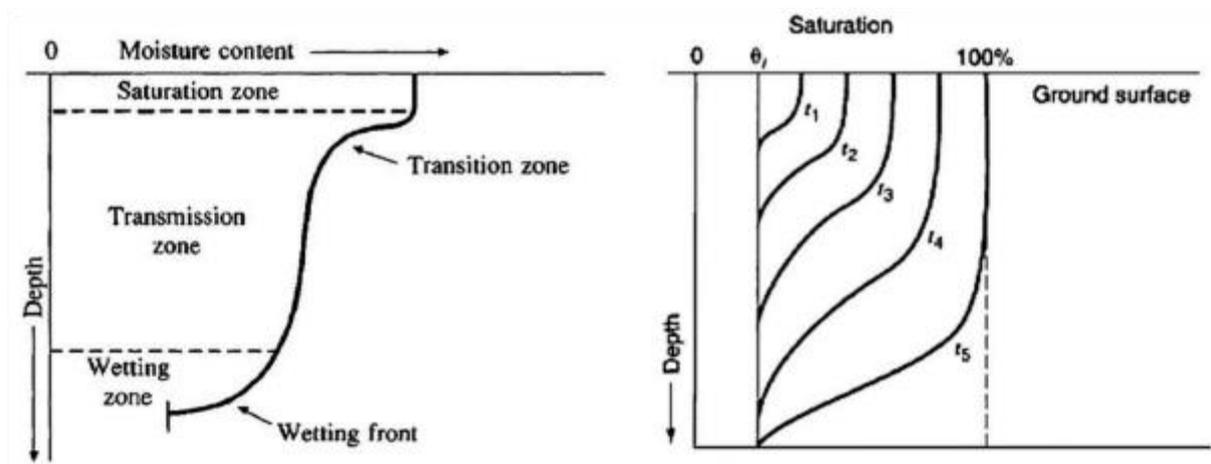


Figure 3. Graphiques montrant (a) les trois zones d'humidité à l'intérieur d'une courbe d'infiltration et (b) la progression des fronts d'humidité à l'intérieur du sol au fil du temps (Chow, et al., 1988).

## 5 Modélisation de l'infiltration

Dans l'industrie pétrolière, la méthode la plus rapide, la plus sûre et la plus simple de transporter de grandes quantités de pétrole brut des réservoirs vers les stations d'épuration est l'utilisation des canalisations souterraines (Sun, et al., 2011). Cependant, des conditions de sol souterraines dures peuvent causer la corrosion du matériau du pipeline causant des fuites (Sun, et al., 2011). De plus, leur origine souterraine et leur propagation limitent les moyens de détection, les rendant difficiles à découvrir et à tracer. Les méthodes de détection disponibles comprennent la détection d'une chute de pression dans la canalisation ou d'une perte de débit par rapport au débit d'entrée.

Un modèle de simulation du mouvement du pétrole à travers des sols spécifiques peut être utilisé pour déterminer les zones focales et les temps de réponse clés pour les plans d'urgence contre la pollution par les hydrocarbures (OPEP). Le but du modèle est de prédire le mouvement vertical et latéral descendant de l'huile à travers des milieux poreux basé sur les qualités de l'huile et un domaine de sol uniforme. Cela permettrait au modèle d'être utilisé pour:

- Estimer la propagation de l'huile à partir d'un déversement d'emplacement et de volume connus ;
- Calculer le temps critique entre le déversement initial et la contamination de la nappe, phréatique, déterminer l'origine et le volume du déversement à partir des profondeurs et / ou des largeurs connues de l'étendue de la contamination;

- Concevoir des critères de détection des déversements et d'installation des pipelines afin d'éviter une contamination généralisée en cas de déversement.

En tant que simulation généralisée, les modèles nécessitent une multitude d'hypothèses et de simplifications. Le mouvement dépend de la structure interne des sols micro et macroporeux, mais pour les besoins du modèle mathématique, le domaine du sol est supposé uniforme.

L'infiltration souterraine peut être également influencée par des horizons distincts du sol, qui ont des propriétés différentes, y compris une croûte superficielle et des couches de travail du sol (Damodhara Rao, et al., 2006). Comme le modèle est appliqué au cas de déversements d'hydrocarbures souterrains, les couches de surface n'affecteront pas le débit d'huile. De plus, on suppose que le domaine des sols a un horizon de sol unique. Les plus grandes limitations du modèle sont le manque supposé de variabilité spatiale des propriétés du sol et les erreurs inhérentes et les incertitudes dans les paramètres d'entrée (Jones, 1997).

L'équation de Richards (1931) peut être utilisée pour créer des modèles physiques d'infiltration et de percolation (Hsu et al., 2002). Il est basé sur la loi de Darcy et le principe de la conservation de masse. Deux équations sont nécessaires pour décrire le mouvement à travers des milieux poreux dans des directions perpendiculaires. La première pour simuler le mouvement vertical descendant d'une particule d'huile (direction d'axe  $z$  + sur la figure 4), et la seconde pour décrire le mouvement latéral, qui est supposé symétrique dans les deux axes  $x$  et  $y$  (figure 4).

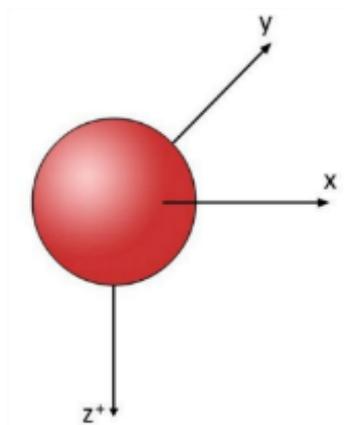


Figure 4. Axes tridimensionnels pour modéliser le mouvement d'une particule d'huile.

L'équation de Richards pour l'écoulement vertical (1931) est :

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ K \left( \frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \right] \quad (2)$$

où  $\theta$  est la teneur en eau du sol,  $t$  est le temps,  $z$  est la distance au niveau du front d'humectation dans la direction  $z +$  (comme le montre la figure 4),  $K$  est la conductivité hydraulique et  $h$  la charge hydraulique. Il existe de nombreuses solutions à cette équation différentielle partielle du second ordre qui sont utilisées pour modéliser l'infiltration de liquides à travers des milieux poreux; y compris l'équation de Bruce et de Klute, l'équation de Horton, l'équation de Philip et l'équation de Green-Ampt (Chow, et al., 1988, Bruce et Klute, 1952).

Pour les besoins de cette étude, des solutions qui permettent de prédire l'infiltration verticale et latérale ainsi que de différencier les débits pour différents fluides et les saturations initiales des sols seraient les plus souhaitables. L'équation de Bruce et Klute peut simuler un mouvement latéral à travers des milieux poreux (Šimůnek, et al., 2000). Cependant, il n'y a pas de possibilité de modifier les propriétés du fluide dans l'équation.

L'équation d'Horton suppose une diffusivité constante et une conductivité hydraulique dans tout le domaine (Chow, et al., 1988). Inversement, l'équation de Philip permet à ces paramètres de varier avec la teneur initiale en humidité du sol (Chow, et al., 1988). La méthode de Philip fournit des simulations plus précises que celles de Horton pour de courtes périodes d'infiltration dans lesquelles le taux décélère vers la limite inférieure du domaine (Jones, 1997).

Enfin, le modèle de Green-Ampt est une solution exacte analytiquement dérivée de l'équation de Richards (Green & Ampt, 1911). Cette équation peut simuler l'infiltration pour différentes propriétés de liquide et de sol et fournir des solutions pour l'infiltration dans les plans  $z$ ,  $x$  et  $y$ . Elle est donc la plus adaptée à l'application de cette étude. La méthode de Green-Ampt est particulièrement efficace pour les petits pores (Jones, 1997) qui seraient prévalants dans les conditions de sous-surface comprimées qui sous-tendent les pipelines terrestres enterrés.

Pour incorporer l'atténuation du sol et la biodégradation des contaminants organiques, des équations supplémentaires sont nécessaires. Le Bioplume III de l'Agence de protection de l'environnement des États-Unis (EPA) intègre l'atténuation naturelle ; le modèle USGS BIOMOC intègre la biotransformation des fluides infiltrant. Ces additions ne sont pas souvent incluses dans les modèles d'infiltration fluide et, comme elles dépassent le cadre de cette étude, leur effet est supposé avoir un impact négligeable sur l'infiltration d'huile. L'USGS (US

Geological Survey) a développé plusieurs modèles pour simuler le flux de fluide dans des milieux poreux (USGS, 2013). Le plus populaire de ceux-ci est le MODFLOW. Ce modèle est un modèle modulaire de différence finie fournissant des solutions numériques à une équation d'écoulement des eaux souterraines en trois dimensions (Harbaugh, 2005).

L'équation d'écoulement des eaux souterraines (équation 3) est appliquée à un domaine discrétisé (en cellules dans une grille) et couplée à l'équation de continuité et à la loi de Darcy (Harbaugh, 2005).

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) - W = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (3)$$

L'équation 3 contient des différences partielles de conductivité hydraulique avec la pression en tant que différentiel partiel du second ordre dans les trois axes de coordonnées (figure 4).  $W$  représente les sources d'eau ou les puits, et est entré comme flux volumétrique par unité de volume. Enfin,  $S_s$  est le stockage volumétrique spécifique du sol. MODFLOW est un modèle très détaillé nécessitant des informations complexes sur le milieu liquide et poreux à simuler ainsi que l'état du bassin versant qu'il contient (Harbaugh, 2005).

La complexité ne facilite pas l'évaluation des paramètres d'entrée et l'évaluation en profondeur de la précision du modèle. De plus, cela ne répond pas aux exigences d'un déversement de pétrole où la priorité est l'efficacité et la simplicité du modèle, afin d'identifier rapidement les zones de préoccupation et d'établir les temps d'urgence.

## **6 Modèle d'infiltration de l'équation Green-Ampt**

La forme originale de l'équation de Green-Ampt, telle que donnée par Todd et Mays (2005), est

$$f_t = K \left( \frac{\psi \Delta\theta}{F_t} + 1 \right) \quad (4)$$

où  $f_t$  est la vitesse d'infiltration au temps  $t$ ,  $K$  est la conductivité hydraulique saturée,  $\psi$  est le potentiel matriciel au niveau du front d'humectation,  $\Delta\theta$  est la variation de la teneur en humidité et  $F_t$  est l'infiltration cumulée.

Il subdivise et simplifie les forces agissant sur un liquide infiltrant dans un sol en deux composantes principales : la conduction qui se déroule dans la zone humide, et la diffusion qui se déroulent au niveau du front mouillé (Jones, 1997). Le modèle suppose un front de mouillage affiné et une conductivité hydraulique constante et une succion du sol dans tout le domaine (Adoa, et al., 2005), comme représenté sur la figure 5. La forme de la courbe d'infiltration peut être plus naturelle que celles représentées par Chow et Al. (1988) sur la figure 3 - en couplant l'équation d'infiltration verticale avec une infiltration horizontale décrivant et en calculant leur interrelation à intervalles réguliers le long de la longueur d'infiltration.

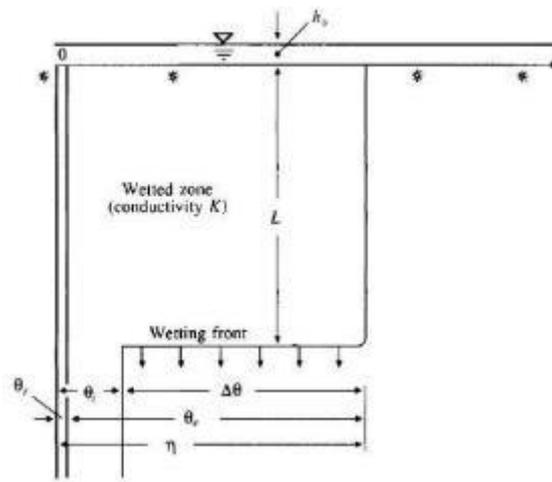


Figure 5. Schéma montrant l'infiltration selon l'équation de Green-Ampt (Chow, et al., 1988).

Le modèle de Green-Ampt a été encore modifié par Hussein et al. (2002):

$$t - t_0 = \frac{n \cdot S_1}{K_1} \left( z_f(t) - z_f(t_0) - (h - H_f) \ln \left( \frac{z_f(t) + h - H_f}{z_f(t_0) + h - H_f} \right) \right) \quad (5)$$

Dans cette équation,  $t_0$  est le temps de début de l'infiltration,  $n$  est la porosité du milieu,  $S_1$  est la saturation derrière le front d'invasion,  $K_1$  la conductivité hydraulique à la saturation définie,  $z_f(t)$  est la profondeur du front d'huile à l'instant  $t$ ,  $h$  est l'épaisseur de l'huile sur la surface et  $H_f$  est la pression d'aspiration à l'interface sol-huile.

Kao et Hunt (1996) ont simplifié la même équation de Green-Ampt pour obtenir une expression pour l'infiltration verticale qui est spécifique aux propriétés du fluide et de ses milieux conducteurs (équation 6). Au lieu d'utiliser la conductivité hydraulique, cette équation implique des paramètres qui décrivent la perméabilité relative ( $kr$ ) et la perméabilité intrinsèque ( $k$ ) du sol. De plus, il existe des constantes d'entrée pour la viscosité dynamique ( $\mu$ ) et la densité ( $\rho$ ) du liquide et pour l'accélération gravitationnelle ( $g$ ).

$$t = \frac{\Delta\theta\mu}{\rho g k k_r} \left[ z_f + h_f \ln \left( 1 - \frac{z_f}{h_f} \right) \right] \quad (6)$$

La principale différence entre les deux solutions est l'utilisation d'un seul terme de pression dans l'équation de Kao et Hunt (2001). Le terme de pression  $h_f$  dans le papier de Kao et Hunt (2001) peut être calculé par l'équation suivante:

$$h_f = - \frac{\sigma B^2 \Delta\theta}{2\rho g (S_w k k_r)^2 (1 - S_i)^{\frac{3}{2}}} \quad (7)$$

où  $S_w$  est la saturation dans la région mouillée et  $S_i$  est l'humidité initiale. Les termes  $k$  et  $kr$  peuvent être dérivés ensemble, selon Kao et Hunt (1996), en utilisant :

$$k k_r = \frac{\mu K(h_0)}{\rho g} \quad (8)$$

De plus, la perméabilité intrinsèque du matériau ( $k$ ) peut être calculée à partir de la conductivité hydraulique ( $K$ ), de l'accélération gravitationnelle ( $g$ ), de la viscosité dynamique ( $\mu$ ) et de la densité ( $\rho$ ) du liquide par l'équation:

$$k = \frac{K \cdot \mu}{\rho \cdot g} \quad (9)$$

Afin d'améliorer la précision du modèle pour l'application envisagée (impliquant de grandes profondeurs), il est important de considérer les changements de porosité ( $\Phi$ ) avec l'augmentation de la profondeur ( $z$ ), facteur de la capacité de compactage du milieu ( $c$ ) Comme sa porosité de surface ( $\Phi_0$ ). Une relation entre les trois est donnée par Athy (1930) :

$$\Phi(z) = \Phi_0 \cdot e^{-cz} \quad (10)$$

Après avoir passé en revue les théories (Athy, 1930, Overeem et al., 2005, Benjamin & Nwachukwu, 2011; Kiefer et coll., 1997), on a découvert que des valeurs de coefficient de compactage sont généralement fournies pour des matériaux extrêmement compactés tels que des schistes et des matériaux sous-aqueux. Ces valeurs vont de 0,002 à  $3,6 \cdot 10^{-7}$  indiquant que le changement de porosité n'est pas prononcé même dans ces conditions de haute pression. Par conséquent, on peut conclure que le changement de porosité défini par cette équation pour la simulation expérimentale et l'infiltration modélisée connexe sera suffisamment petit pour être considéré comme négligeable. Par conséquent, l'équation d'Athy a été exclue de la méthode mathématique.

L'équation de Green-Ampt a également été résolue pour le cas de la redistribution horizontale par Kao et Hunt (1996)

$$x = B \left( \frac{\sigma}{\mu} \right)^{\frac{1}{2}} k^{\frac{1}{4}} t^{\frac{1}{2}} \quad (11)$$

où  $x$  est la position frontale du mouillage le long de l'axe des  $x$ ,  $B$  est une fonction de la géométrie du sol,  $\sigma$  est la tension superficielle du liquide,  $\mu$  est la viscosité dynamique du liquide,  $k$  la perméabilité du sol et  $t$  le temps écoulé depuis l'initiation du déversement.

L'équation de Green-Ampt est populaire pour la modélisation de la percolation de l'eau à travers des milieux poreux (Damodhara Rao, et al., 2006 ; Ma, et al., 2010 ; Swartzendruber, 2000). L'EPA a mis au point un modèle de filtrage de surface à l'huile (OSFSM) pour simuler le mouvement et l'échange d'écoulement à la surface, ainsi que l'infiltration de l'huile dans le sol (Hussein, et al., 2002). La composante souterraine du modèle est pilotée par l'équation de Green-Ampt (3). L'aspect vertical a été expérimentalement évalué par Weaver et al. (1994). Des simulations de modèles ont été trouvées pour correspondre aux aspects qualitatifs de l'expérience et des mesures quantitatives à un niveau «acceptable». Pourtant, comme avec n'importe quel modèle, les résultats étaient limités à la précision des paramètres d'entrée.

## **Chapitre II : METHODOLOGIE**

Pour évaluer l'efficacité de l'équation choisie pour simuler l'infiltration d'huile dans les sols, une technique expérimentale a été choisie. Bien qu'il représente une échelle différente de l'application proposée du modèle, c'est la méthode d'évaluation la plus réalisable disponible pour cette étude. La méthodologie d'évaluation du modèle comprend trois composantes principales:

- La détermination des propriétés du sol et de l'huile à utiliser comme intrants pour le modèle,
- la construction mathématique du modèle d'infiltration
- et enfin la composante expérimentale.

