

Mobilité de l'Huile dans le Sol et Optimisation de son Extraction

Les obligations légales et les pratiques d'entreprise obligent de plus en plus les propriétaires de site à s'impliquer dans des projets de dépollution. Pour les sites contaminés par des hydrocarbures légers, l'approche classique consiste à extraire la phase pure du polluant depuis des puits d'extraction. Cela peut se traduire par des techniques d'écémage statique (i.e. : bandes oléophiles), ou par des techniques d'extraction dynamiques qui combinent de l'écémage et de l'extraction d'eau de nappe.

Pour un gestionnaire de projet de dépollution, l'objectif principal est d'anticiper la durée, les coûts et la performance du système d'extraction sélectionné, afin de mettre en place la technique qui présente le meilleur bilan coût-avantage et qui permettra d'atteindre une limite de traitement acceptable. En Europe, les prestataires en charge de la mise en place de projet de dépollution, basent le dimensionnement de leur traitement sur l'épaisseur d'huile dans les puits de surveillance. Cette approche ignore la théorie développée dans les modèles multi-phasiques de Parker (1989) et de Farr *et al* (1990), et peut conduire à la mise en place de réseaux de traitement qui ne sont pas optimisés. En effet, de par les forces capillaires, un puit situé dans du sable fin et dans lequel on peut mesurer 1 m d'huile, sera largement moins productif qu'un puit situé dans de la grave avec la même épaisseur d'huile. Le volume d'huile et sa mobilité seront largement plus élevés dans la grave que dans des matériaux fins. Aux Etats-Unis d'Amérique, l'approche est différente. En 2009, un groupe composé d'universitaires (R.Charbeneau, D.Huntley et D.Hampton), de trois membres d'organisations gouvernementales et des industriels (dont A.Kirkman et D.Lundy) a été créé. Son objectif était de revoir un guide normatif existant, sur la dépollution des sites industriels impactés par des épaisseurs importantes d'hydrocarbures légers. Leur travail a donné naissance à la norme ASTM E2856-13 sur l'estimation de la transmissivité de l'huile. L'approche outre-Atlantique est donc basée sur la mobilité de l'huile, et non sur son épaisseur dans les puits de surveillance.

Le fait que la mobilité de l'huile soit un paramètre peu utilisé en Europe peut s'impliquer par les éléments suivant :

- La validité de la technique de terrain qui permet d'estimer la mobilité de l'huile (bail-down test) n'a jamais été clairement établie et fait toujours l'objet de discussion (Hampton, 2003 ; Batu, 2013 ; Charbeneau *et al.*, 2013).
- Une alternative à cette approche consiste à prélever une carotte de sol, et à mesurer la mobilité de l'huile en laboratoire. Cependant, cette mesure est compliquée à mettre en œuvre (Sale, 2001), et il existe des difficultés pour collecter un échantillon non remanié du terrain d'étude.

- Enfin, la compréhension de l'utilité de l'estimation de la mobilité reste probablement limitée.

Conscient que la prédiction de l'efficacité et de la durée d'un projet d'extraction d'huile est difficile à déterminer, il est néanmoins important de travailler sur ce sujet car il concerne un grand nombre d'acteurs (i.e. : propriétaires de site, organisations gouvernementales). Ainsi, l'objectif global de cette étude est d'améliorer l'utilisation des données d'étude de sol pour mieux anticiper l'efficacité du dimensionnement et pour donner une estimation raisonnable de la durée de l'extraction. Afin de prédire l'efficacité à long terme, il est nécessaire de répondre aux éléments suivants.

- Estimer la mobilité de l'huile afin d'anticiper le taux d'extraction quotidien. Cela implique d'évaluer la validité des bail-down tests et de définir quelle méthode d'interprétation est la plus adaptée.
- Déterminer la relation entre les résultats des bail-down tests et la nature de la formation autour du puit. Sur quelle partie doit se concentrer la dépollution ? Est-ce que les zones où la mobilité de l'huile est la plus grande sont distribuées de manière aléatoire ?
- Définir s'il y a une relation entre la mobilité et l'épaisseur d'huile dans les puits de surveillance. Est-ce que le choix de la technique d'extraction doit se faire sur l'épaisseur d'huile dans les puits de surveillance ?
- Estimer la durée du projet d'extraction. Sur quelle période la mobilité de l'huile doit-elle être mesurée pour permettre une bonne estimation de la durée du projet d'extraction ?