Pour améliorer la robustesse de l'évaluation du modèle, des simulations ont également été réalisées en utilisant de l'eau comme liquide infiltrant.

### **1 Détermination des paramètres d'entrée**

Il est nécessaire de déterminer les propriétés des liquides et des sols utilisés dans les expériences pour décrire leur comportement physique dans le modèle. L'huile utilisée pour l'expérimentation était "huile de moteur biodégradable GP 5W-40" provenant de Chemiphase. L'eau utilisée dans l'expérience était l'eau de robinet potable des robinets de laboratoire. Deux types de sol différents (sable fin et sable grossier) ont également été acquis pour les essais d'infiltration.

La détermination expérimentale de la densité du liquide, de la viscosité dynamique et de la tension superficielle ainsi que de la conductivité hydraulique de chaque liquide à travers chaque sol étaient nécessaires.

Un facteur de forme géométrique sans dimension a ensuite été déterminé à la fois à l'aide de descriptions et de tables de consultation adoptées par les théories et par une méthode mathématique. Comme plusieurs de ces paramètres dépendent de la température, le laboratoire a été maintenu à 19 ° C tout au long des déterminations des paramètres d'entrée.

## 1.1 Masse volumique de l'huile

Pour calculer la masse volumique ( $\rho$ ) de l'huile, on a utilisé la relation simple impliquant sa masse ( $m$ ) et son volume ( $V$ ):

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (12)$$

Après des mesures multiples de la masse et du volume d'une quantité donnée, on a constaté à plusieurs reprises que l'huile avait une densité de 880 kg / m<sup>3</sup>. C'est moins dense que l'eau dont on sait qu'elle a une masse volumique de 1000 kg / m<sup>3</sup>. En conséquence, si mélangé, l'huile flottera sur l'eau.

## 1.2 Viscosité dynamique

La Société des ingénieurs de l'automobile (SAE) classe les huiles en fonction de leur viscosité. Le «40» dans la référence « GP 5W-40» de l'huile de moteur biodégradable signifie le degré de viscosité SAE; qui représente une huile moteur avec une viscosité cinématique de 12,5-16,3 cSt et avec une faible vitesse de cisaillement à 100 ° C (Toepfer, n .d.). Il est assigné aux huiles une valeur comprise entre 0 et 60; l'huile utilisée dans cette expérience est une huile très visqueuse (40). L'huile est également baptisée «5W» indiquant la désignation du grade de viscosité minimale d'hiver, qui est utilisée pour déterminer la performance de l'huile dans des conditions froides.

Une méthode traditionnelle pour calculer la viscosité dynamique des fluides newtoniens est l'utilisation d'un viscosimètre capillaire (Viswanath, et al., 2007). L'huile est confirmée ultérieurement dans cette section comme étant un fluide Newtonien, c'est-à-dire que la viscosité reste constante avec une vitesse de cisaillement changeante. Pour cette expérience (figure 7), on a utilisé un viscosimètre Rheotek en verre, à tube U et de taille D, qui contient deux réservoirs de liquide et un tube capillaire étroit, et pouvant mesurer une viscosité dans la plage de 20 à 100 x 10<sup>-6</sup> m<sup>2</sup>/s. Cette méthode fonctionne avec l'équation de Poiseuille (Viswanath, et al., 2007) qui est présentée par une expression du débit ( $Q$ ):

$$Q = \frac{\pi \Delta P a^4}{8 \mu l} \quad (13)$$

où  $\Delta P$  est la différence de pression entre chaque extrémité du tube capillaire,  $a$  est le rayon de la paroi extérieure du tube capillaire,  $\eta$  est la viscosité dynamique et  $l$  est la longueur du tube capillaire.

Les conditions suivantes sont requises pour l'application de l'équation 13:

- le liquide doit être un liquide newtonien,
- le débit dans tout le tube doit être parallèle à la paroi capillaire,
- le débit du liquide à n'importe quel point du tube doit être constant, et
- le liquide à la paroi capillaire doit être stationnaire (Viswanath et al., 2007).

L'équation de Poiseuille peut être simplifiée en utilisant l'équation pour le débit et l'équation de pression hydrostatique, la différence de pression étant égale à la longueur capillaire multipliée par la densité liquide et l'accélération gravitationnelle (Viswanath, et al., 2007) . Pour éradiquer les inconnues dans l'équation, l'expérience peut être répétée pour l'huile et l'eau (qui a une viscosité dynamique connue,  $\mu_1$ ). Ceci permet de calculer la viscosité dynamique de l'huile ( $\mu_2$ ) par l'équation 14.

$$\mu_2 = \frac{\mu_1 \rho_2 t_2}{\rho_1 t_1} \quad (14)$$

Le temps ( $t$ ) pris par le liquide pour s'écouler à travers un très petit tube capillaire dans le tube en U (représenté par le temps d'écoulement entre deux points), a été mesuré lors de l'expérience. Du liquide a été ajoutée au tube gauche du viscosimètre jusqu'à la marque inférieure indiquée sur la figure 7. L'ampoule bleue de la pipette a alors été utilisée pour attirer le liquide sur la marque supérieure et, lorsque l'ampoule a été enlevée, le temps pris par le liquide pour revenir au repère inférieur a été enregistré.

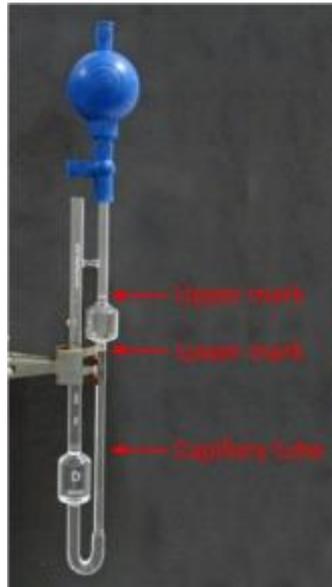


Figure 7. Taille D Le viscosimètre Rheotek à tube en U et l'ampoule de remplissage de la pipette utilisée pour le calcul de la viscosité dynamique. Les valeurs utilisées dans ce calcul, ainsi que les valeurs finales de viscosité dynamique sont fournies dans le tableau 1.

Tableau 2. Valeurs utilisées pour calculer la viscosité dynamique de l'huile à 19 ° C. La viscosité dynamique de l'eau utilisée dans le calcul a été donnée pour une température de 20 ° C présentée dans Serway (1996).

Liquide	Densité (kg/m <sup>3</sup> )	Temps d'écoulement (en secondes)	Viscosité dynamique (kg/m s)
Eau	1000	30	0.001028
Huile	880	5813	0.175404

Comme cette méthode peut être fortement affectée par les temps de réaction humains, afin d'assurer la précision du paramètre, une deuxième méthode a été utilisée pour obtenir la viscosité dynamique de l'huile. L'instrument représenté sur la figure 8 permet une détermination très précise de la viscosité d'un liquide à une température spécifiée. L'eau pompée à travers le système, contrôle la température tandis que le liquide est piégé entre un cylindre intérieur et une bague. Lorsque la bague extérieure est tournée, le couple nécessaire pour maintenir le cylindre intérieur stationnaire est enregistré.

Ceci est proportionnel à la résistance provoquée par le liquide et donc à sa viscosité dynamique.



Figure 8. Équipement utilisé pour la détermination mécanique de la viscosité de l'huile (TA Instruments, Rheometric Scientific, ARES).

Par détermination mécanique, la viscosité dynamique de l'huile à la même température (19 ° C) a été calculée seulement légèrement plus élevée à 0,19914 kg / m s. Cette analyse a également identifié l'huile comme un liquide newtonien. Cette méthode est considérée comme plus fiable, car sa précision dépend uniquement de la précision d'étalonnage de la machine.

### 1.3 Tension de surface

La tension superficielle décrit la capacité du liquide à rester sous la forme d'une gouttelette, définie par la cohésion intermoléculaire (Lee, et al., 2009). Il existe de nombreuses méthodes pour calculer cette propriété; y compris le cycle du Nouy, les méthodes de gouttelettes et de gouttes pendantes (Lee, et al., 2009). Le procédé de chute pendante est très efficace et, du fait de la nature relativement stable de l'huile, convient pour ce cas. Pour cette méthode, on a utilisé un dix premiers angströms (FTA) 200 (figure 9). La technique est basée sur la relation entre la tension superficielle et la forme géométrique d'une gouttelette de liquide. Les rayons des gouttelettes sont ensuite mesurés dans des plans perpendiculaires (Woodward, 2011). La différence de pression connue entre l'air libre et la pression à l'intérieur du liquide (déterminée par sa densité) est également utilisée dans le calcul.

Enfin, les propriétés calculées sont appliquées à l'équation de Young-Laplace (15) pour obtenir une valeur de tension superficielle

$$\Delta P = \sigma \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (15)$$

avec  $\Delta P$  la différence de pression interfaciale,  $\sigma$  la tension superficielle,  $R_1$  et  $R_2$  les rayons de courbure de la surface des gouttelettes. On a déterminé que la tension superficielle de l'huile a été de 0,03185 kg/s<sup>2</sup>. Alors que la valeur connue pour l'eau à 20 °C est plus élevée, à 0,0728 kg/s<sup>2</sup> (Engineering Toolbox, 2013).

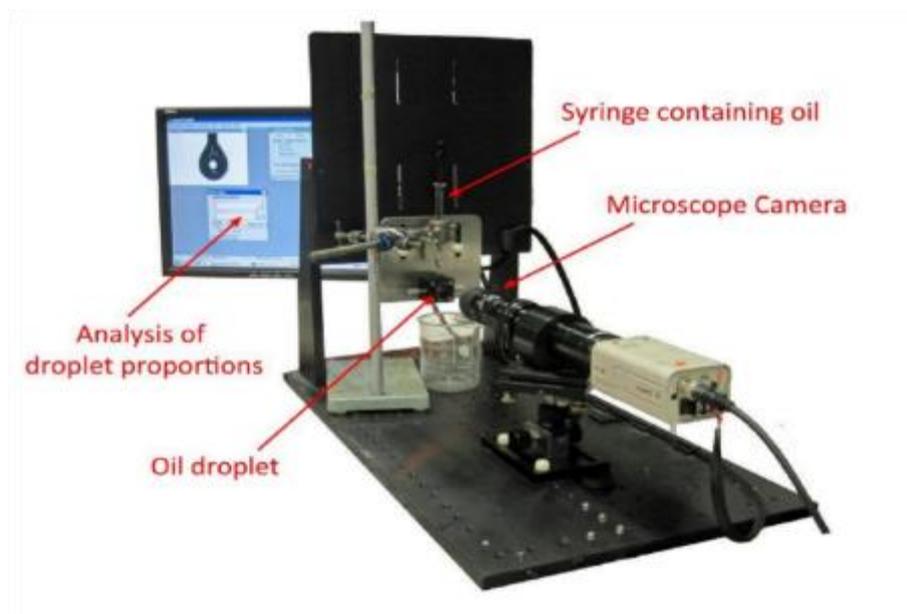


Figure 9. Équipement utilisé pour mesurer la tension superficielle de l'huile par analyse géométrique d'une gouttelette (caméra: Sanyo, et programme d'analyse: FTA 200).

#### **1.4 Conductivité hydraulique**

Le Département de l'Agriculture des États-Unis (USDA) (2013) décrit la «méthode de la tête tombante» pour calculer la conductivité hydraulique d'un fluide à travers un sol. L'équipement représenté sur la figure 10 a été utilisé pour mesurer la durée pendant laquelle une quantité incrémentielle d'huile ( $5 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3$ ) a traversé une zone connue de sol.

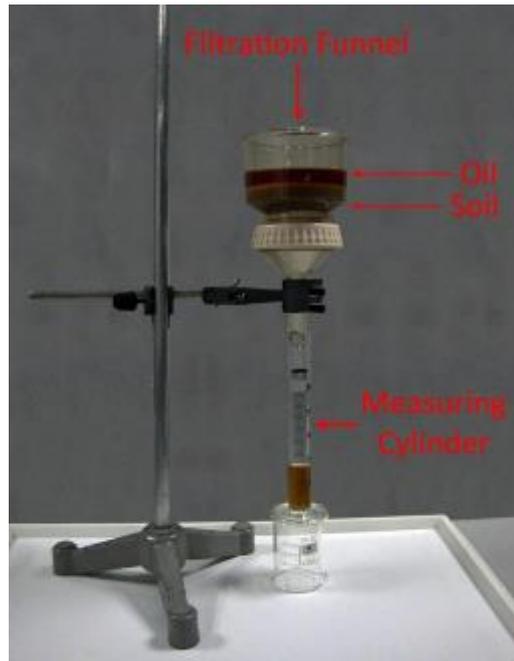


Figure 10. Configuration expérimentale pour le calcul de la conductivité hydraulique à l'aide d'un entonnoir de filtration.

Le temps pris entre chaque pas de volume a été moyenné et utilisé dans l'équation de l'énergie ( $J$ ) suivante:

$$J = \frac{Q}{A t} \quad (16)$$

où  $Q$  est le volume d'huile ( $m^3$ ) passant par une aire de section transversale  $A$  dans un temps donné  $t$ . Après des calculs d'énergie pour les deux sols différents, la conductivité hydraulique peut être déterminée par l'équation (17) qui dépend également du gradient hydraulique ( $i$ ).

$$K = \frac{J}{i} \quad (17)$$

Les mesures et relations nécessaires pour produire une valeur de gradient hydraulique sont présentées à la figure 11.

Il était difficile de surveiller simultanément la longueur de l'huile présente au-dessus du sol (c'est-à-dire d'assurer une position debout d'une tête hydraulique) à chaque pas de temps tout en mesurant également l'averse d'huile. De plus, la forme cylindrique légèrement plus étroite à la base de l'entonnoir de filtration peut avoir provoqué des mesures d'aire inexactes. En raison de la sensibilité élevée du modèle à ce paramètre, une méthode secondaire a été entreprise pour obtenir des résultats plus crédibles.

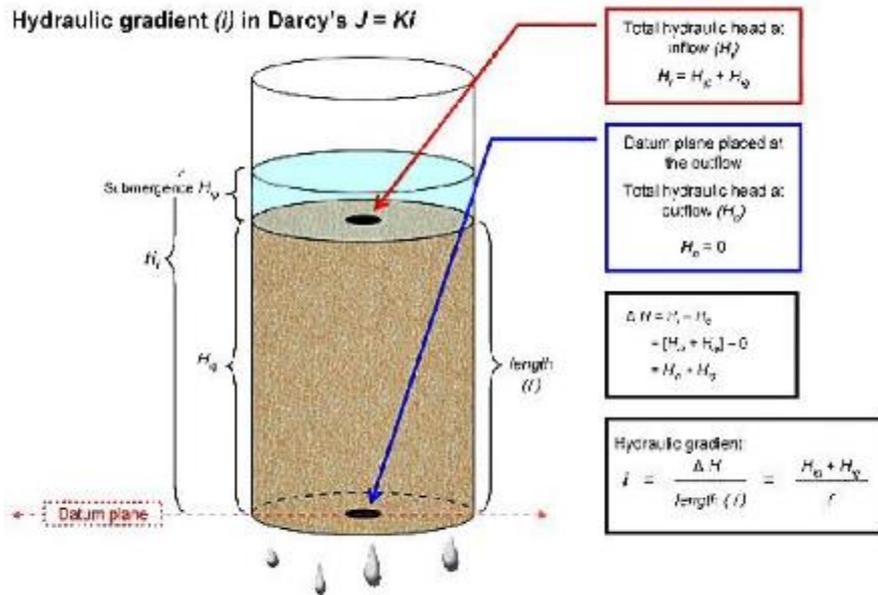


Figure 11. Représentation graphique du calcul expérimental du gradient hydraulique (USDA, 2013).

La deuxième méthode concernait la mesure du volume de liquide restant au sommet du sol à intervalles de temps équidistants. L'équipement représenté sur la figure 12 a été utilisé avec un temporisateur et un enregistreur vidéo afin d'obtenir des lectures très précises du liquide en mouvement rapide. En surveillant uniquement le niveau de liquide au sommet de la colonne du sol, on peut calculer à la fois la charge hydraulique et le volume de liquide d'infiltration dans des intervalles de temps donnés. La méthodologie a été répétée tant pour le pétrole que pour l'eau. Comme la conductivité hydraulique pour un sol particulier est liée à la perméabilité intrinsèque commune de chaque sol, la comparaison de ces valeurs fournit un moyen de vérifier les résultats.



Figure 12. Configuration expérimentale pour la deuxième méthode de calcul de la conductivité hydraulique.

La quantité infiltrée par le sol à chaque pas de temps a été moyennée et appliquée à l'équation 14, en même temps que le temps associé. En raison de l'infiltration très rapide des deux liquides dans le sable grossier, et en raison des volumes relativement petits impliqués dans la méthodologie, la conductivité hydraulique pour ce matériau était plus difficile à calculer avec précision. Les valeurs utilisées pour le calcul de la conductivité hydraulique pour les deux sols contenant chaque liquide sont présentées dans le tableau 3.

Les valeurs du tableau 4 ont ensuite été utilisées pour obtenir des valeurs de perméabilité intrinsèque à des fins de comparaison.

Tableau 3. Valeurs utilisées pour calculer la conductivité hydraulique des deux sols avec chacun des deux liquides.

Type de sol	Liquide	Volume moyen (m <sup>3</sup> )	Surface transversale (m <sup>2</sup> )	Temps pris (s)	Gradient hydraulique	Conductivité hydraulique (m/s)
Grossière	Eau	5.14 x 10 <sup>-6</sup>	0.000616	1	1.10	7.62 x 10 <sup>-3</sup>
Grossière	Huile	2.53 x 10 <sup>-6</sup>	0.000616	60	1.05	6.53 x 10 <sup>-5</sup>
Fin	Eau	2.29 x 10 <sup>-6</sup>	0.000616	10	1.04	3.56 x 10 <sup>-4</sup>
Fin	Huile	2.86 x 10 <sup>-7</sup>	0.000616	60	1.01	7.67 x 10 <sup>-6</sup>

Tableau 4. Valeurs utilisées pour calculer la perméabilité intrinsèque des deux sols.

Type de sol	Liquide	Conductivité hydraulique (m/s)	Viscosité dynamique du liquide (kg/m s)	Densité du liquide (kg/m <sup>3</sup> )	Accélération Gravitationnelle (m/s)	Perméabilité intrinsèque (m <sup>2</sup> )
Grossière	Eau	7.62 x 10 <sup>-3</sup>	0.001028	1000	9.80665	7.99 x 10 <sup>-10</sup>
Grossière	Huile	6.53 x 10 <sup>-5</sup>	0.175404	880	9.80665	1.33 x 10 <sup>-9</sup>
Fin	Eau	3.56 x 10 <sup>-4</sup>	0.001028	1000	9.80665	3.73 x 10 <sup>-11</sup>
Fin	Huile	7.67 x 10 <sup>-6</sup>	0.175404	880	9.80665	1.56 x 10 <sup>-10</sup>

Les valeurs de perméabilité intrinsèque ne varient que d'une quantité relativement faible. Cela pourrait être le résultat de mesures prises au millimètre près, ce qui est aussi précis que la méthodologie le permet. Une autre vérification des valeurs de conductivité hydraulique consisterait à vérifier si les valeurs tombent dans les plages attendues fournies dans la littérature.

Domenico et Schwartz (1990) fournissent des plages de conductivité hydraulique approximatives pour l'eau dans une variété de matériaux sédimentaires non consolidés. Pour le sable grossier, cette plage (en m/s) est de  $9.10^{-7}$  à  $6.10^{-3}$  et pour le sable fin la plage est donnée comme  $2.10^{-7}$  à  $2.10^{-4}$ .

Dans les deux types de sol, les valeurs calculées expérimentalement de la conductivité hydraulique de l'eau se situent dans leur plage respective.

### **1.5 Facteur de géométrie du sol**

Un paramètre utilisé pour décrire la façon dont le sol se comporte physiquement est le facteur de géométrie du sol sans dimension. Kao et Hunt (1996) ont rassemblé un tableau des valeurs de la géométrie du sol tiré d'une gamme de sources littéraires (figure 13). Le tableau classe les valeurs basées sur la taille du sol et la perméabilité intrinsèque. Les particules de sable fin ont une taille moyenne de  $150 \mu\text{m}$  et une perméabilité intrinsèque de  $6,39.10^{-12} \text{ m}^2$ . La comparaison la plus proche de ce matériau dans le tableau des valeurs géométriques est le sédiment limoneux de Colombie qui a un facteur  $B$  de 0,45. La catégorie la plus adaptée à la taille (environ  $350 \mu\text{m}$ ) et à la perméabilité intrinsèque ( $167.10^{-12}$ ) du sable grossier est le «sable (250-350  $\mu\text{m}$ )». Cela a une valeur  $B$  de 0,4.

**Table 1.** Calculation of  $B$  From Reported Horizontal Infiltration Data

Media, $\mu\text{m}$	$k$ , $10^{-12} \text{ m}^2$	$B$	Source
Glass beads (210–325)	12	0.4	<i>Youngs and Price [1981]<sup>a</sup></i>
Glass beads (115–180)	10	0.4	
Glass beads (60–95)	6.7	0.5	
Sand (350–500)	58	0.4	
Sand (250–350)	55	0.4	
Sand (180–250)	20	0.45	
Graded sand (180–250)	19	0.5	
Slate dust (40–125)	0.28	0.4	
Sandy loam (60–350)	0.29	0.3	
Silt loam (2–60)	0.018	0.3	
Glass beads (75)	4.5	0.6	<i>Bruce and Klute [1956]<sup>b</sup></i>
Coarse sand (50–250)	11	0.84	
Mason county fine sand	3.3	0.57	
Bloomfield sand	68	0.57	
Columbia silt loam	0.77	0.45	<i>Davidson et al. [1963]<sup>c</sup></i>
Hesperia sandy loam	0.50	0.35	
Slate dust	0.21	0.45	<i>Peck [1964]<sup>c</sup></i>
Glass beads (105–125) with 20% ethyl alcohol in water	13	0.5	<i>Malik et al. [1979]<sup>b</sup></i>
Glass beads (105–125) with methyl alcohol	13	0.7	
Average		0.5	

All experiments used water as the infiltrating liquid unless otherwise indicated.

<sup>a</sup> $B$  calculated with measured sorptivities divided by  $\Delta\theta$ .

<sup>b</sup>Values of  $k$  calculated with the Kozeny-Carmen and Fair-Hatch equations from reported particle size distributions [*Freeze and Cherry, 1979*].

<sup>c</sup>Measured permeability.

Figure 13. Tableau des facteurs de forme géométrique pour différents sols (Kao & Hunt, 1996)

Cependant, comme il n'y a qu'un nombre limité de valeurs dans le tableau, Kao et Hunt (1996) fournissent une autre méthode de calcul du facteur  $B$ . Il s'agit de deux équations (18 et 19)

$$\beta = \frac{k}{R^2} \quad (18)$$

Dans cette équation,  $\beta$  est une propriété du sol décrivant à la fois la géométrie de ses canaux d'écoulement et sa porosité.

$$B = \frac{1}{\sqrt{2}\beta^{\frac{1}{4}}} \quad (19)$$

En utilisant ces équations, les valeurs B calculées pour les matériaux fins et grossiers sont respectivement de 5,45 et 3,68. Les valeurs dérivées mathématiquement sont extrêmement différentes des valeurs proposées dans le tableau. Cela peut être dû au fait que les matériaux utilisés pour les expériences en laboratoire sont beaucoup plus uniformes que ceux trouvés naturellement et se comportent donc de manière très différente. On suppose que la méthodologie mathématique est plus robuste puisqu'elle est basée uniquement sur des propriétés quantitatives du sol, par opposition à une sélection limitée d'observations de sa taille, de son aspect et de sa perméabilité intrinsèque (tel qu'utilisé dans le tableau).

## 2 Méthodologie mathématique

Le code mathématique, appelé 'infil1', a été écrit sous MATLAB 7.9.0 (R2009B). Il est fourni en entier dans l'annexe A. Toutes les propriétés de fluide et de média calculées dans la section II.1 ont été assignées comme paramètres d'entrée. En outre, on a supposé que la saturation de l'huile au front de mouillage était de 100% et l'accélération de la pesanteur était entrée dans six chiffres significatifs pour la précision.

Le modèle demande aux utilisateurs de saisir les types de sable et de liquide à simuler. L'utilisateur peut alors choisir entre deux sorties différentes: la première comprenant des images, les profondeurs maximales et les infiltrations à des intervalles de temps spécifiés; la seconde, une simulation vidéo en temps réel des premières 1000 secondes, avec des images toutes les secondes. La première sortie permet de faire des comparaisons spécifiques entre les données expérimentales, et la seconde décrit les modèles globaux de changement.

L'équation utilisée pour simuler l'infiltration verticale est celle décrite précédemment (voir I.6 Modèles d'infiltration de Green-Ampt) présentée dans Kao et Hunt (2001),

$$t = \frac{\Delta\theta \mu}{\rho g k k_r} \left[ z_f + h_f \ln \left( 1 - \frac{z_f}{h_f} \right) \right] \quad (20)$$

L'équation 20 est utilisée pour calculer le temps nécessaire aux liquides pour s'infiltrer à 0,5 m avec des relevés tous les 0,0005 m. Les résultats sont ensuite interpolés pour trouver les profondeurs d'infiltration, suivant des pas de temps appropriés pour chaque simulation. L'entrée des types de liquides et de sols par l'utilisateur permet la détermination de l'échelle de

temps d'interpolation convenable, figurant dans le code comme un «vecteur de temps». Les résultats sont ensuite stockés dans un «vecteur de profondeur».

Kao et Hunt (2001) décrivent l'utilisation d'une autre équation pour calculer l'infiltration horizontale. Cette relation est une combinaison des équations de Green-Ampt et de Philip,

$$x_a = B \left( \frac{\sigma}{\mu} \right)^{\frac{1}{2}} k^{\frac{1}{4}} (t - t_a)^{\frac{1}{2}} \quad (21)$$

Comme le positionnement de la valeur dans le «vecteur de temps» est équivalent à l'infiltration verticale dans le «vecteur de profondeur», ceux-ci sont utilisés dans les calculs horizontaux. En guise d'exemple, la largeur de l'infiltration au temps  $t$  et à la profondeur donnée dans la troisième position du vecteur de profondeur est résolue en assignant  $t_a$  comme le temps dans la troisième position du vecteur de temps. Ainsi,  $t$  est décomposé en temps utilisé pour se déplacer verticalement (jusqu'à la troisième position du vecteur de profondeur) et le temps restant ( $t - t_a$ ) est consacré au mouvement latéral. L'infiltration horizontale est stockée dans une matrice, chaque ligne représentant les largeurs calculées (à des positions équivalentes de vecteur de profondeur) pour un temps donné.

Pour produire des résultats pour des intervalles de temps d'entrée utilisateur, le code a été programmé pour rechercher les valeurs dans le vecteur de temps et afficher les données de sortie pertinentes et un graphique d'infiltration de sortie. Les données d'intérêt comprenaient des valeurs d'infiltration maximale dans les axes  $z$  et  $x$  en  $m$ , ainsi que la superficie du déversement en  $m^2$ . En utilisant ces données, un contrôle aléatoire a également été effectué sur le modèle mathématique en comparant les valeurs de sortie à leurs résultats d'équations plus visuelles produits dans Excel.

### **3 Méthodologie expérimentale**

L'équipement utilisé pour l'expérience est représenté à la figure 14. Il comprenait une boîte en Plexiglas pour contenir le domaine du sol; dont l'intérieur est délimité par deux encarts en mousse afin de réduire le volume de sol nécessaire pour une seule simulation. Une règle de 0,3 m est attachée à la marge de la boîte pour l'échelle. Pour permettre au liquide de s'écouler librement dans le sol (sans contrainte par des gradients de pression), on a laissé le fond de la

caisse ouvert. Toutefois, pour empêcher le sol de s'échapper par cette ouverture, un tissu fin, suivi d'une grille à mailles est placé à la base de la boîte. De plus, pour limiter l'affaissement du domaine du sol à travers ces matériaux de base, tout en permettant le passage de l'air et du liquide, trois supports d'anneaux solides ont été placés en équidistance le long de sa base. L'équipement a été placé dans un plateau pour recueillir le liquide résiduel et pour transporter les matériaux utilisés après une expérience d'infiltration.

L'une des plus grandes limitations dans l'expérience était l'exigence et les dimensions de la boîte d'infiltration. La profondeur étroite de la boîte dans l'axe y était nécessaire pour assurer la visualisation de la courbe d'infiltration bidimensionnelle. Cependant, le liquide vu de l'extérieur pourrait facilement voyager le long de l'interface sable-Perspex et donc se déplacer plus rapidement que sinon à travers le sable.

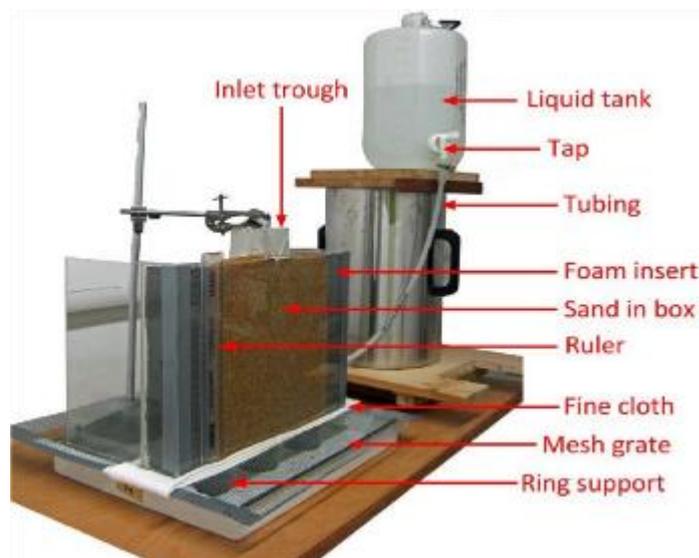


Figure 14. Image du montage expérimental pour l'évaluation du modèle.

La régulation du liquide entrant était importante pour obtenir des résultats précis. Le liquide s'écoulait d'un grand récipient dans un robinet et un tube qui a été testé pour assurer un débit régulier.

A l'origine, un entonnoir a été utilisé pour positionner le point d'écoulement initial dans le domaine du sol; cependant le liquide qui s'écoule dans le long entonnoir gagne en vitesse, provoquant l'excavation du sol et le débordement liquide subséquent. En outre, l'entonnoir ne pouvait être positionné qu'à un point le long de la profondeur de 0,055 m (axe des ordonnées) de la boîte. La signification du mouvement latéral de l'avant vers l'arrière de la boîte réduirait la précision de l'expérience bidimensionnelle et, pour le sable grossier, le liquide n'était pas visible de l'écran frontal de la boîte. Pour éliminer ces problèmes, une goulotte en V a été fixée

au sommet de la boîte. L'auge (figure 15) a permis au liquide de pénétrer dans la boîte de façon égale à travers le haut, à un point précis dans le plan d'intérêt à deux dimensions. Comme la capacité d'infiltration du sol commence à son maximum et diminue à une capacité de saturation, il était important de régler manuellement le débit d'entrée en utilisant le robinet pour empêcher le débordement de liquide et l'excavation du sol. En outre, la régulation des entrées a été utilisée pour assurer un écoulement continu de liquide dans le domaine du sol en maintenant une charge hydraulique debout dans l'auge tout au long de l'expérience enregistrée.

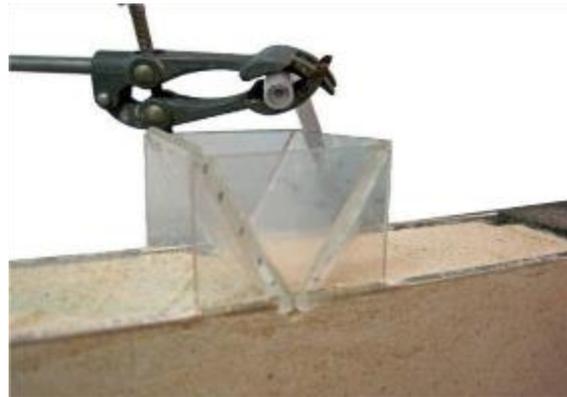


Figure 15. Image en gros plan du tube de sortie de liquide et de la goulotte d'admission au sommet du domaine du sol.

La température du laboratoire était un facteur important dans le contrôle des propriétés d'écoulement du liquide. Ainsi, la ventilation du laboratoire a été encouragée pour maintenir des températures régulières, et les conditions ont été enregistrées dans le cadre des résultats. La température en laboratoire était, en moyenne,  $19^{\circ}\text{C}$  lors du calcul des paramètres d'entrée. Malheureusement, un changement dans les conditions ambiantes a entraîné l'augmentation de la moyenne à  $21^{\circ}\text{C}$  pendant les expériences d'infiltration. On peut s'attendre à un léger effet négatif sur la précision des simulations du modèle.

Le sable fin s'est avéré problématique lors du remplissage de la boîte de Perspex en raison de la formation de lames distinctes. Le déversement continu du sable aurait trié ce dernier selon la taille de grain, avec des grains grossier restant en haut tandis que les matières plus fines tombant vers le fond. Au cours de l'expérimentation préliminaire, le mouvement du liquide a été clairement prononcé le long des régions de sable libre entre les couches. Pour contrôler cet impact, du sable a été ajouté au centre de la boîte dans le plan  $x$ - $y$  dans une tentative pour au moins conserver la symétrie dans la vue bidimensionnelle de face de l'expérience. Bien que le

liquide se déplace encore préférentiellement le long des couches, cela a été pris en considération lors de l'évaluation de la précision du modèle.

#### 4 Analyse de sensibilité

Comme deux équations ont été utilisées dans le modèle pour simuler l'infiltration dans chaque dimension, l'analyse a été effectuée individuellement pour chacune d'elles. La sensibilité d'une équation a été étudiée en variant successivement chacun des paramètres d'entrée de  $-100\%$  à  $+100\%$  et en ajoutant les résultats pour 100 échelons de temps équi-temporels. Étant donné que les paramètres d'entrée varient beaucoup entre les différents types de sol et de liquide, les valeurs moyennes ont été prises pour fournir les valeurs les plus représentatives pour l'analyse. Le délai global pour l'analyse de sensibilité était 6500 secondes, ce qui est juste en dessous de la moyenne des délais simulés dans chacune des quatre expériences. Les sommes résultantes ont été comparées à la sortie du modèle pour les paramètres ajustés à  $0\%$  pour déterminer la variation en pourcentage causée par l'altération de chaque paramètre.

La figure 16 donne une représentation claire de l'analyse de sensibilité de l'équation d'infiltration verticale. D'après le graphique, il est clair que la simulation d'infiltration verticale est bien plus sensible au paramètre d'entrée  $K$  (conductivité hydraulique). Comme prévu, cette relation est positive, c'est-à-dire que des valeurs plus élevées de la conductivité hydraulique produisent des valeurs d'infiltration plus élevées. L'influence du paramètre  $K$  est plus prononcée dans le sens positif que dans le sens négatif. La valeur de  $B$  (facteur géométrique) a un faible effet positif sur les résultats de sortie du modèle, en plus, celle de  $\sigma$  (tension superficielle) a une influence positive encore plus faible. La variation des valeurs de  $\mu$  (viscosité) et de  $\rho$  (densité) de liquides a le même faible effet négatif sur la sortie du modèle.