Il apparaît que la mobilité de l'huile est un paramètre clef pour répondre à ces questions. Mais, la validité du bail-down test qui est la seule méthode d'évaluation de la mobilité de l'huile sur un terrain d'étude est discutable. En effet, les méthodes classiques d'interprétation des bail-down test (Bouwer & Rice modifiée par Lundy & Zimmerman, 1996 ; Bouwer & Rice modifiée par Huntley, 2000, Jacob & Lohman modifiée par Huntley, 2000 ; Cooper modifiée par Beckett & Lyverse, 2002) ont été développées à partir de solutions d'interprétation d'essais de pompages en milieu monophasique. Ces solutions se basent sur des conditions de gisement et des hypothèses différentes (nappe confinée, nappe libre, débit permanent, débit transitoire). Aucun bail-down test ne respecte l'ensemble des conditions et hypothèses sur lesquelles s'appuient les méthodes d'interprétation. Par ailleurs, Lundy & Zimmerman (1996) et Huntley (2000) ont introduit dans leurs solutions modifiées de Bouwer & Rice des hypothèses simplificatrices différentes pour pouvoir calculer le rabattement de l'huile. Il est donc nécessaire de faire une validation de ces méthodes en conduisant dans un premier temps une étude sur un pilote en laboratoire, puis à l'échelle d'un terrain d'étude. Par ailleurs, sur le terrain, certains auteurs (Kembloski et Chiang, 1990, Marinelli et Dunford, 1996) ont mentionné

l'impact des variations de hauteur de nappe sur l'épaisseur de l'huile dans les puits de surveillance. Pour gérer un projet de dépollution, il est donc important de comprendre ce phénomène et son impact sur les résultats des bail-down tests.

Un pilote de laboratoire (*papier soumis en Mai 2016 au journal 'Fluid Transport in Porous Media'*) a été utilisé afin d'évaluer l'erreur introduite sur l'estimation de la perméabilité à l'huile avec deux approches classiques d'interprétation de bail-down test (cf. Figure 1).

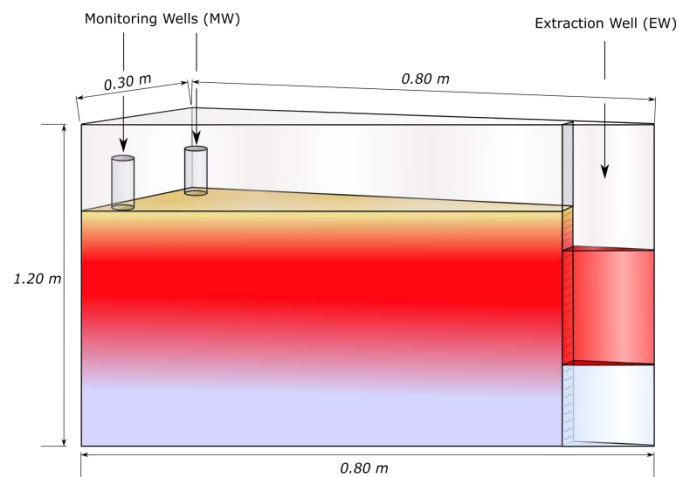


Figure 1 : Modèle conceptuel – Pilote de laboratoire

La transmissivité de l'huile a été estimée pour différentes épaisseurs d'huile (0.33, 0.57 et 0.84 cm) à l'aide des méthodes d'interprétation de Bouwer & Rice modifiée par Huntley (2000) et de Cooper modifiée par Beckett & Lyverse (2002). Les résultats obtenus ont ensuite été comparés aux transmissivités de l'huile calculées à l'aide du modèle théorique de Parker *et al.* (1987).

Les résultats montrent que les deux méthodes d'interprétation donnent des résultats très proches. La différence pour une même épaisseur d'huile varie entre 14 et 22% pendant la phase d'imbibition et atteint 36% pendant le drainage. Cet ordre de différence est consistant avec la littérature (Charbeneau, 2012). La Figure 2 résume les résultats en considérant la phase d'imbibition.