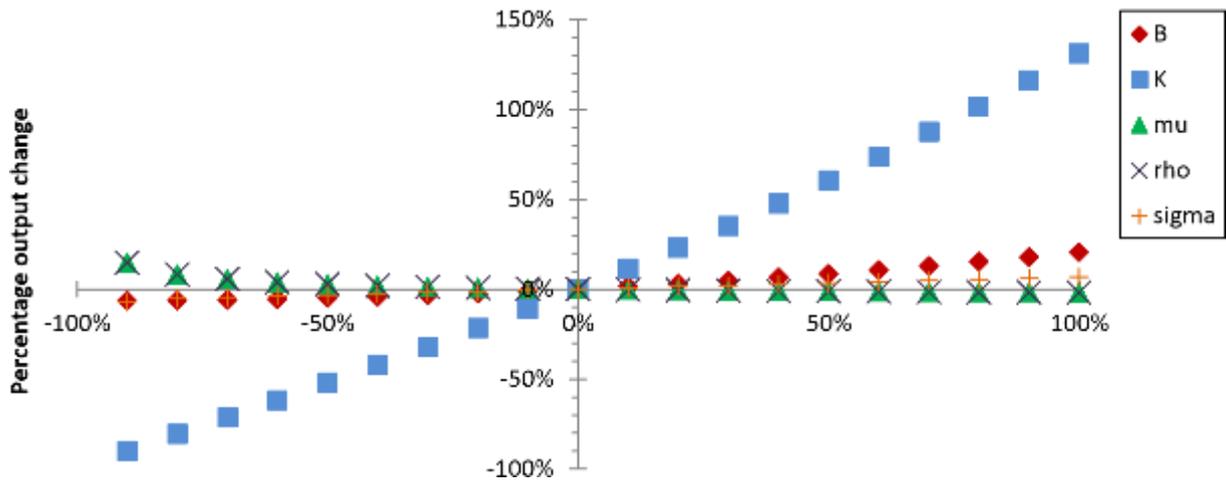
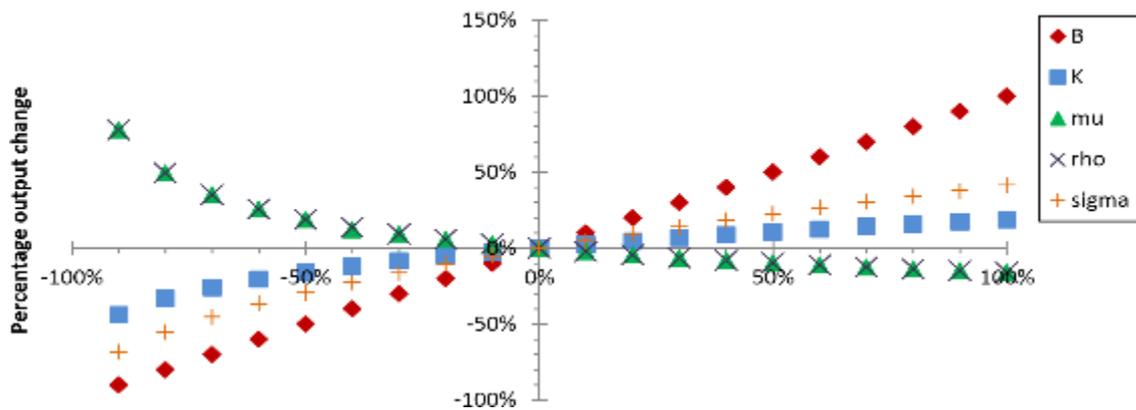


Figure 16. Graphique du pourcentage de sensibilité de la sortie de l'équation d'infiltration verticale à la variation en pourcentage dans chacune des entrées. Centré sur les valeurs moyennes pour chacun des paramètres et calculé en ajoutant les 100 premiers temps équi-temporels jusqu'à 6500 secondes.

La même analyse effectuée pour l'équation d'infiltration horizontale est présentée à la figure 17. Dans ce cas, le graphique montre que le modèle de sortie pour l'infiltration horizontale est le plus sensible aux changements de  $-100\%$  à  $+100\%$  de la valeur de  $B$ . Cela a une influence positive, directement proportionnelle avec la production du modèle. Les valeurs de  $\sigma$  et de  $K$  ont également une conséquence positive sur la sortie du modèle, mais la relation diminue exponentiellement à mesure que les valeurs d'entrée diminuent. Cette relation est opposée à celle des changements dans les valeurs de  $\mu$  et de  $\rho$ , où les valeurs de sortie du modèle augmentent exponentiellement à mesure que les entrées diminuent. Les valeurs de  $\mu$  et de  $\rho$  sont positivement liées à la sortie du modèle, pourtant le modèle est légèrement plus sensible au changement de  $\sigma$  qu'à celui de  $\rho$ .

Comme prévu, la nature positive ou négative des influences pour les propriétés individuelles reste la même dans les deux équations. Les raisons des différences de sensibilités découlent de la nature de l'infiltration verticale entraînée par la gravité, et de la nature plus complexe de l'infiltration horizontale, structurellement dépendante mais dominée par la capillarité.



Variation en pourcentage du paramètre d'entrée

Figure 17. Graphique du pourcentage de sensibilité de la sortie de l'équation d'infiltration horizontale à la variation en pourcentage dans chacune des entrées. Centré sur les valeurs moyennes pour chacun des paramètres et calculé en ajoutant les 100 premiers temps équi-temporels jusqu'à 6500 secondes.

Les simulations globales sont les plus sensibles à l'entrée de conductivité hydraulique, qui est une propriété décrivant l'interaction entre le milieu poreux et son liquide d'infiltration. En moyenne, l'équation d'infiltration horizontale est plus sensible à l'entrée des paramètres. En raison des sensibilités du modèle à la conductivité hydraulique et aux valeurs des facteurs géométriques, ces paramètres ont été calculés par deux moyens différents pour améliorer leur précision. Cette analyse n'étudie que la sensibilité du modèle basée sur le changement de propagation de l'infiltration mais n'indique pas les différences avec la forme d'infiltration qui sont déterminées par une combinaison de deux équations. L'analyse fournit une bonne indication générale des sensibilités du modèle mais elles dépendent fortement des valeurs moyennes des paramètres utilisées. On peut donc s'attendre à ce que les sensibilités varient légèrement pour chacune des simulations du modèle individuel

## **Chapitre III : RESULTATS**

L'évaluation du modèle a été réalisée en utilisant des expériences impliquant l'eau et le pétrole circulant dans différents types de sol. Des profils expérimentaux d'infiltration ont été obtenus pour les expériences allant jusqu'à 0,3 m de profondeur (dans l'un des cas, celui-ci a été limité à 0,15 m), et l'intervalle de temps a été divisé pour produire un minimum de 18 étapes de temps. Des règles de 0,3 m sont fournies autour du domaine pour l'échelle et une ligne centrale a été dessinée en rouge pour référence. Des profils d'infiltration dérivés de la simulation mathématique ont ensuite été produits pour les étapes temporelles pertinentes dans les conditions expérimentales calculées.

Les valeurs utilisées dans l'analyse quantitative sont fournies dans les tableaux de l'annexe 2. Notons que les graphiques comparant les échelles de déversement ont des échelles d'axe y comparables, mais les échelles de temps diffèrent considérablement. En outre, les axes affichant les zones de déversement ont été modifiés à chaque fois pour mieux s'adapter aux données affichées.

### **1 Évaluation utilisant du sable grossier**

Le modèle a été vérifié en sélectionnant les propriétés du sable grossier et en comparant la production avec les infiltrations réelles dans le laboratoire. Le sable a fourni un domaine uniforme avec un front de mouillage distinct visible pour l'analyse. L'analyse en laboratoire du sable grossier, dans un domaine carré de 900 cm<sup>2</sup>, a impliqué des échelles de temps relativement courtes allant jusqu'à 18 minutes.

## 1.1 Sable grossier et eau

L'image finale utilisée dans le calibrage du modèle de l'infiltration de sable grossier et d'eau est présentée sur la figure 18. Cette image a été extraite de la vidéo expérimentale lorsque l'eau avait atteint l'extrémité horizontale du domaine.

Les courbes d'infiltration expérimentales ont été comparées aux résultats de la production du modèle à des intervalles de temps séquentiels en traçant les séries temporelles de la distance verticale entre le point de fuite et le front de mouillage, l'étendue horizontale du liquide à partir de l'épicentre de fuite et les zones de déversement. Ces graphiques pour l'eau s'écoulant à travers le sable grossier sont représentés à la figure 19.

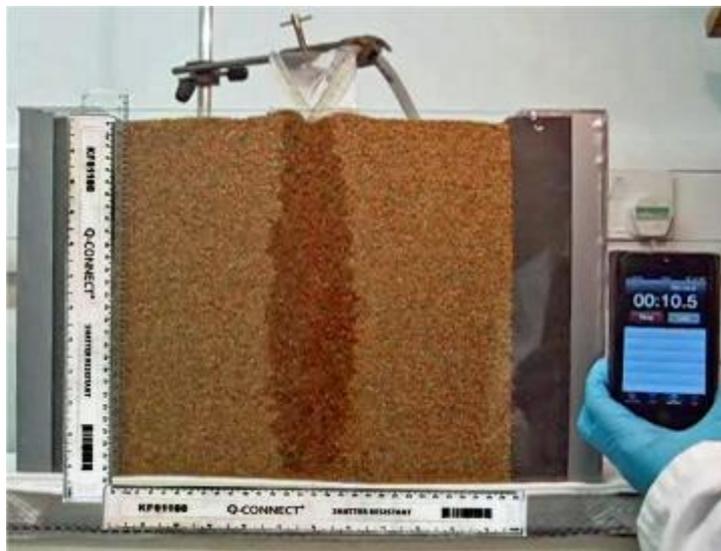


Figure 18. Capture d'image de l'expérience finale (à 10,5 secondes) pour l'eau qui s'écoule dans le sable grossier. Des règles de 0,3 m sont fournies autour du domaine pour l'échelle et une ligne médiane a été dessinée en rouge pour référence.

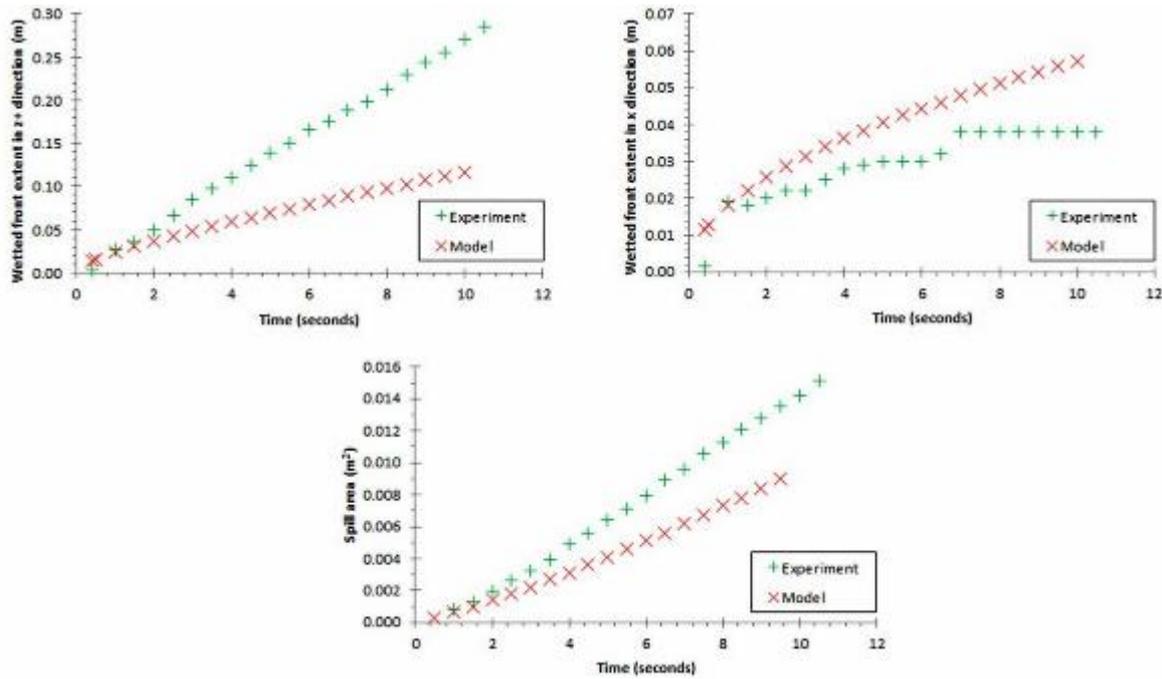


Figure 19. Graphiques comparant l'expérience et les résultats du modèle de (1) l'étendue frontale mouillée dans la direction z +, (2) la propagation horizontale à partir de l'épicentre du déversement et (3) les différences dans la zone de déversement (pour l'eau circulant dans le sable grossier).

La figure 20 fournit une visualisation complète des zones de déversement à un intervalle de temps en vue d'expliquer davantage les différences entre les résultats prévus et observés.

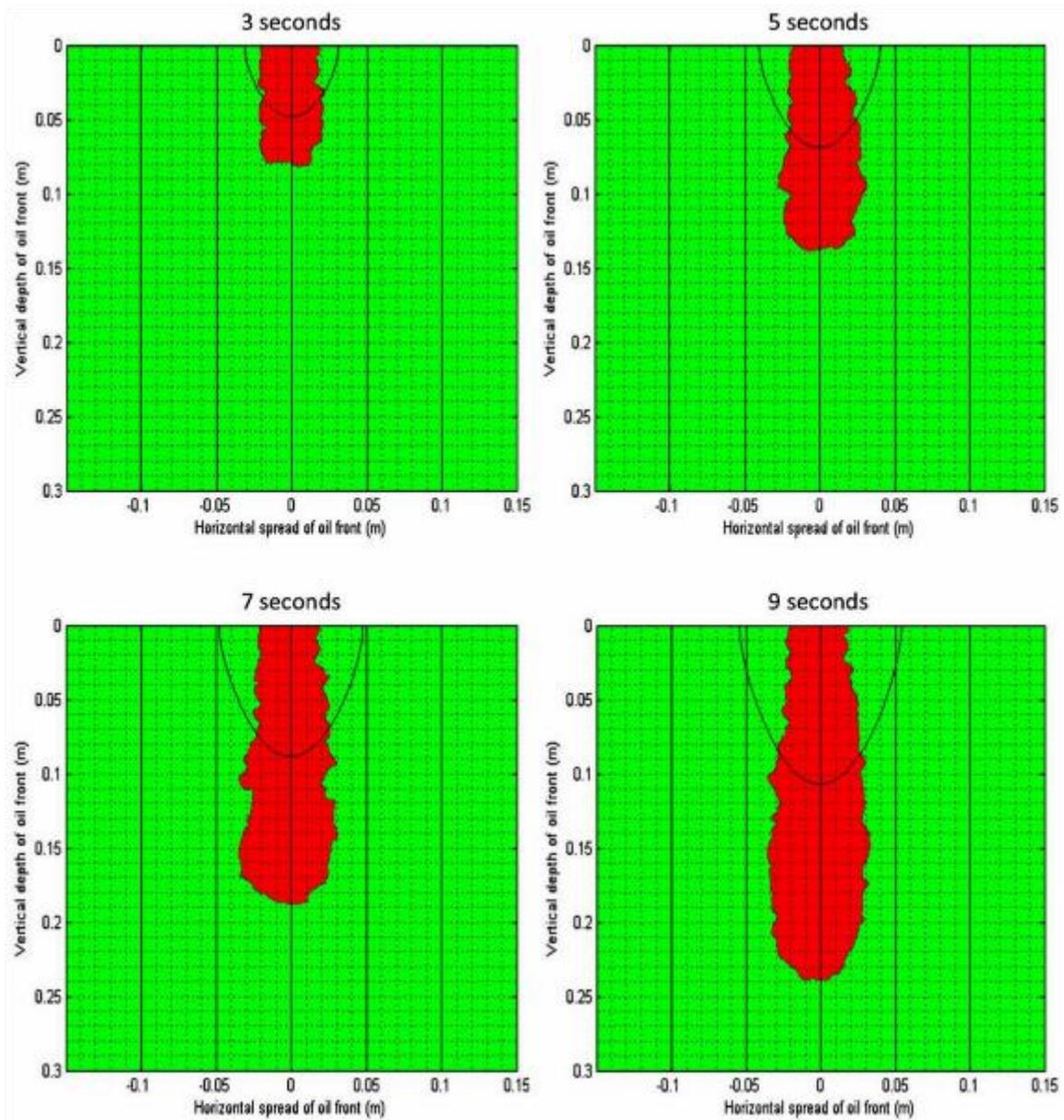


Figure 20. Images superposées de l'expérience et courbes d'infiltration du modèle pour l'eau s'écoulant à travers du sable grossier à quatre temps différents (3, 5, 7 et 9 secondes).

## 1.2 Sable grossier et huile

Pour le même sol grossier, la méthode a été répétée avec de l'huile. L'image finale utilisée dans les résultats expérimentaux, à mesure que l'huile atteignait l'étendue inférieure du domaine, est fournie sur la figure 21.

Comme la vitesse d'infiltration dépassait le débit maximal du réservoir et du système de tuyau, de l'huile supplémentaire a dû être appliquée manuellement pour assurer une charge constante à la source de l'écoulement tout au long de la simulation. Les données pour l'analyse qualitative sont fournies dans les graphiques de la figure 22.

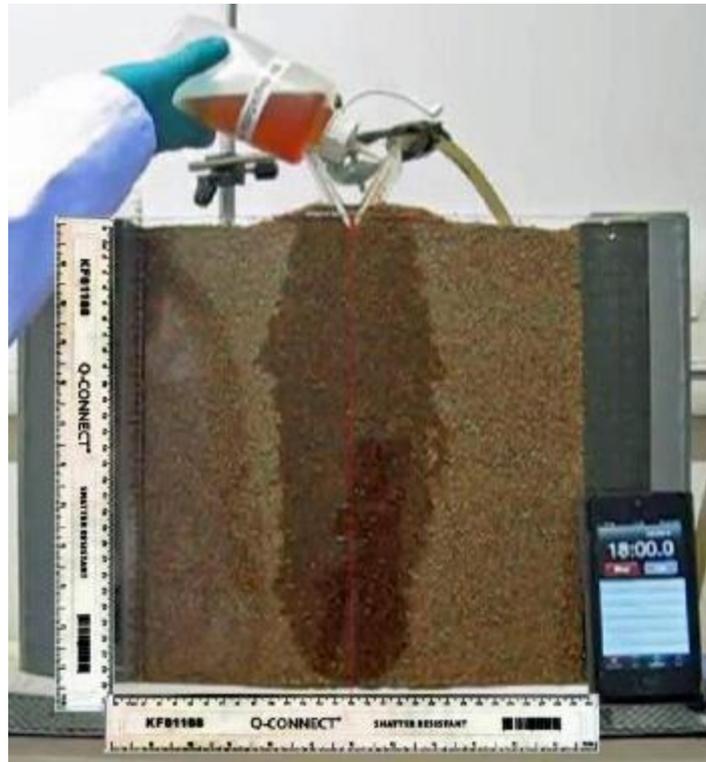


Figure 21. Capture d'image de l'expérience finale (à 18 minutes) pour l'huile s'écoulant dans le sable grossier.

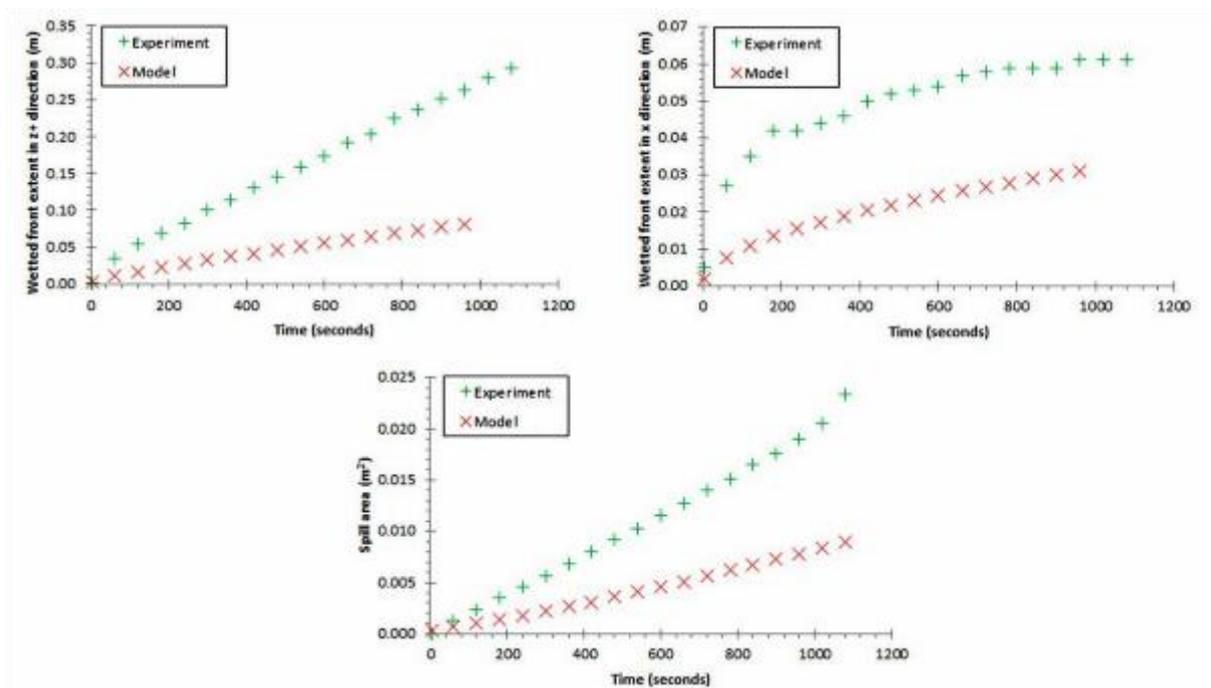


Figure 22. Graphiques comparant l'expérience et les résultats du modèle de (1) l'étendue frontale mouillée dans la direction  $z +$ , (2) la propagation horizontale à partir de l'épicentre du déversement et (3) les différences dans la zone de déversement (pour l'huile circulant dans le sable grossier).

Les courbes issues de l'expérience et du modèle sont superposées dans la figure 23 en vue de leur comparaison.

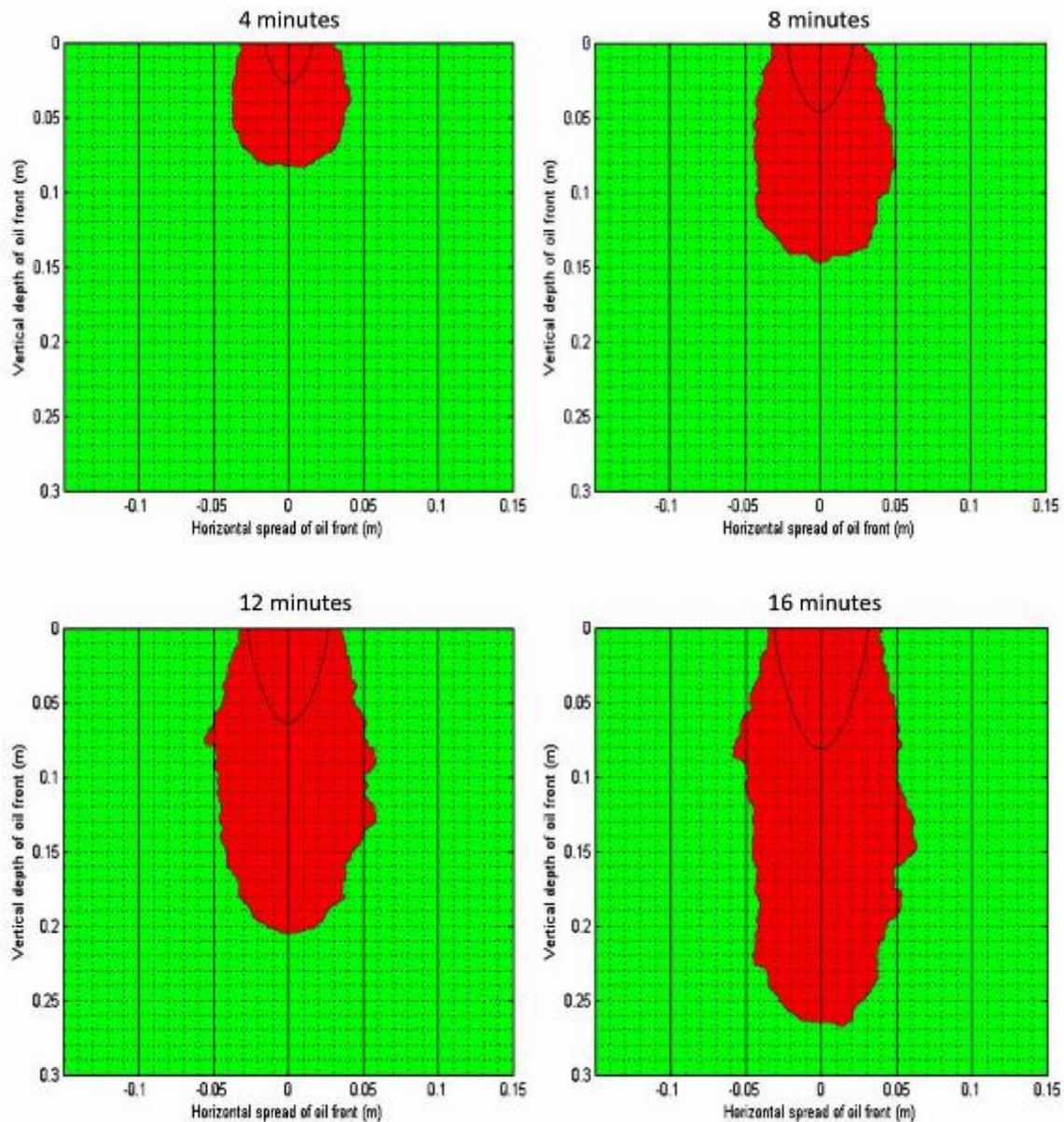


Figure 23. Images superposées de l'expérience et courbes d'infiltration du modèle pour l'huile s'écoulant à travers du sable grossier à quatre temps différents (4, 8, 12 et 16 minutes).

## 2 Évaluation utilisant du sable fin

La vérification du modèle a également été effectuée en utilisant le modèle et l'infiltration expérimentale d'eau et d'huile dans un domaine de sable très fin.

Pour obtenir une image complète des mesures de l'étendue des déversements, l'infiltration verticale a été mesurée à la fois comme la profondeur maximale totale et comme

la profondeur le long de l'épicentre du déversement. De plus, les lectures horizontales ont été prises à partir de l'épicentre à la fois au point le plus large de la courbe globale et au plus grand rameau individuel.

Le travail de laboratoire sur le sable fin impliquait des échelles de temps beaucoup plus importantes que celles du sable grossier. Les expériences devaient encore être étroitement surveillées tout au long du processus pour s'assurer que les débits étaient modifiés pour correspondre au changement apparent entre la vitesse d'infiltration initiale et celle d'infiltration à la capacité de saturation.

## 2.1 Sable fin et eau

L'infiltration préférentielle le long de la région d'espaces à grandes pores entre les couches de sable est évidente dans l'assortiment de différentes ramifications visible sur la figure 24.



Figure 24. Capture d'image de l'expérience finale (à 4 minutes 15 secondes) pour l'eau s'écoulant dans du sable fin.

La figure 25 présente les graphiques contenant les valeurs de profondeur d'infiltration, de largeur et de surface utilisées pour la comparaison avec les valeurs du modèle.

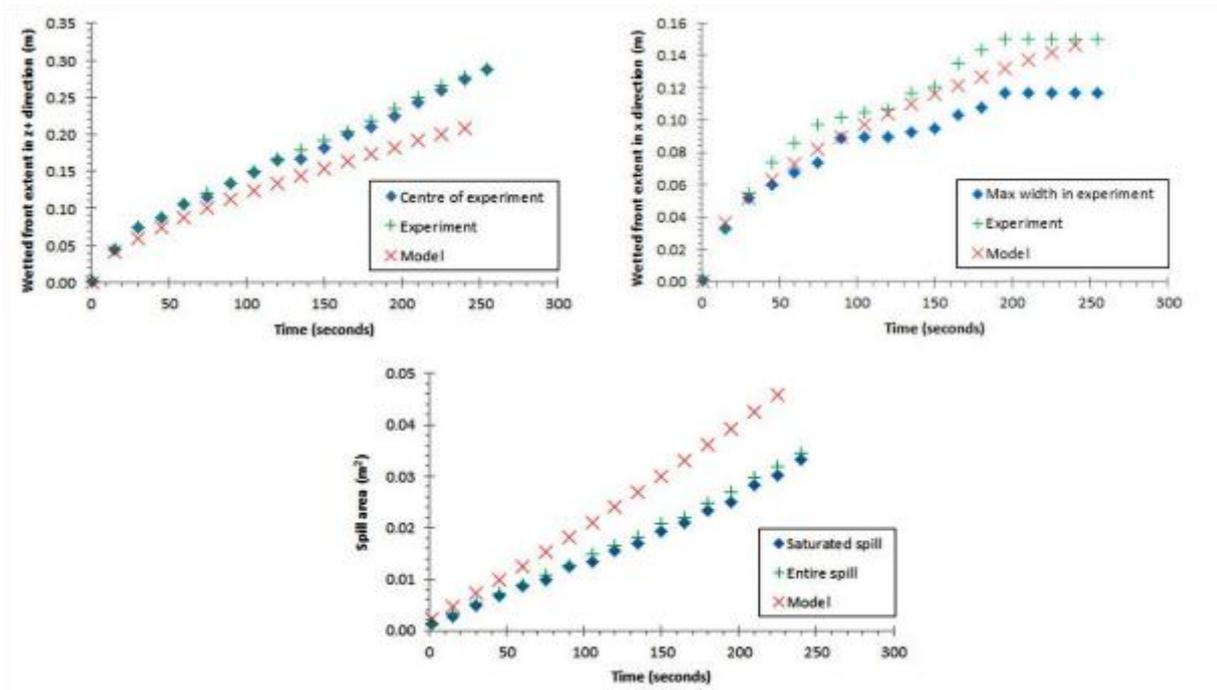


Figure 25. Graphiques comparant l'expérience et les résultats du modèle de (1) l'étendue frontale mouillée dans la direction  $z +$ , (2) la propagation horizontale à partir de l'épicentre du déversement et (3) les différences dans la zone de déversement (pour l'eau circulant dans le sable fin).

Pour étudier plus en détail les modèles de déversement, quatre périodes de temps sont affichées dans la figure 26 pour comparaison.

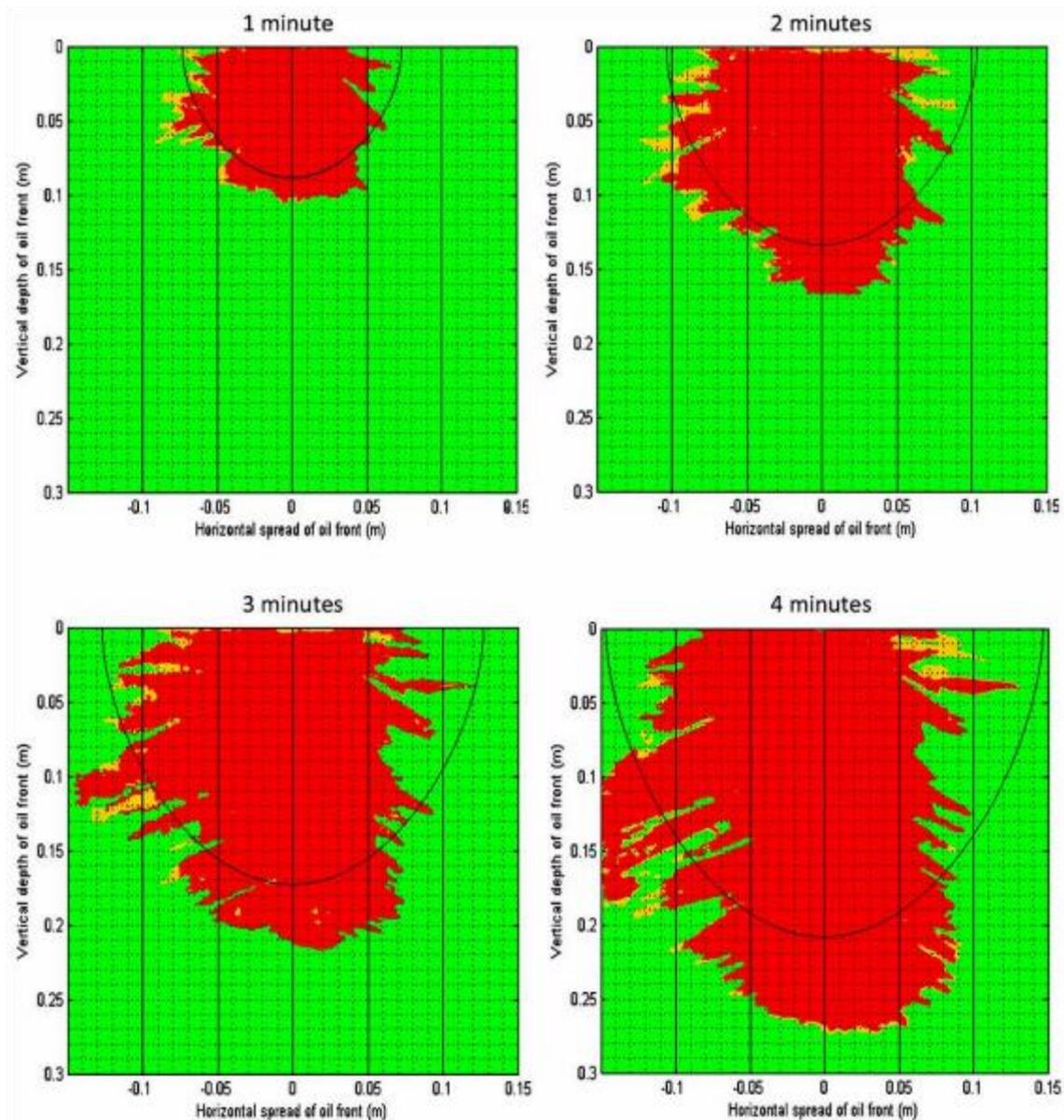


Figure 26. Images superposées de l'expérience et courbes d'infiltration du modèle pour l'eau s'écoulant à travers du sable fin à quatre temps différents (1, 2, 3 et 4 minutes).