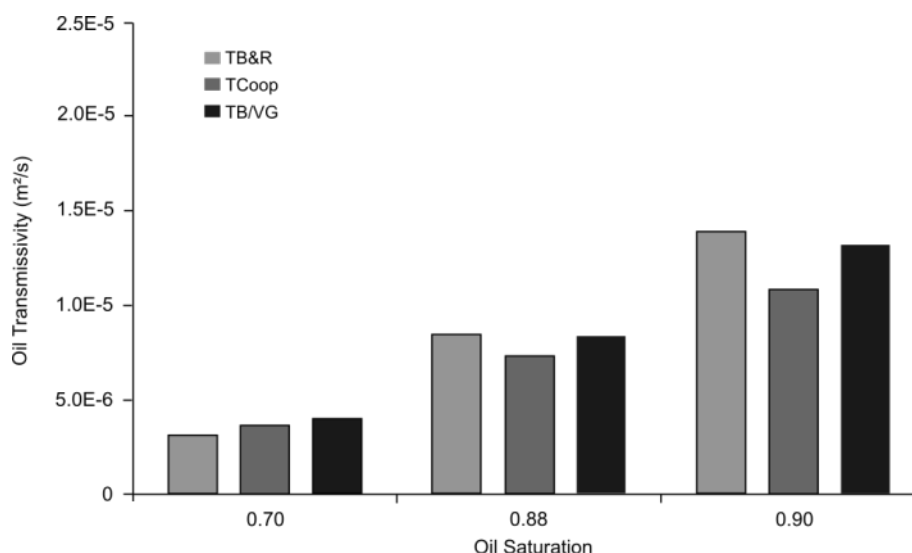


Figure2 : Transmissivité en fonction de la saturation de l'huile estimée en utilisant les méthodes d'interprétation de Bouwer & Rice modifiée par Huntley (2000), de Cooper modifiée par Beckett & Lyverse (2002) et le modèle de Parker *et al* (1987)

Par ailleurs, les transmissivités de l'huile mesurées à l'aide du bail-down test sont très proches de celle calculées avec le modèle de Parker *et al* (1987). Ces résultats confirment la validité des résultats obtenues par les méthodes d'interprétation de de Bouwer & Rice modifiée par Huntley (2000), de Cooper modifiée par Beckett & Lyverse (2002) pour un milieu homogène, alors que les conditions du test ne respectent pas les hypothèses utilisées pour développer ces méthodes. C'est la première étude menée en laboratoire sur la simulation de bail-down tests. Les principales conclusions sont :

- La transmissivité de l'huile estimée par les essais de bail-down tests est du même ordre de grandeur que celle estimée par le modèle théorique de Parker *et al*. (1987).
- Il a été montré que l'interprétation des bail-down tests pour un système double phases donne une transmissivité correcte car les propriétés physiques de l'huile, notamment la viscosité, permettent d'être dans une situation où les conditions aux limites sont quasiment validées.
- Ces résultats suggèrent que pendant un bail-down test le mouvement de l'huile est horizontal et que l'épaisseur d'huile dans la formation est quasi-constante.
- Une épaisseur d'huile constante dans la formation est une condition rencontrée en milieu confiné. Cela explique la validité de la méthode modifiée de Cooper *et al*. (Beckett & Lyverse, 2002).

- De part ces propriétés, les solutions développées initialement pour des milieux confinés et non-confinés s'appliquent sans discernement pour interpréter des bail-down tests en milieu bi-phasique.
- La différence entre les valeurs de transmissivité de l'huile obtenues à partir des deux méthodes d'interprétation est de l'ordre de 20%, ce qui est conforme avec les résultats d'études précédentes (Charbeneau, 2012).

Globalement, les méthodes d'interprétation des bail-down tests en milieu bi-phasique donnent des résultats valides dans les conditions des essais de laboratoire (milieu perméable et homogène, huile lourde et visqueuse). Pour confirmer la validité des bail-down tests en milieu hétérogène, une étude a été menée à l'échelle d'un site d'étude.

Une étude a été menée sur les valeurs de perméabilité à l'huile obtenues en interprétant un grand nombre de bail-down tests, réalisés sur un site d'étude (*papier publié en Septembre 2016 – Groundwater Monitoring and Remediation*). Pour cette étude 300 tests ont été réalisés à différentes étapes d'un projet de dépollution : avant le début de l'extraction de l'huile, six mois et, 1 ans et demi après le démarrage de l'extraction. La Figure 3 présente la distribution de l'huile sur le site d'étude, à t_0 , avant le début du projet de dépollution.