## 2.2 Sable fin et huile

L'expérience a été conduite une dernière fois en utilisant de l'huile s'écoulant à travers du sable fin. Elle a exigé la prise des photographies tous les 15 mn, ainsi que la surveillance fréquente pour maintenir une charge hydraulique permanente d'huile depuis la source. En raison des contraintes de temps et de travail, l'expérience a été exécutée seulement jusqu'à ce que la moitié de la boîte dans le domaine vertical soit saturée (0,15 m), ce qui avait pris sept (7) heures comme montré à la figure 27.

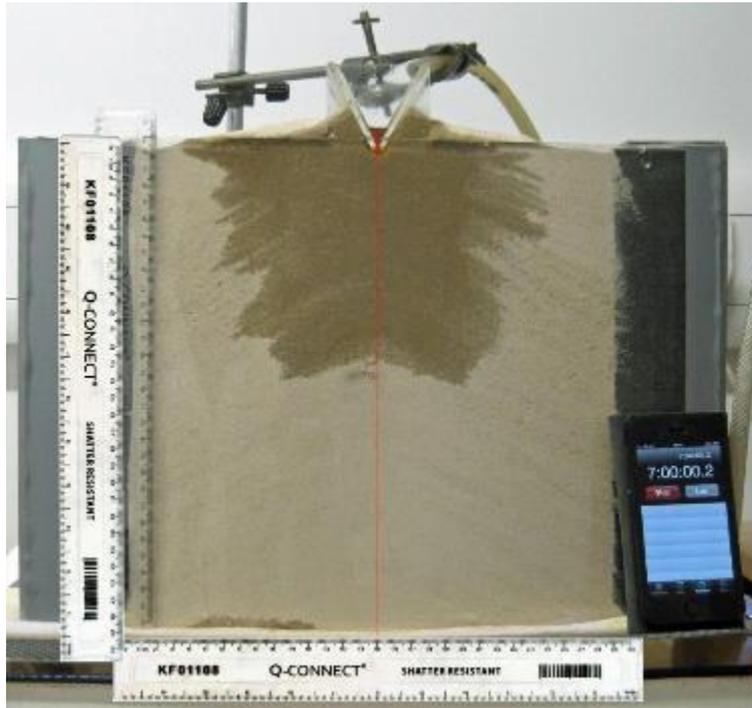


Figure 27. Capture d'image de l'expérience finale (à 7 heures et 0,2 seconde) pour l'huile s'écoulant à travers du sable fin.

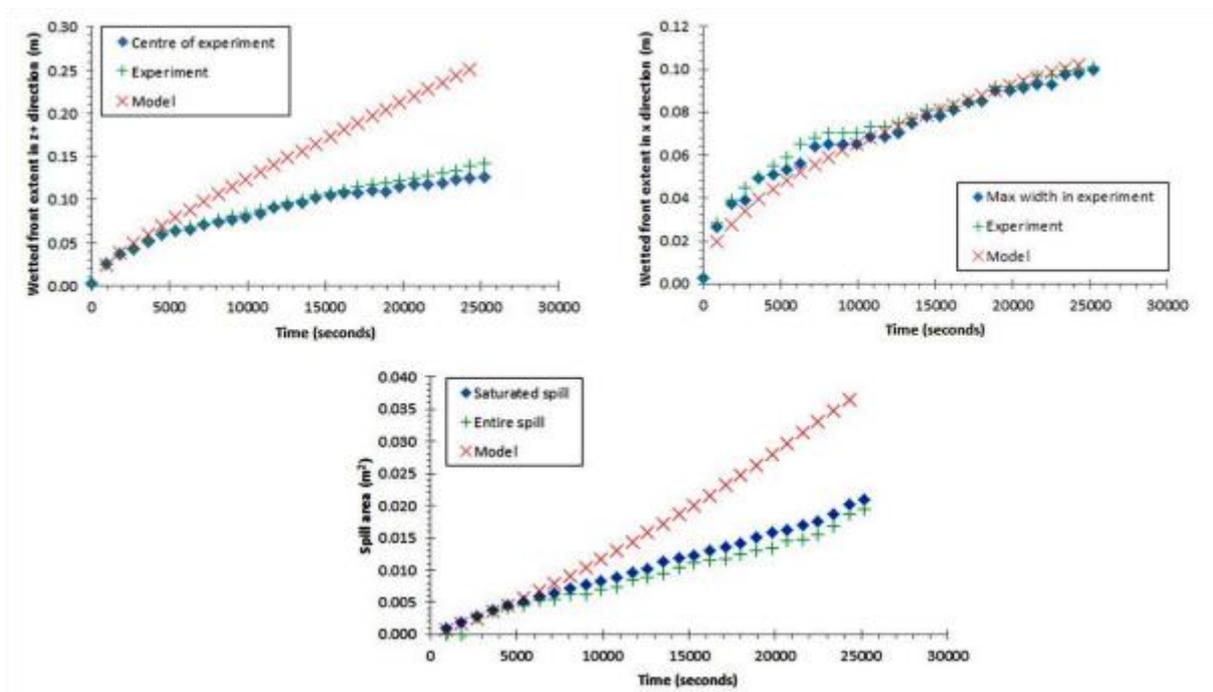


Figure 28. Graphiques comparant l'expérience et les résultats du modèle de (1) l'étendue frontale mouillée dans la direction z +, (2) la propagation horizontale à partir de l'épicentre du

déversement et (3) les différences dans la zone de déversement (pour l'huile circulant dans le sable fin).

Les valeurs de l'analyse quantitative, obtenues à partir de l'expérience et du modèle, sont présentées par les graphiques de la Figure 28. La figure 29 fournit une présentation plus visuelle de ces valeurs.

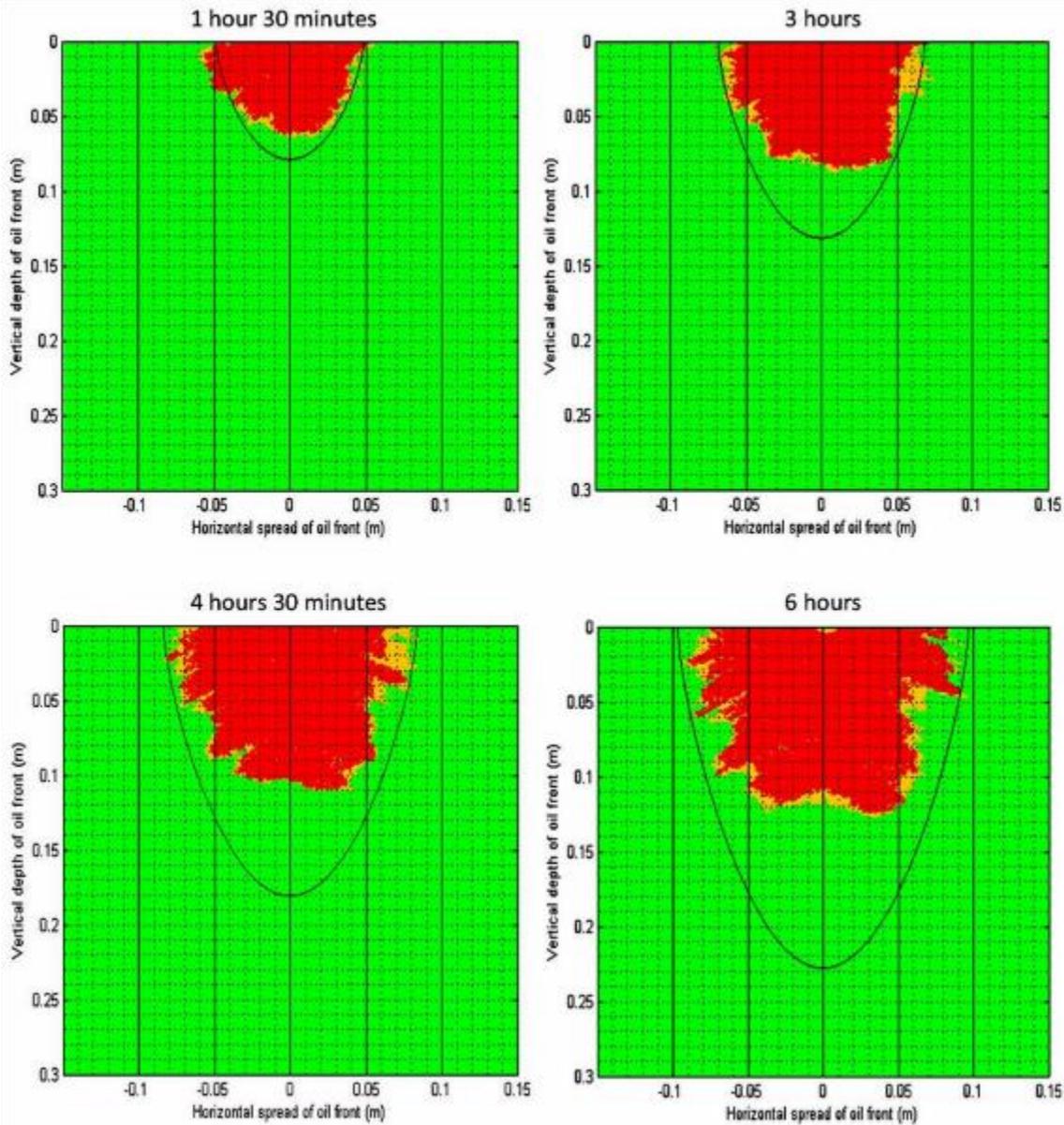


Figure 29. Images superposées de l'expérience et des courbes d'infiltration du modèle pour l'huile s'écoulant à travers du sable fin à quatre temps différents (1,5, 3, 4,5 et 6 heures).

## Chapitre IV : DISCUSSIONS

Pour l'étude des profils obtenus à partir des expériences et des modèles, on utilise l'équation fourni par Kao et Hunt (1996). Cette équation permet de calculer le temps critique pendant lequel l'infiltration verticale passe d'un phénomène entraîné par gravité et capillaire à un processus principalement entraîné par gravité (équation 22)

$$t_g = \frac{9}{16} \frac{(\sigma \mu (\Delta\theta)^2)}{\rho^2 g^2 k^{\frac{3}{2}}} \quad (22)$$

On peut s'attendre à ce que la forme de la courbe d'infiltration augmente à une vitesse comparativement moindre dans la direction horizontale que dans l'axe vertical.

Des comparaisons quantitatives et qualitatives ont finalement été faites entre les profils expérimental et mathématique. L'évaluation comprenait :

- l'exploration des images finales d'infiltration prises à partir de chaque expérience,
- l'analyse des séries temporelles des profondeurs verticales maximales (z + direction) et des largeurs horizontales (axe des abscisses) et de l'ensemble des zones de déversement des courbes d'infiltration,
- la détermination des différences moyennes entre les mesures prédites et observées en pourcentage de la valeur expérimentale,
- le calcul des temps de seuil pour le changement de force-décalage à l'aide de l'équation 22 et la recherche ultérieure des résultats à la recherche d'un changement de comportement apparenté,
- l'analyse de régression des données de la «progression de la zone de déversement avec le temps»,
- la comparaison visuelle de la forme de la courbe d'infiltration pour des périodes de temps choisies de l'expérience et de la sortie du modèle.

Les différences de pourcentage données doivent toujours être prises dans le contexte de la fourchette des valeurs utilisées dans le calcul. Les pourcentages peuvent ne pas être représentatifs pour des valeurs très faibles. Des moyennes en pourcentage ont été prises afin de minimiser ce problème.

# 1 Évaluation utilisant du sable grossier

## 1.1 Sable grossier et eau

A partir de la figure 18, on peut voir que l'infiltration horizontale maximum a été atteinte autour du milieu du domaine dans l'axe z et était relativement symétrique autour de l'épicentre de fuite. La légère asymétrie au sommet du domaine peut être provoquée par le tube de sortie de liquide placé sur le côté droit de la goulotte d'entrée, ce qui amène le liquide à gagner de l'impulsion dans une direction vers la gauche. En outre, l'orientation de l'auge d'entrée peut favoriser un léger mouvement vers le bas par rapport à l'infiltration horizontale. Le mouvement liquide vertical prédominant a créé une forme d'infiltration «canal».

Les profondeurs d'infiltration verticales divergent considérablement d'environ 2 secondes, les résultats du modèle sous-estimant fortement la propagation du liquide. Les valeurs d'étalement horizontal sont plus proches des valeurs du modèle, surestimant la propagation expérimentale en tendant à une limite légèrement supérieure. La différence moyenne entre les deux ensembles de données en pourcentage de chaque valeur expérimentale est respectivement de 61%, 66% et 33% pour les valeurs verticales, horizontales et de superficie. Cela fournit une valeur de précision qui peut être comparée de manière égale dans tous les cas d'évaluation du modèle. A partir des valeurs, on peut conclure que les imprécisions dans les prédictions verticales et horizontales sont équilibrées dans la prévision de zone qui a un haut niveau de précision.

Le temps critique calculé pour un changement dans les contrôles dominants sur l'infiltration était de 19,8 secondes pour la simulation impliquant du sable grossier et de l'eau. Malheureusement, c'est juste en dehors du temps d'expérience de sorte que le changement ne peut pas être pointu. Cependant, la propagation expérimentale horizontale semble tendre vers une limite. Cela indique que les forces capillaires sont surchargées par les forces de gravité, représentées par le taux d'infiltration verticale relativement constant.

La réalisation d'une analyse de régression sur les données peut aider à identifier la nature de leur interrelation et fournir une indication de l'extrapolation possible des données de la zone. Pour la zone de déversement dans l'expérience, l'équation polynomiale la mieux adaptée est:

$$A = 1 \cdot 10^{-5} \cdot t^2 + 1.4 \cdot 10^{-3} \cdot t + 9 \cdot 10^{-4} \quad (R^2 = 0.9999) \quad (23)$$

L'équation pour le modèle est la suivante :

$$A = 3 \cdot 10^{-5} \cdot t^2 + 7 \cdot 10^{-4} \cdot t + 1 \cdot 10^{-4} \quad (R^2 = 0.9999) \quad (24)$$

Les deux équations sont bonnes pour les données (valeurs  $R^2$  élevées), mais il est important de noter qu'une offre de données exhaustive n'a pas été utilisée pour l'analyse de régression, donc l'ajustement réel peut ne pas être aussi précis. Comme il n'y a pas de zone de déversement à  $t = 0$ , la valeur du terme constant dans le polynôme du second ordre doit être 0. L'interception du modèle A est plus proche de 0 que l'expérience. L'interception A légèrement positive dans les données de l'expérience pourrait être un décalage temporel produit par le temps de réaction humain impliqué dans l'amorçage du temporisateur d'expérience. La différence principale entre les deux équations est l'ordre de différence de la puissance de 10 dans le coefficient t qui modifie le gradient de la courbe. Ce gradient représente le taux d'infiltration, donc le modèle prédit un taux d'infiltration plus rapide que celui qui s'est effectivement produit.

En se basant sur les équations de régression, on peut s'attendre à ce que les prédictions de la zone de déversement divergent à un rythme toujours croissant à partir des valeurs de la zone réelle.

Bien que le modèle produise une courbe d'infiltration allongée (Figure 20), la proportion d'infiltration horizontale par rapport à l'infiltration verticale a été fortement sous-estimée. La sous-estimation peut être due à la taille relativement grande et à l'absence de variété de taille des grains de sol, ce qui peut favoriser la création de canaux de macropores. Des études ont montré que les effets macropores ne sont pas bien modélisés par l'équation de Richards (Lamy, et al., 2009). Cependant, ce phénomène devrait être prévu dans les deux axes.

La propagation horizontale maximale progresse jusqu'à l'épicentre du déversement. À 3 secondes, la largeur du déversement est uniforme. À 5 et 7 secondes, la largeur maximale est proche du fond. Et à 9 secondes, il est situé à peu près  $\frac{3}{4}$  du chemin vers le bas de la longueur. Ceci indique une plus grande influence initiale de la pesanteur sur le fluide que la force d'aspiration capillaire.

## 1.2 Sable grossier et huile

Les échelles de temps sont très différentes de la simulation précédente, ce qui fait que dans la Figure 22, la divergence entre les valeurs expérimentales et les valeurs du modèle paraît

beaucoup plus prononcée que dans la version eau. Dans toutes les valeurs de l'étendue verticale, horizontale et de la zone de déversement, la divergence entre les ensembles de données se produit très tôt dans la simulation. L'huile dans le sable grossier s'infiltré à un taux beaucoup plus lent que l'eau, de sorte que le taux de divergence est réellement beaucoup plus élevé dans la simulation de l'eau. Les pourcentages de différence dans ce cas sont de 69%, 58% et 84% pour les valeurs verticales, horizontales et de surface. Les deux premières différences sont relativement semblables à celles du sable grossier et de l'eau.

Toutefois, comme les prédictions du modèle sont inférieures aux valeurs expérimentales dans les deux cas, ces disparités sont amplifiées dans les différences de zone.

Le temps critique pour cette expérience était de 818 secondes. Le changement devrait être caractérisé par une diminution du taux d'étalement horizontal sans changement de l'infiltration verticale. Les résultats de l'expérience pour l'étalement horizontal semblent tendre vers une limite dans le graphique. Dans le graphique 3 de la Figure 22 montrant la zone de déversement par rapport au temps, il apparaît un changement d'une relation linéaire vers une relation curviligne dans les résultats de l'expérience après le temps critique. Inversement, ce changement n'est pas évident dans les résultats du modèle. Pour vérifier une différence dans les tendances d'infiltration, une analyse de régression a été entreprise sur les valeurs avant et après le temps critique. Le meilleur polynôme qui correspond aux valeurs expérimentales avant et après le temps critique s'écrit

$$\begin{aligned}
 A &= 9 \cdot 10^{-10} \cdot t^2 + 8 \cdot 10^{-5} \cdot t - 2 \cdot 10^{-5} & (R^2 = 0.9998) \\
 A &= 7 \cdot 10^{-8} \cdot t^2 - 1 \cdot 10^{-4} \cdot t - 5.81 \cdot 10^{-2} & (R^2 = 0.9948) \quad (25)
 \end{aligned}$$

La différence de plus de 100 dans le coefficient quadratique et le changement de signe pour le coefficient t entre les deux équations (23) montrent le contraste dans les tendances avant et après le temps de seuil. Les différences peuvent être exacerbées par la disponibilité de seulement 5 points pour l'analyse «après». Il faut également noter que les équations post-seuil, qui ont été produites avec des ensembles de données très limités, peuvent être un ajustement trompeusement précis.