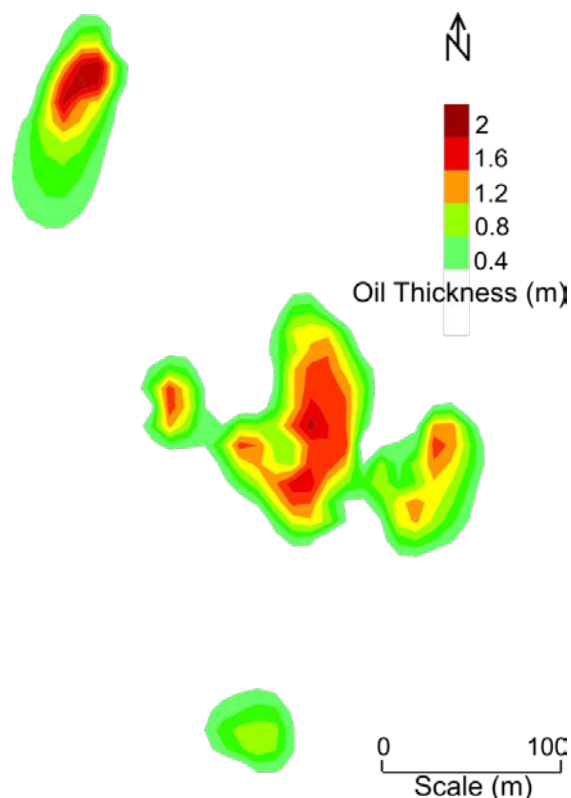


Figure 3 : Epaisseur et distribution de l'huile sur le site d'étude

Les tests ont été interprétés en utilisant les méthodes préalablement étudiées en milieu homogène (Bouwer & Rice modifié et Cooper modifié), plus une troisième méthode classiquement utilisée (Jacob & Lomhan, 1952). Cette étude montre que sur un nombre significatif d'essais, ces trois méthodes d'interprétation des bail-down tests donnent des valeurs de perméabilité à l'huile corrélées (Figure 4).

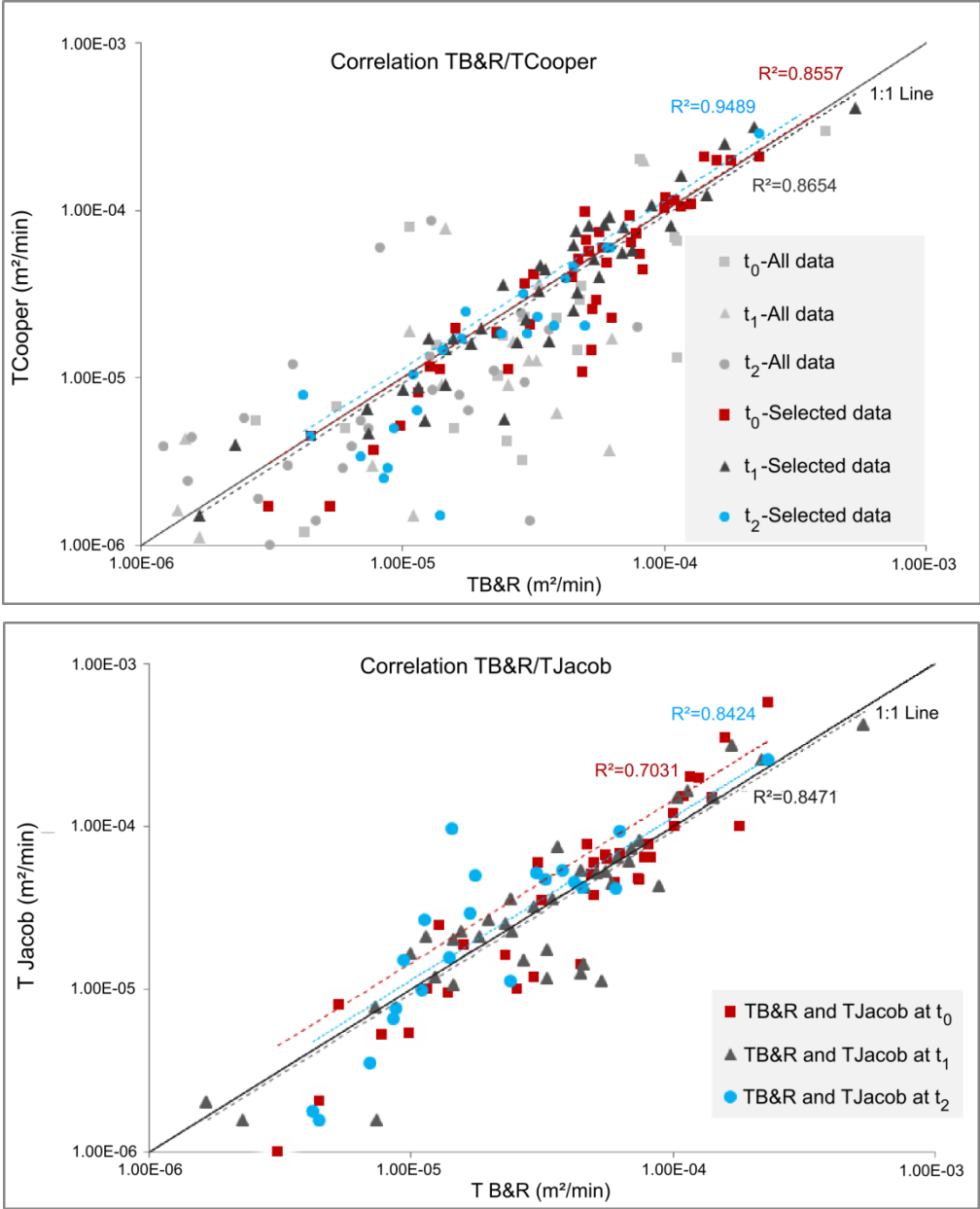


Figure 4 : Corrélation entre la transmissivité de l'huile estimée par les méthodes Bouwer & Rice (Huntley, 2000), de Cooper et al. (Beckett et Lyverse, 2002) et de Jacob et Lohman (Huntley, 2000)

C'est la première étude faite sur autant de bail-down tests réalisés sur un même site d'étude. Cette étude a montré la difficulté inhérente à la collecte des données de bail-down test. Ceci est principalement dû à la présence de bactéries liées au processus de dégradation des hydrocarbures. Il convient donc, lorsque cela est envisageable d'utiliser un mode de mesure automatique avec des sondes à pression. Ce travail valide les résultats obtenus à l'aide des bail-down test, dans des conditions de formation hétérogène. Par ailleurs, cette étude a permis de montrer l'efficacité du projet de dépollution en cours (Figure 5).