Les mêmes équations pour les données du modèle sont les suivantes:

$$\begin{aligned} A &= 2 \cdot 10^{-9} \cdot t^2 + 6 \cdot 10^{-6} \cdot t + 3 \cdot 10^{-4} & (R^2 = 0.9993) \\ A &= 2 \cdot 10^{-9} \cdot t^2 + 6 \cdot 10^{-6} \cdot t + 5 \cdot 10^{-4} & (R^2 = 0.9999) \end{aligned} \quad (26)$$

La similitude des deux (24) équations confirme l'absence de changement dans les valeurs du modèle. En comparant les deuxièmes régressions de chaque ensemble d'équations (23 et 24) avec les équations d'expérience précédentes (22 et 23), on s'attend à ce que le sable grossier et le déversement d'hydrocarbures correspondent beaucoup plus étroitement aux valeurs du modèle que celles du sable grossier et de l'eau sur des plus grandes échelles de temps.

La courbe d'infiltration est de nouveau allongée, mais le mouvement dans les deux directions horizontale et verticale a été sous-estimé dans les quatre cas. Comme précédemment, un mouvement plus rapide pourrait être le résultat de la création de canaux de macropores. L'emplacement à mi-longueur de la plus grande étendue horizontale, à l'exception de la dernière image expérimentale de la figure 23, illustre clairement les différences de forme de déversement dépendant de l'équilibre des forces agissant sur le liquide. La dernière image contient de l'huile qui devrait être sous l'influence d'une force gravitationnelle plus forte que la force capillaire. Il a donc des largeurs plus uniformes que les déversements antérieurs en forme de larme.

## 2 Évaluation utilisant du sable fin

Comme expliqué en III.1.7 Méthodologie expérimentale, la formation de lames dans le domaine a influencé les résultats. En raison de la forme souvent asymétrique des courbes d'infiltration expérimentale dans le sable fin et de l'existence de chaînes de ramification, il est parfois plus approprié la comparaison de la similitude entre les deux ensembles de données que celle de l'étendue-distances.

Par ailleurs, le liquide contenu dans ce sable n'apparaisse pas comme une «zone mouillée» distincte. Il y a une zone de saturation à 100% et une zone de transition limitrophe. Pour cette raison, les données sur la zone ont été subdivisées en zones de déversement entières et en zones censées être complètement saturées. Ces subdivisions ont été identifiées au moyen de techniques informatisées de détermination des fréquences.

## 2.1 Sable fin et eau

Bien que des efforts aient été faits pour maintenir la symétrie, il existe une disparité visible entre les infiltrations horizontales de chaque côté de la ligne centrale (rouge) de la Figure 24. On peut également y voir que l'eau a atteint la limite horizontale du domaine avant qu'elle ait atteint l'étendue verticale. Cette image montre une forme mouillée beaucoup plus large que les infiltrations de sable grossier, mais il y a encore un certain allongement dans la forme.

A la vue des graphiques de la Figure 25, les résultats du modèle constituent une très bonne prédiction des dimensions réelles du déversement, en particulier les valeurs d'étalement horizontales qui sont à moins de 0,04 m des mesures de laboratoire. Les valeurs de surface de déversement mesurées légèrement inférieures sont dues à la forme incomplète de la forme d'infiltration causée par l'espacement différentiel des pores entourant les couches de sable. Les pourcentages de ce cas sont très prometteurs, avec des valeurs verticales moyennes de 18% et 19% respectivement pour la profondeur centrale et maximale, et aussi faibles que 9% et 13% pour la moitié de la largeur maximale de l'expérience et la mesure de la plus grande infiltration depuis l'épicentre. En raison de la nature de la forme du déversement, ces différences sont grandement amplifiées dans la zone de comparaison, de 55% pour la région saturée et de 44% pour l'ensemble du déversement.

Le temps critique pour le sable fin et l'eau, à laquelle la dynamique de la courbe d'infiltration devrait changer, a été calculé à  $1,97 \cdot 10^3$  secondes. Ce qui ne peut être atteint malheureusement avec le temps expérimental, de sorte que le changement ne peut ni être vérifié ni étudié. Là encore, il apparaît un nivellement progressif des valeurs d'étalement horizontal lorsqu'elles atteignent les limites extérieures du domaine. Les valeurs de la zone de déversement semblent suivre des tendances similaires, mais l'analyse de régression permettra une analyse plus détaillée des profils de la zone de déversement.

Les équations de régression pour les ensembles de données peuvent fournir un aperçu de leurs similitudes et de leurs différences. Pour l'ensemble de la zone de déversement de l'expérience, l'équation polynomiale la mieux adaptée est:

$$A = 1 \cdot 10^{-7} \cdot t^2 + 1 \cdot 10^{-4} \cdot t - 1.8 \cdot 10^{-3} \quad (R^2 = 0.9999) \quad (27)$$

L'équation pour le modèle s'écrit:

$$A = 1 \cdot 10^{-7} \cdot t^2 + 2 \cdot 10^{-4} \cdot t - 2.1 \cdot 10^{-3} \quad (R^2 = 1) \quad (28)$$

Les deux équations correspondent très bien aux données, et les deux équations sont très proches. On peut donc s'attendre à ce que les prévisions à plus grande échelle soient très précises.

Cette simulation de modèle fournit un ajustement très précis aux résultats de l'expérience. La propagation expérimentale est très légèrement plus en forme de larme que les courbes de modèle en forme de U indiquent. L'étalement horizontal se produit à une vitesse comparable à l'infiltration verticale due à la forte force capillaire exercée par le sable fin.

## **2.2 Sable fin et huile**

Le graphique de la Figure 27 a une forme approximativement en U, à l'exception d'un grand retrait à la base de l'infiltration. Des ramifications ont également eu lieu en raison des couches distinctes dans le sable.

Le modèle surestime nettement le mouvement dans la direction  $z +$ , en raison de la formation d'un retrait insaturé à la base du front humidifié (Figure 28). Il convient de noter que les infiltrations expérimentales verticales correspondent extrêmement bien au modèle jusqu'à 5000 secondes, lorsque le débit diminue brusquement, déviant les prédictions du modèle. Dans ce cas, les similitudes claires entre les valeurs simulées et réelles d'étendue horizontale sont particulièrement importantes en raison de l'axe de direction  $x$  plus faible par rapport aux expériences précédentes. Ainsi, les différences apparaîtront plus prononcées qu'auparavant. Notant la petite échelle pour la comparaison de la zone de déversement, la légère divergence peut être attribuée une fois de plus à la configuration de déversement incomplète causée par la stratification du sable et aussi par la cavité basale. Les écarts de pourcentages sont de 56% et 50% pour les profondeurs maximales centrales et globales, et de 6% et 8% pour l'écart à la largeur maximale et dans l'ensemble.

Ceux-ci sont combinés pour produire 72% pour la région saturée et 49% pour l'ensemble du déversement. Pour les deux expériences de sable fin, l'ensemble du déversement a fourni un ajustement plus précis aux simulations de modèles. Cette constatation est en contradiction avec l'hypothèse selon laquelle le déversement modélisé a une saturation de 100%. Une explication

possible peut être la forte densité de particules dans les expériences de sable fin, créant des environnements à haute pression. Dans ces conditions, la nature fermée de l'expérience peut entraver le mouvement du fluide.

Le temps critique calculé pour le sable fin et l'huile est de  $2,04 \cdot 10^4$  secondes. Dans le graphique de la zone de déversement (Figure 28), les résultats expérimentaux montrent un léger changement d'une courbe concave à une courbe convexe à cette période. Dans ce cas, les taux d'infiltration verticale et horizontale diminuent avec le temps. Là encore, le meilleur ajustement aux valeurs a été trouvé en utilisant des équations polynomiales. Pour les données expérimentales avant et après le temps de changement attendu, les équations sont les suivantes

$$\begin{aligned}
 A &= -4 \cdot 10^{-12} \cdot t^2 + 8 \cdot 10^{-7} \cdot t - 5 \cdot 10^{-4} & (R^2 = 0.9983) \\
 A &= 7 \cdot 10^{-11} \cdot t^2 - 2 \cdot 10^{-6} \cdot t - 3.09 \cdot 10^{-2} & (R^2 = 1)
 \end{aligned} \tag{29}$$

La différence entre les équations (29) est particulièrement significative. Les différents signes dans le coefficient quadratique changent l'orientation de la parabole de celle qui s'ouvre vers le bas à celle qui s'ouvre vers le haut. Cela montre une discordance complète dans les tendances de zone avant et après le temps de seuil. Le changement est associé à un changement de comportement dans le graphique de la zone de déversement (figure 28). Pour la simulation du modèle, les équations les plus appropriées pour l'ajustement des données se présentent

$$\begin{aligned}
 A &= 2 \cdot 10^{-11} \cdot t^2 + 1 \cdot 10^{-6} \cdot t - 3 \cdot 10^{-4} & (R^2 = 0.9999) \\
 A &= 2 \cdot 10^{-6} \cdot t - 9.5 \cdot 10^{-3} & (R^2 = 1)
 \end{aligned} \tag{30}$$

Cette fois, le taux d'infiltration des valeurs issues du modèle changent aussi de part et d'autre du temps critique. Cependant, dans les deux cas, très peu de valeurs ont été utilisées pour l'analyse post-seuil. Par conséquent, une analyse visuelle des tendances basées sur les graphiques de la figure 28 peut être plus appropriée que la méthode de régression. Dans ce cas, les prédictions du modèle ne semblent pas modifier leur tendance à la hausse pendant que l'expérience le fait.

Sur la base de la figure 29, les régions supérieures du déversement sont relativement précises, alors que les régions inférieures sont moins bien représentées. Initialement, la courbe expérimentale s'adapte très bien aux résultats du modèle (à 1 heure 30 minutes). Ensuite, les motifs de déversement divergent et à 6 heures, une formation concave à l'étendue verticale du front de mouillage expérimental peut être observée. On pense que cela s'est formé en raison de l'emplacement d'une région de sable plus compacté au centre du domaine qui semble avoir un mouvement vertical restreint, réduisant considérablement l'ajustement du modèle.

## CONCLUSION

Les solutions de Green-Ampt modifiées, présentées par Kao et Hunt (2001), donnent une bonne indication générale des temps et des dimensions impliqués dans les écoulements souterrains. Dans l'ordre de précision ascendante entre les déversements expérimentaux et modélisés, les simulations peuvent être énumérées: sable grossier avec de l'huile, sable grossier avec de l'eau, sable fin avec de l'huile et sable fin avec de l'eau.

Dans la plupart des cas, l'étendue de l'infiltration était plus grande dans l'expérience que dans le modèle; peut-être en raison d'un mouvement préférentiel le long de l'écran Plexiglas. Pour le sable grossier, cette disparité peut être également due à un manque de variété granulométrique, engendrant la création de grands espaces inter-pores, qui conduisent à la formation des canaux de macropores.

Par ailleurs, les évaluations sur le sable fin correspondaient mieux aux prédictions mathématiques par rapport à celles sur le sable grossier. Ce qui confirme la découverte initiale que l'équation de Green-Ampt simule plus précisément l'infiltration de petits pores. Les zones de déversement y étaient légèrement plus grandes dans le modèle que dans l'expérience, causée entre autres, par la présence de lames distinctes générant des régions de conductivité capillaire différentielle. Le matériau compact et étroit dans la boîte fermée, a aussi créé un environnement à haute pression, qui limite le mouvement du liquide. Cet effet est particulièrement significatif avec l'huile infiltrant ayant une viscosité dynamique très élevée.

Contrairement aux autres observations de sable grossier, l'infiltration horizontale de l'huile dans le sable grossier a été surestimée dans le modèle; il doit donc y avoir un facteur de différenciation entre les deux liquides. Dans les deux sols, il a été constaté que l'eau suivait les modèles d'infiltration attendus plus étroitement que le pétrole. Les propriétés de l'huile ont été calculées à 19 ° C, les propriétés de l'eau à 20 ° C ont été extraites de la littérature et les évaluations ont été effectuées à 21 ° C. Cela peut avoir causé une partie de la sous-estimation de l'étalement du pétrole par le modèle.

En comparant les deux équations, la mesure qualitative de l'infiltration horizontale était la plus précise sauf dans le cas du sable grossier avec de l'eau. Sur la base de l'analyse de sensibilité, on peut donc conclure qu'il peut y avoir une certaine erreur dans le calcul de la conductivité hydraulique qui est le principal paramètre de l'équation d'infiltration verticale. La détermination de la conductivité hydraulique du sable grossier était particulièrement difficile

en raison du mouvement rapide du liquide à travers ce type de sol. On peut supposer que la valeur de la forme géométrique calculée ( $B$ ) a un haut niveau de précision car elle est le principal paramètre de l'équation horizontale plus précise.

Les infiltrations expérimentales développées se présentaient plus en forme de larme qu'en forme de U, en particulier dans le sable grossier. S'agit-il probablement d'un double changement dans l'équilibre des forces agissant sur l'expérience. Le taux d'infiltration initialement plus élevé peut favoriser les forces de gravité par rapport à l'action capillaire. Comme le taux tend vers sa capacité de saturation, les forces capillaires jouent un rôle plus important. Puis, après le temps critique, la gravité domine de nouveau. La quantification de l'équilibre complexe des forces impliquées dans l'infiltration est donc une autre considération intéressante pour les travaux futurs. Ces forces devraient également jouer un rôle plus évident dans la définition de la forme des courbes d'infiltration modélisées.

En somme, le modèle créé permet de visualiser et de quantifier facilement les formes et les dimensions d'infiltration. Il produit des corrélations étroites avec les mesures réelles idéalisées, en particulier dans le sens horizontal et plus précisément dans le cas des petits pores, ce qui en fait un outil simple, adaptable et efficace pour les prédictions de déversement. En particulier, ce modèle présente un potentiel d'utilisation dans les plans d'urgence liés aux déversements d'hydrocarbures.

Néanmoins, il y a lieu d'améliorer le modèle et la technique expérimentale. Parmi les points à considérer pour améliorer la technique expérimentale, on peut citer la réduction du problème de stratification causé par l'expérience du sable fin qui a fortement influencé les courbes d'infiltration résultantes. Avec un calendrier de travail plus long, l'expérience pourrait également être répétée plusieurs fois dans chaque cas et plus de temps-étapes choisies pour l'analyse comparative. En outre, une plus grande variété de types de sol et de liquide pourrait être testée.

La précision du modèle pourrait être grandement améliorée en incluant des propriétés plus détaillées décrivant la structure du sol, et éventuellement le trajet ainsi que le déversement du pipeline. Le modèle pourrait être davantage développé pour tenir compte des différents horizons du sol en appliquant des couches du modèle pour travailler en séquence avec des propriétés différentes. Une autre généralisation du modèle serait de supprimer la simplification des conditions d'insaturation et de simuler le mouvement de l'huile dans des sols contenant de l'eau où l'huile déplacerait des concentrations différentes de l'eau existante.