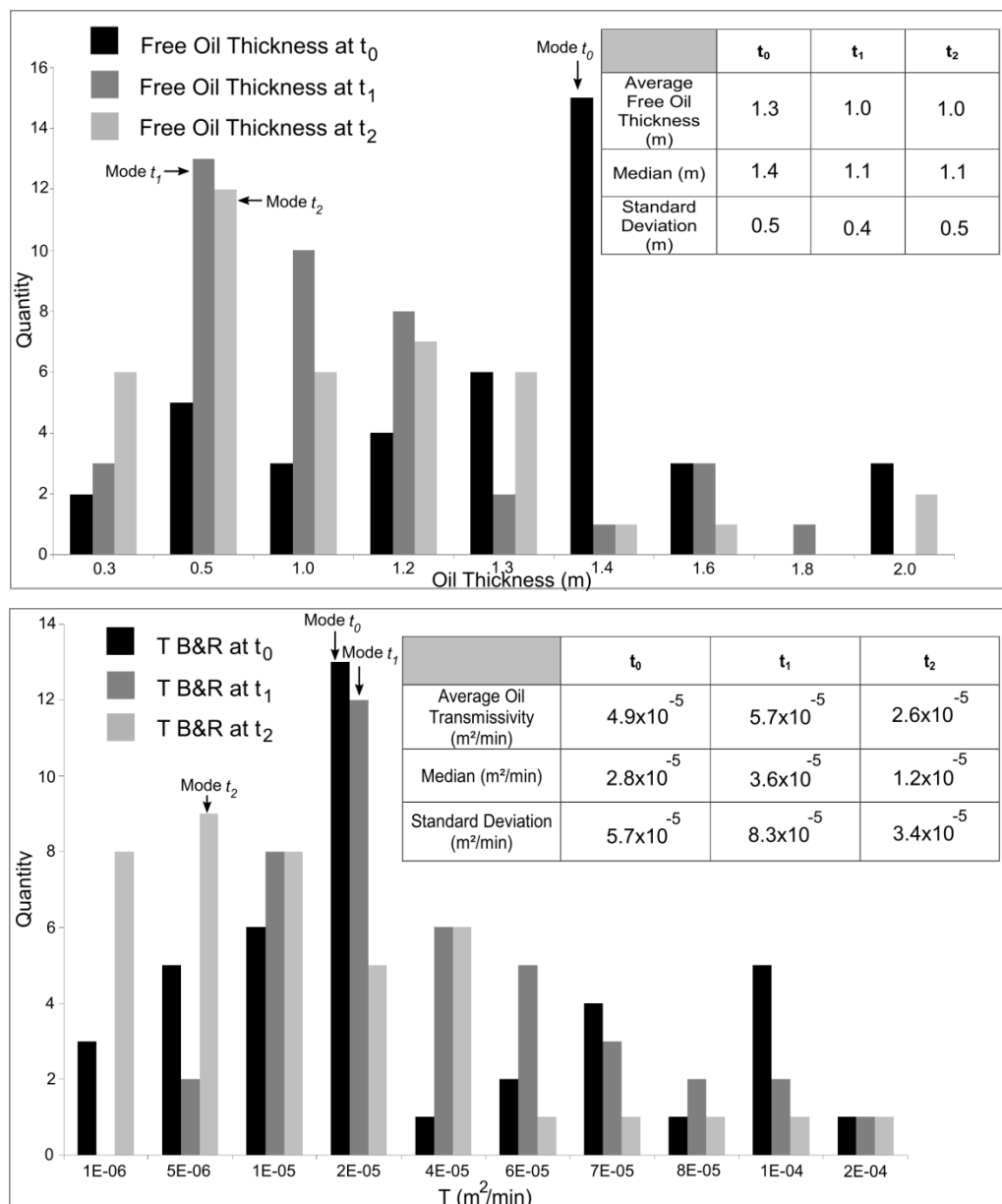


Figure 5 : Evolution des épaisseurs et des transmissivités de l'huile au cours du projet de dépollution

Enfin, ces travaux confirment la relation complexe entre l'épaisseur de l'huile et la transmissivité de l'huile qui ne permet pas de définir une corrélation en milieu hétérogène. Ainsi, comme le montre la Figure 6, les zones les plus transmissives ne sont pas les zones où l'épaisseur d'huile est la plus importante.

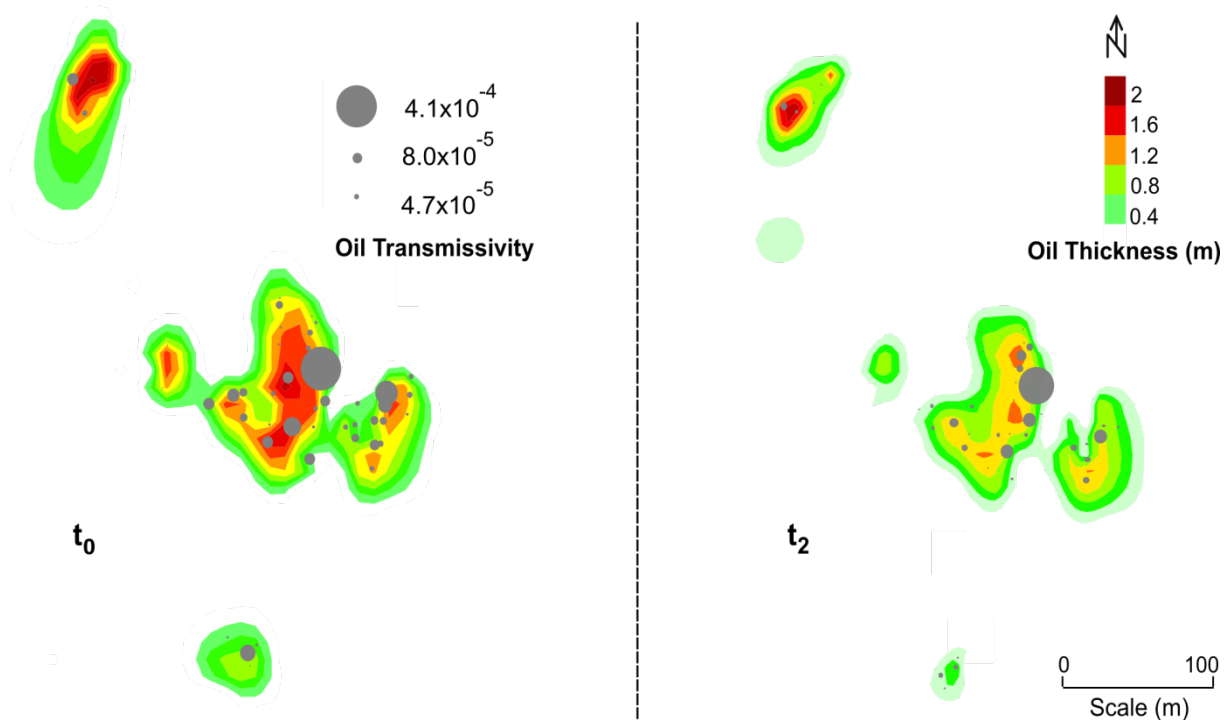


Figure 6 : Répartition, épaisseur de l'huile et transmissivité avant la mise en place du projet de dépollution (t_0) et 2 ans après (t_2)

Enfin, une étude a été menée sur le terrain pour évaluer l'impact des variations de nappe sur l'épaisseur de l'huile dans les puits de surveillance et sur la perméabilité à l'huile. Cette étude a confirmé les observations de Kembrowski *et al.* (1990) et de Marinelli *et al.* (1996) qui décrivent une diminution de l'épaisseur d'huile lorsque le niveau de la nappe monte, et vice-versa. Nos observations ont permis de différencier le comportement dans les puits qui se situent dans une zone où la nappe n'est pas confinée, et le comportement en zone confinée ou semi-confinée. Dans la première situation, le comportement correspond à celui décrit par Kembloski, alors qu'en milieu semi-confiné, lorsque le niveau de la nappe augmente, l'épaisseur d'huile augmente et vice-versa. Par ailleurs, nous avons développé un modèle sur la base des travaux d'Aral *et al.* (2002).

Le modèle proposé apporte les modifications suivantes au modèle d'Aral :

- Etant donné la forte perméabilité du site d'étude, nous faisons l'hypothèse que la nappe s'équilibre très rapidement (condition hydrostatique dans l'aquifère et entre l'aquifère et le puits dans la phase eau).
- Le modèle considère une phase d'huile homogène dans la formation, et prend en compte les variations de saturation en huile de la saturation résiduelle (S_{ors}) à la saturation maximale ($S_{o(max)}$).
- Le modèle a été modifié pour les situations en semi-confiné ou confiné.

Dans les deux situations (non-confiné et confiné), les résultats du modèle sont proches des mesures de terrain (Figure 7 et 8).

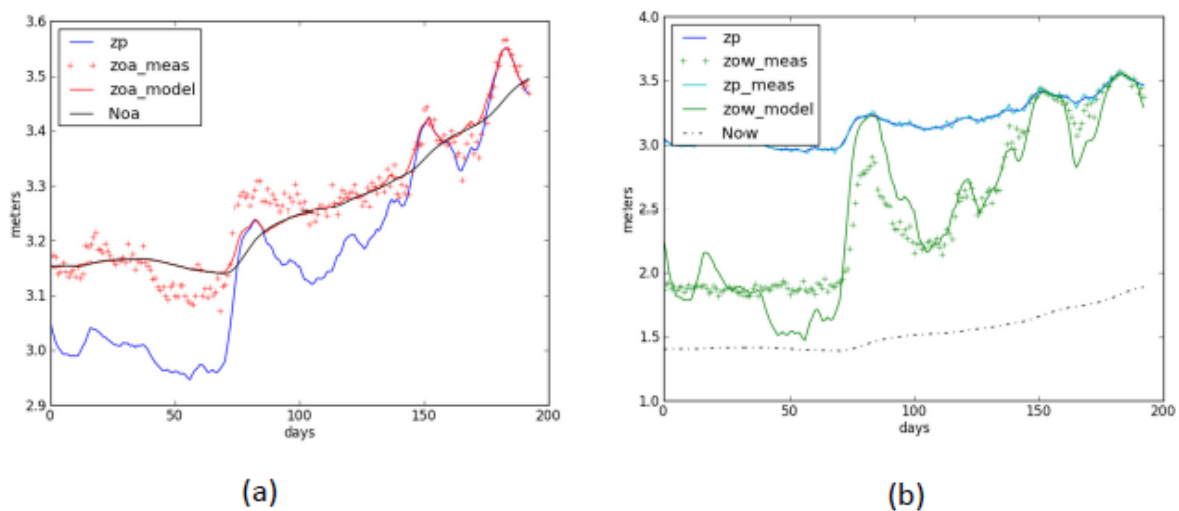


Figure 7 : Evolution des hauteurs, (a) calculées et (b) mesurées, des interfaces eau/huile et eau/air, en prenant en compte des saturations en huile variables en non-confiné