## ANNEXE

### Annexe 1 : Code MATLAB mathématique complet

```
% Infiltration code
% Code Name: infil1
%-----
% clear the domain clear;
% Describe the model
disp('Welcome to Infil!');
disp('Infil is a mathematical model which can be used to simulate '); disp('the vertical
infiltration and lateral spreading of liquids in porous media. ');
disp(' ');
%-----
% ASSIGN PARAMETER VALUES
% SAND PARAMETERS
% Dimensionless geometric factor from table:
% fine sand (180-250 micrometers)
% coarse sand (50-250 micrometers)
Bfine=0.45;
Bcoarse=0.4;
% Saturated hydraulic conductivity of water
Kwaterfine=3.556752*10^(-4);
Kwatercoarse=7.619509*10^(-3);
% Saturated hydraulic conductivity of oil
Koilfine=7.667938*10^(-6);
Koilcoarse=6.534367*10^(-5);

% Ask which type of sand will be modelled
sand=input('(fine=1 coarse=2) Which sand type would you like to simulate? '); disp('
');
if sand==1
    B=Bfine;
    Kwater=Kwaterfine;
    Koil=Koilfine;
    sandfactor=25;
elseif sand==2
    B=Bcoarse;
    Kwater=Kwatercoarse;
    Koil=Koilcoarse;
    sandfactor=1;
end

% LIQUID PARAMETERS
% dynamic viscosity kg/m s
% oil=0.19914 at 19degrees
% water=0.000982 at 21.1degrees
```

```

% (engineeringtoolbox)
muoil=0.19914;
muwater=0.000982;
% density of kg/m^3
rhooil=880;
rhowater=1000;
% Surface tension N/m
sigmaoil=0.03185328;
sigmawater=0.0728;

% Ask which type of liquid will be modelled
liquid=input('(water=1 oil=2) Which liquid would you like to simulate? ');
disp(' ');
if liquid==1
    mu=muwater;
    rho=rhowater;
    sigma=sigmawater;
    K=Kwater;

liquidfactor=10;
elseif liquid==2
    mu=muoil;
    rho=rhooil;
    sigma=sigmaoil;
    K=Koil;
    liquidfactor=1000; end

% OTHER PARAMETERS
% gravitational acceleration m/s
g=9.80665;
% difference in moisture content
theta=1;
% intrinsic permeability
k=(K*mu)/(rho*g);
kk=(mu*K)/(rho*g);
hf=-(sigma*(B^2)*theta)/(2*rho*g*(kk^(1/2)));
%-----
% VERTICAL INFILTRATION
% create depth vector
% must at least reach 30 cm
z_start=0;
z_step=0.0005;
z_end=0.5;
zt=z_start:z_step:z_end;
% create time vector (must be same length as depth vector)
vecsize=1001;
t=zeros(vecsize,1);
% run the vertical equation calculation for
i=1:vecsize
t(i)=((theta*mu)/(rho*g*kk))*(zt(i)+hf*log(1-zt(i)/hf));

```

```

end

%-----
%INTERPOLATE VERTICAL INFILTRATION DATA
% interpolate to calculate depths for given times
% Ask what timescale to be used
ti_start=0;
ti_end=sandfactor*liquidfactor;
ti_step=ti_end/1000;
ti=ti_start:ti_step:ti_end;
zi=interp1(t,zt,ti,'spline');
%-----
%HORIZONTAL INFILTRATION
% create a matrix with rows for each of the time-steps
% and columns for the horizontal infiltrations at each of the depths
x=NaN(vecsize,vecsize);
for a=1:vecsize
% calculate horizontal infiltration at the top of the domain at the time
x(a,1)= B*((sigma/mu)^(1/2))*(k^(1/4))*(ti(a))^(1/2);
for
i=2:a
% calculate the remaining infiltrations up to the depth of the front
x(a,i)= B*((sigma/mu)^(1/2))*(k^(1/4))*(ti(a)-ti(i))^(1/2);
end
end
%-----
%SPECIFIED TIMESTEPS
% Ask if the user wants to produce specific timesteps
disp('To produce output for specific timesteps enter 1. ');
quest=input('Otherwise press enter to proceed to timelapse. '); if
quest==1
disp(' ')
disp('Please enter a vector of the timesteps (in seconds) you would like to simulate, ');
timestep=[input('e.g. [1 2 3] ')];
for
pst=1:length(timestep)
figure
stvalue=timestep(pst);
locat=find(ti==stvalue);
xst=[-( x(locat,:)),min(x(locat,:)),fliplr(x(locat,:))];
zst=[zi,zi(locat),fliplr(zi)];
rst=plot(xst, zst);
xlabel('Horizontal spread of oil front (m)')
ylabel('Vertical depth of oil front (m)')
set(rst,'Color', 'red')
set(gca,'YDir', 'reverse')

% set axes dimensions to match experiment
axis([-0.15 0.15 0 0.3])

```

```

grid minor;
disp('Time (seconds) = ')
disp('Maximum infiltration depth (metres) = ')
disp('Maximum lateral spread from central vertex (metres) = ')
disp('Area of spill (m^2)')
disp(stvalue)
disp(zi(locat))
disp(max(xst))
disp(ppval(fnint(csape(xst,zst)),max(xst)))
end
end

%-----
%INTERPOLATED 2D
PLOT %create a figure
figure
% plot the graphic every second into the infiltration for 1000 seconds
for
p=1:1000
% add extra values at x=0 and at both z=0 along the curve
xpn=[-(x(p,:)),min(x(p,:)),fliplr(x(p,:))]; ztd=[zi,zi(p),fliplr(zi)];
% plot the curve
r=plot(xpn, ztd);
set(r,'Color', 'red')
xlabel('Horizontal spread of oil front (m)')
ylabel('Vertical depth of oil front (m)') grid minor;
% reassign the positive y direction downwards
set(gca,'YDir', 'reverse')
% fix the axes so they don't change in each timestep %
make plot square to easy shape analysis
maxm=max([max(x(:)) max(ztd)]);
axis([-1.5*maxm 1.5*maxm 0 1.5*maxm])

% force plot in this timestep
M(p)=getframe;
end
%play the movie 3
times movie(M,3)
disp(' '); disp('Thank
you :)')

```

## Annexe 2 : Tableaux expérience quantitative et résultats du modèle

**Table 4.** Tableau des profondeurs et des largeurs du front mouillé à chaque pas de temps dans la simulation de l'eau qui s'écoule à travers le sable grossier.

Temps (s)	Profondeur Max. à la ligne médiane (expérimentale) (m)	Profondeur Max. du modèle (m)	Largeur Max. de l'épicentre de l'expérience (m)	Largeur Max. du modèle (m)	Surface de déversement expérimental (m)	Surface de déversement du modèle (m)
0.4	0.003	0.0136	0.0015	0.0114		
1	0.027	0.0155	0.019	0.0128	0.0008	6.44E-04
1.5	0.035	0.0235	0.018	0.0181	0.0012	0.001
2	0.05	0.0304	0.02	0.0222	0.0019	0.0014
2.5	0.067	0.0366	0.022	0.0256	0.0026	0.0018
3	0.085	0.0425	0.022	0.0286	0.0033	0.0022
3.5	0.097	0.0481	0.025	0.0314	0.0039	0.0027
4	0.11	0.0535	0.028	0.0339	0.0049	0.0031
4.5	0.125	0.0588	0.029	0.0362	0.0056	0.0036
5	0.139	0.064	0.03	0.0384	0.0064	0.0041
5.5	0.15	0.069	0.03	0.0405	0.0071	0.0046
6	0.165	0.074	0.03	0.0425	0.0079	0.0051
6.5	0.175	0.0788	0.032	0.0443	0.0089	0.0056
7	0.189	0.0837	0.038	0.0461	0.0096	0.0062
7.5	0.199	0.0884	0.038	0.0479	0.0106	0.0067
8	0.213	0.0931	0.038	0.0496	0.0113	0.0073
8.5	0.23	0.0978	0.038	0.0512	0.0121	0.0078
9	0.244	0.1024	0.038	0.0528	0.0127	0.0084
9.5	0.255	0.107	0.038	0.0543	0.0136	0.009
10	0.271	0.1116	0.038	0.0558	0.0142	
10.5	0.285		0.038		0.0151	

**Table 5.** Tableau des profondeurs et des largeurs du front mouillé à chaque pas de temps dans la simulation de l'huile s'écoulant à travers le sable grossier.

Temps (s)	Profondeur Max. à la ligne médiane (expérimentale) (m)	Profondeur Max. du modèle (m)	Largeur Max. de l'épicentre de l'expérience (m)	Largeur Max. du modèle (m)	Surface de déversement expérimental (m)	Surface de déversement du modèle (m)
4	0.002	0.0022	0.005	0.002		6.68E-06
60	0.035	0.0105	0.027	0.0077	0.001229	1.22E-04
120	0.055	0.0167	0.035	0.0109	0.002374	2.70E-04
180	0.07	0.0221	0.042	0.0134	0.003495	4.36E-04
240	0.083	0.0273	0.042	0.0154	0.004586	6.15E-04
300	0.101	0.0322	0.044	0.0173	0.005693	8.08E-04
360	0.114	0.037	0.046	0.0189	0.006881	1.00E-03
420	0.131	0.0417	0.05	0.0204	0.008012	1.20E-03
480	0.146	0.0463	0.052	0.0218	0.009186	1.50E-03
540	0.158	0.0508	0.053	0.0232	0.01029	1.70E-03
600	0.173	0.0553	0.054	0.0244	0.011531	1.90E-03
660	0.192	0.0597	0.057	0.0256	0.012731	2.20E-03
720	0.204	0.0641	0.058	0.0267	0.014088	2.40E-03
780	0.224	0.0685	0.059	0.0278	0.015167	2.70E-03
840	0.236	0.0728	0.059	0.0289	0.016536	3.00E-03
900	0.252	0.0771	0.059	0.0299	0.017612	3.30E-03
960	0.263	0.0814	0.061	0.0309	0.019026	3.60E-03
1020	0.279		0.061		0.020488	
1080	0.292		0.061		0.023333	

**Table 6.** Tableau des profondeurs et des largeurs de l'avant mouillé à chaque pas de temps dans la simulation de l'eau qui traverse le sable fin.

Temps (s)	Profondeur Max. à la ligne médiane (expérimentale) (m)	Profondeur Max. du modèle (m)	Largeur Max. de l'épicentre de l'expérience (m)	Largeur Max. du modèle (m)	Surface de déversement expérimental (m)	Surface de déversement du modèle (m)
1.2	0.002	0	0.001	0		
15	0.045	0.0403	0.033	0.0367	0.001463	0.0023
30	0.074	0.0592	0.052	0.0518	0.003347	0.0047
45	0.087	0.0746	0.06	0.0635	0.005345	0.0073
60	0.106	0.0882	0.0675	0.0733	0.00722	0.0099

Temps (s)	Profondeur Max. à la ligne médiane (expérimentale) (m)	Profondeur Max. du modèle (m)	Largeur Max. de l'épicentre de l'expérience (m)	Largeur Max. du modèle (m)	Surface de déversement expérimental (m)	Surface de déversement du modèle (m)
75	0.116	0.1006	0.0735	0.082	0.009045	0.0126
90	0.134	0.1123	0.0885	0.0898	0.010763	0.0153
105	0.149	0.1233	0.09	0.097	0.012831	0.0182
120	0.165	0.1339	0.09	0.1037	0.014776	0.021
135	0.167	0.1441	0.0925	0.11	0.016498	0.024
150	0.182	0.1539	0.095	0.1159	0.018124	0.0269
165	0.2	0.1635	0.103	0.1216	0.020669	0.03
180	0.21	0.1728	0.108	0.127	0.021916	0.033
195	0.225	0.1819	0.117	0.1322	0.024692	0.0361
210	0.243	0.1909	0.117	0.1372	0.02699	0.0393
225	0.26	0.1997	0.117	0.142	0.029635	0.0425
240	0.275	0.2083	0.117	0.1466	0.031771	0.0457
255	0.287		0.117		0.034457	

**Table 7.** Tableau des profondeurs et des largeurs de l'avant mouillé à chaque pas de temps dans la simulation de l'huile s'écoulant à travers du sable fin.

Temps (s)	Profondeur Max. à la ligne médiane (expérimentale) (m)	Profondeur Max. du modèle (m)	Largeur Max. de l'épicentre de l'expérience (m)	Largeur Max. du modèle (m)	Surface de déversement expérimental (m)	Surface de déversement du modèle (m)
2.1	0.003		0.003			
900	0.025	0.0245	0.0265	0.0197	0.000954	7.35E-04
1800	0.036	0.0377	0.0375	0.0278	0.001846	0.0016
2700	0.042	0.0491	0.039	0.0341	0.00271	0.0025
3600	0.051	0.0596	0.049	0.0394	0.003733	0.0035
4500	0.059	0.0695	0.051	0.044	0.004565	0.0045
5400	0.064	0.079	0.053	0.0482	0.005137	0.0056
6300	0.065	0.0882	0.056	0.0521	0.005759	0.0067
7200	0.070	0.0972	0.064	0.0557	0.006363	0.0079
8100	0.074	0.106	0.065	0.0591	0.007202	0.0091
9000	0.077	0.1147	0.065	0.0623	0.007804	0.0104
9900	0.079	0.1232	0.065	0.0653	0.008276	0.0117
10800	0.084	0.1316	0.0685	0.0682	0.008896	0.013
11700	0.091	0.14	0.0685	0.071	0.009565	0.0144
12600	0.093	0.1482	0.07	0.0737	0.010271	0.0158
13500	0.096	0.1564	0.075	0.0763	0.011245	0.0172

Temps (s)	Profondeur Max. à la ligne médiane (expérimentale) (m)	Profondeur Max. du modèle (m)	Largeur Max. de l'épicentre de l'expérience (m)	Largeur Max. du modèle (m)	Surface de déversement expérimental (m)	Surface de déversement du modèle (m)
14400	0.102	0.1645	0.078	0.0788	0.011798	0.0186
15300	0.105	0.1726	0.078	0.0812	0.012308	0.0201
16200	0.107	0.1806	0.081	0.0835	0.012976	0.0216
17100	0.107	0.1885	0.0845	0.0858	0.013588	0.0232
18000	0.111	0.1964	0.085	0.0881	0.014243	0.0247
18900	0.109	0.2043	0.09	0.0902	0.015133	0.0263
19800	0.114	0.2121	0.09	0.0924	0.015773	0.028
20700	0.118	0.2199	0.091	0.0944	0.016206	0.0296
21600	0.118	0.2277	0.093	0.0965	0.016931	0.0313
22500	0.119	0.2354	0.093	0.0985	0.017571	0.033
23400	0.123	0.2431	0.0975	0.1004	0.018688	0.0347
24300	0.125	0.2508	0.098	0.1023	0.020178	0.0347
25200	0.126		0.0995		0.020869	0.0364

## **BIBLIOGRAPHIE**

- Adoa, M.I., Thiab, A.H. & Mahdi, N.T., 2005. Différentes approches pour estimer la tête d'aspiration au front humide dans l'équation d'infiltration d'eau Verte et d'Ampt. *Journal of Engineering*, 11 (4).
- Allen, P. & Allen, J., 1990. *Analyse du bassin: Principes et applications*. S.l.:Backwell.
- ASCE, 1996. *Manuel d'hydrologie*. S.l.:American Society of Civil Engineers (ASCE).
- Athy, L. F., 1930. Densité, porosité et compactage des roches sédimentaires. *AAPG Bulletin*, Volume 14, p. 124.
- Baird, A. J., 1999. Modélisation. Dans: *Eco-Hydrologie: Les plantes et l'eau dans les environnements terrestres et aquatiques*. S.l.:Routledge Physical Environment Series, pages 284-326.
- Bear, J., 1972. *Dynamique des fluides dans les milieux poreux*. New York: Dover Publications, Inc ...
- Benjamin, U. K. & Nwachukwu, J. I., 2011. Équation de compactage pour les grès hydrostatiques du delta du Niger. *Ife Journal of Science*, 13 (1), pp. 161-174.
- Bruce, R. R. & Klute, A., 1952. Mesure de la diffusivité de l'humidité du sol. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, Volume 20, pages 458-462.
- Buss, S. et al., 2009. *Le Hyporheic Handbook: Un manuel sur l'interface eau souterraine-eau de surface et zone hyporheic pour les gestionnaires de l'environnement*, s.l. : Agence de l'environnement.
- Chow, V. T., Maidment, D. R. & Mays, L. W., 1988. *Hydrologie appliquée*. International ed. Singapour: McGrawHill Book Co.
- Connor, J.A., Bowers, R.L., Paquette, S.M. et Newell, C.J., 1997. *Modèle d'atténuation des sols pour la détermination des normes d'assainissement des sols basées sur le risque*. S.l.:Groundwater Services, Inc.
- Damodhara Rao, M., Raghuvanshi, N. S. & Singh, R., 2006. Développement d'un modèle de l'infiltration physique pour les sols irrigués. *Agricultural Water Management*, 85 (1-2), pages 165-174.
- Dingman, S. L., 2002. *Hydrologie physique*. 2ème éd. New Jersey: Prentice Hall.
- Domenico, P. A. & Schwartz, F. W., 1990. *Hydrogéologie physique et chimique*. 1er éd. New York: John Wiley & Sons.

## **WEBOGRAPHIE**

- E. B., 2012. Aquifer, Encyclopædia Britannica Inc .. [En ligne] Disponible à: <http://www.britannica.com/EBchecked/topic/31166/aquifer> [Consulté le 16 février 2012].
- Ecology Dictionary, 2011. Portée (de la rivière). [En ligne]. Disponible à: [http://www.ecologydictionary.org/REACH\\_\(OF\\_RIVER\)](http://www.ecologydictionary.org/REACH_(OF_RIVER)) [Accédé le 15 mars 2012].
- Eisenhauer, D.E., Heermann, D. F. & Klute, A., 1992. Effets d'étanchéité de la surface sur l'infiltration avec irrigation de surface. Transactions de l'American Society of Agricultural Engineers, 35 (6), pp. 1799-1807.
- Enciso-Medina, J., Martin, D. & Eisenhauer, D., 1998. Modèle d'infiltration pour l'irrigation par sillon. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 124 (2), pp. 73-80.
- Boîte à outils d'ingénierie, 2013. Tension superficielle de l'eau en contact avec l'air. [En ligne] Disponible à: [http://www.engineeringtoolbox.com/water-surface-tension-d\\_597.html](http://www.engineeringtoolbox.com/water-surface-tension-d_597.html) [Accès le 13 juin 2013].
- EPA, 2011. Comprendre les déversements d'hydrocarbures et la réponse aux déversements d'hydrocarbures. Agence de protection de l'environnement des États-Unis. [En ligne] Disponible à: [http://www.epa.gov/osweroe1/docs/oil/edu/oilspill\\_book/chap5.pdf](http://www.epa.gov/osweroe1/docs/oil/edu/oilspill_book/chap5.pdf) [consulté le 5 août 2013].
- EPA, 2012. Bioplume III. [En ligne] Disponible à: <http://www.epa.gov/ada/csmos/models/bioplume3.html> [consulté le 31 juillet 2013].
- Fetter, C. W., 2001. Hydrologie appliquée. 4ème éd. New Jersey: Prentice-Hall Inc.

## **RESUME**

L'infiltration dans le sol présente un trajet contaminant pour les fuites d'huile provenant des pipelines. En modélisant, le sable fin a été modélisé plus précisément que le sable grossier à cause de l'efficacité de l'équation pour les petits espaces poreux. Les zones de déversement dans le sable fin étaient plus petites que le modèle prédit en raison des pressions et des viscosités élevées présentes dans les expériences. Cependant, les tendances du changement étaient semblables, ce qui suggère des corrélations prometteuses sur de plus grandes échelles de temps. L'équation d'infiltration horizontale était généralement plus proche du déversement réel que l'équation verticale; Les prédictions pour l'huile dans le sable fin n'étaient en moyenne que 8% différentes des mesures expérimentales.