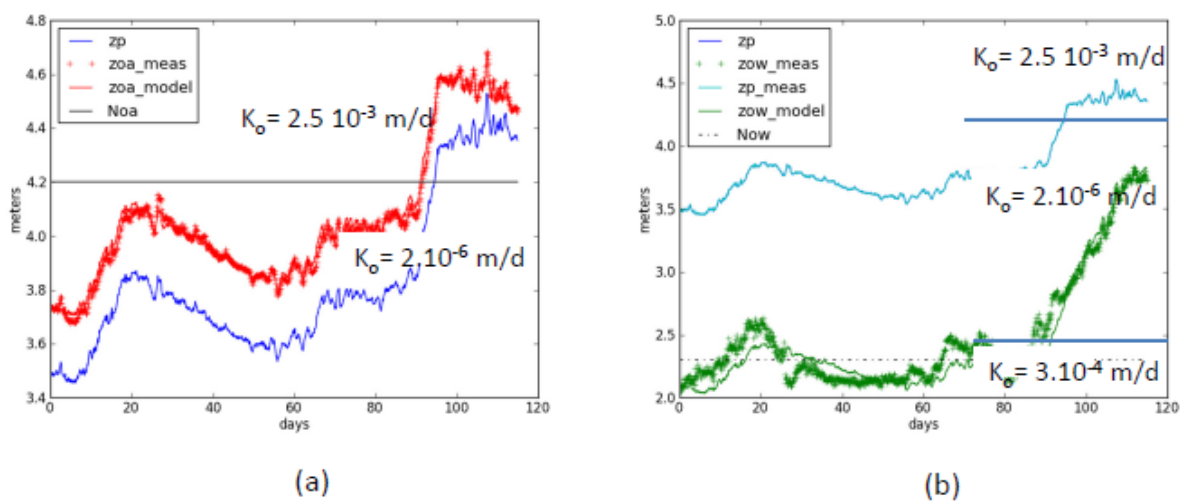


Figure 8 : Evolution des hauteurs, (a) calculées et (b) mesurées, des interfaces eau/huile et eau/air, en confiné

Enfin, le modèle proposé nous a permis d'estimer la conductivité hydraulique de l'huile dans la formation. Les résultats obtenus en non-confiné sont du même ordre de grandeur que les conductivités calculées à l'aide des bail-down tests. En confiné, l'estimation de la conductivité à l'aide du modèle donne de moins bon résultat. Des études complémentaires seront à mener pour comprendre ces écarts et pour valider le modèle avec un plus grand nombre de mesure.

En conclusion, cette étude démontre la validité des bail-down tests en milieu bi-phasique. Néanmoins, le test et son interprétation demande d'être menés avec précaution, et cette étude montre que pour obtenir de bon résultats il faut suivre les principaux aspects suivants.

- La mesure des interfaces se fera de préférence avec des sondes à pression afin d'éviter les erreurs de mesure liées à l'utilisation d'une sonde interface.
- La relation entre le rabattement de l'huile et son épaisseur dans le puits, appelée J-ratio, est une analyse important pour confirmer la validité des données de test. Plus la corrélation du J-ratio est proche de 1, plus les données sont de bonne qualité, et meilleure sera l'interprétation du test.
- La relation entre le rabattement de l'huile et son débit de réalimentation est une autre analyse important à réaliser avant d'interpréter le test. Cette analyse permet de confirmer si l'huile était à l'équilibre entre le puits et la formation au moment du test. Si ce n'est pas le cas, une correction du rabattement devra être appliquée.

L'hypothèse principale pour expliquer la validité du bail-down test en milieu bi-phasique, alors même que les hypothèses qui ont permis de développer ces solutions ne sont pas complètement respectées, réside dans la faible mobilité de l'huile dans le milieu. Cette faible mobilité est principalement due à la viscosité élevée du produit, ce qui permet :

- Une migration horizontale de l'huile vers le puits pendant le test.
- Un très faible rabattement de l'huile dans le milieu.
- Une épaisseur d'huile constante dans le milieu pendant le test.
- Une réalimentation du puits en régime quasi-permanent.

Par ailleurs, cette étude a mis en avant l'important du suivi des variations de nappe pour comprendre la dynamique de l'huile dans le milieu, et en appliquant le modèle proposé, pour définir l'épaisseur de l'huile dans le milieu, sa position et sa conductivité hydraulique.

Lors de phase d'étude, il est donc recommandé de mettre en place un maximum de puits afin de pouvoir mener une campagne de bail-down tests qui couvre la zone contaminée, et de suivre les variations d'épaisseur de l'huile dans les puits sur du long terme. Ces éléments de diagnostic vont

ensuite permettre d'optimiser le dimensionnement du projet de dépollution, qui se basera sur la mobilité de l'huile et non sur son épaisseur dans les puits d'étude.