

APPORT DE LA MODELISATION 3-D PAR ELEMENTS FINIS A L'ANALYSE D'ETANCHEITE D'UNE PAROI MOULEE

3-D FINITE ELEMENTS MODELING CONTRIBUTION TO EVALUATE THE PERMEABILITY OF A DIAPHRAGM CONCRETE WALL

Nicolas BARRET¹, Thomas CAVALERA², Benoit PARIS³

¹ *Intera SAS, Lyon, France*

² *Intera SAS, Lyon, France*

³ *Intera SAS, Lyon, France*

RÉSUMÉ – Des essais d'étanchéité menés sur les parois moulées de casier sont analysés par simulation numérique 3-D. Deux ouvrages fuyards sont identifiés dû à un défaut d'ancrage. Les résultats de simulation corroborent les hypothèses sur l'origine des fuites. Enfin le modèle permet de calculer la perméabilité in-situ des parois moulées évaluée entre 4.10^{-9} et 3.10^{-11} m/s selon le confinement hydraulique ou non de l'aquifère.

ABSTRACT – Leak testing applied to compartment diaphragm concrete walls are analyzed by tridimensional numerical simulations. Two leaking compartments are identified due to bad anchorage into the bedrock. Simulation results agree with assumptions about leak origin. Finally, the model gives in situ diaphragm concrete wall permeability ranging from 4.10^{-9} and 3.10^{-11} m/s according to unconfined or confined aquifer conditions.

1. Introduction

L'objet de ce présent travail porte sur la modélisation numérique et l'analyse du comportement hydraulique de parois moulées en béton dans le cadre d'un projet de démonstration R&D de techniques de dépollution.

Quatre casiers jointifs sont délimités par des parois moulées ancrées à 10 mètres de profondeur dans le substratum marneux de l'aquifère. Ils ont été aménagés dans une zone contaminée par des produits organochlorés (DNAPL). Ces casiers doivent permettre de tester indépendamment différentes techniques de dépollution. Il convient donc de vérifier l'absence d'interférence hydraulique entre les casiers, mais aussi entre les casiers et l'aquifère environnant pour démontrer aux autorités compétentes l'innocuité des expérimentations du projet sur l'environnement.

Pour effectuer cette démonstration, l'étanchéité des casiers a été éprouvée en réalisant des tests d'interférences hydrauliques par infiltration d'eau, et deux des quatre casiers se sont montrés fuyards.

L'exploitation des résultats d'infiltration par les méthodes classiques d'interprétation de tests hydrauliques (méthode analytique type Dupuit (1863) ou méthodes numériques 1D ou 2D radial - Beauheim et al., 2013, Roberts et al., 2002) reste limitée pour caractériser des écoulements à dimension non radiale (écoulement tridimensionnel). Afin de caractériser les propriétés hydrauliques des parois moulées et d'émettre un diagnostic sur l'origine de leur perte d'étanchéité, nous nous proposons d'interpréter les données expérimentales à partir d'un modèle numérique tridimensionnel (3-D) d'écoulements développé aux échelles pluri-métriques à pluri-centimétriques des parois moulées. Cette méthode permet d'intégrer les caractéristiques géométriques et hydrauliques détaillées

des casiers et de leur environnement (perméabilité théorique et épaisseur de paroi, aquifère multicouche, topographie de la surface et du substratum). Elle conduit à proposer différents scénarii susceptibles d'expliquer les défauts d'étanchéité observés tels qu'un défaut dans la mise en place du coulis, un défaut d'ancrage des parois dans le substratum, un effet de drainance par le substratum marneux.

Le choix du code de calcul s'est porté sur Feflow[®], un code à éléments finis développé par DHI, offrant la possibilité de générer des maillages flexibles et parfaitement ajustés aux formes géométriques de chaque ouvrage.

Dans cet article, nous présentons dans un premier temps les données expérimentales et les caractéristiques du modèle numérique et de sa conceptualisation. Les scénarii de modélisation étudiés et les résultats de simulation sont ensuite discutés avant d'apporter nos conclusions sur les avantages de cette méthode et ses applications possibles à d'autres projets.

2. Données expérimentales et modèle conceptuel

2.1. Conception des casiers

Le site d'expérimentation se situe dans une vallée alluviale dont l'aquifère est composée de bas en haut, de limons argileux, d'alluvions grossières et d'un substratum marneux sur une épaisseur de 15 mètres. La perméabilité des alluvions est estimée à $4 \cdot 10^{-4}$ m/s.

Le site d'expérimentation (3000 m²) a été au préalable sondé par une vingtaine de forage pour déterminer la nature et la profondeur des terrains.

Quatre casiers jointifs faisant chacun 9,5 x 9,5 m de large sont installés dans cet aquifère au droit d'une lentille de solvants chlorés. Les parois moulées de 40 à 45 cm d'épaisseur sont descendues jusqu'à 10 mètres de profondeur correspondant à la cote 178 m NGF. En préparation des travaux, une zone de 60 x 30 m avait été décaissée sur une hauteur de 2 m afin de garantir l'ancrage des casiers dans le substratum marneux situé en moyenne à 179 m NGF, et d'en assurer leur étanchéité basale.

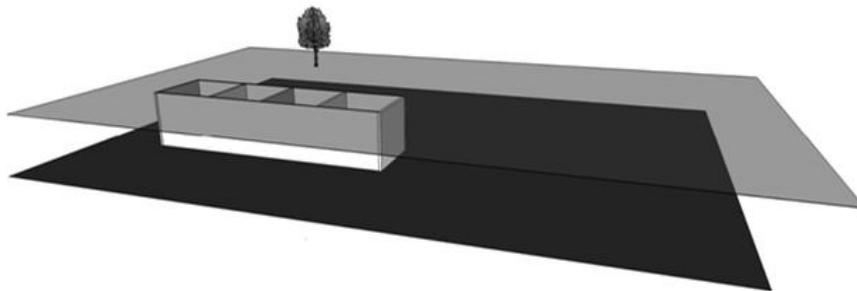


Figure 1. Schéma de principe des casiers

La réalisation de la paroi étanche utilise un procédé de type "soil mixing" qui permet le malaxage en place du sol avec un coulis de type bentonite ciment. Les mesures de perméabilité réalisées en laboratoire sur des échantillons de coulis sont en moyenne de 10^{-11} m/s.

2.2. Tests d'étanchéité

L'étanchéité des casiers est éprouvée par des essais d'infiltration consistant à remplir chaque casier d'eau et de suivre leur niveau à la descente au cours du temps. Le remplissage de chaque casier est réalisé au moyen d'une fouille, localisée au centre du casier, de 2 m² environ de superficie et de 1,50 m de profondeur. Les niveaux d'eau avant

et après injection sont respectivement de 186,40 m NGF et 187,80 m NGF (niveau de débordement). L'évolution du niveau d'eau de la fouille est suivie sur chaque casier pendant 10 heures (Figure 6). Nous considérons que le niveau d'eau dans la fouille est en équilibre avec le niveau d'eau du casier.

L'évolution des niveaux d'eau dans les casiers 1 et 2 témoigne d'une vitesse lente de vidange du niveau initial de l'ordre d'1 cm en 10 heures. En revanche la vitesse de vidange pour les casiers 3 et 4 est d'un ordre de grandeur plus grand avec respectivement 8 et 9 cm en 10 heures.

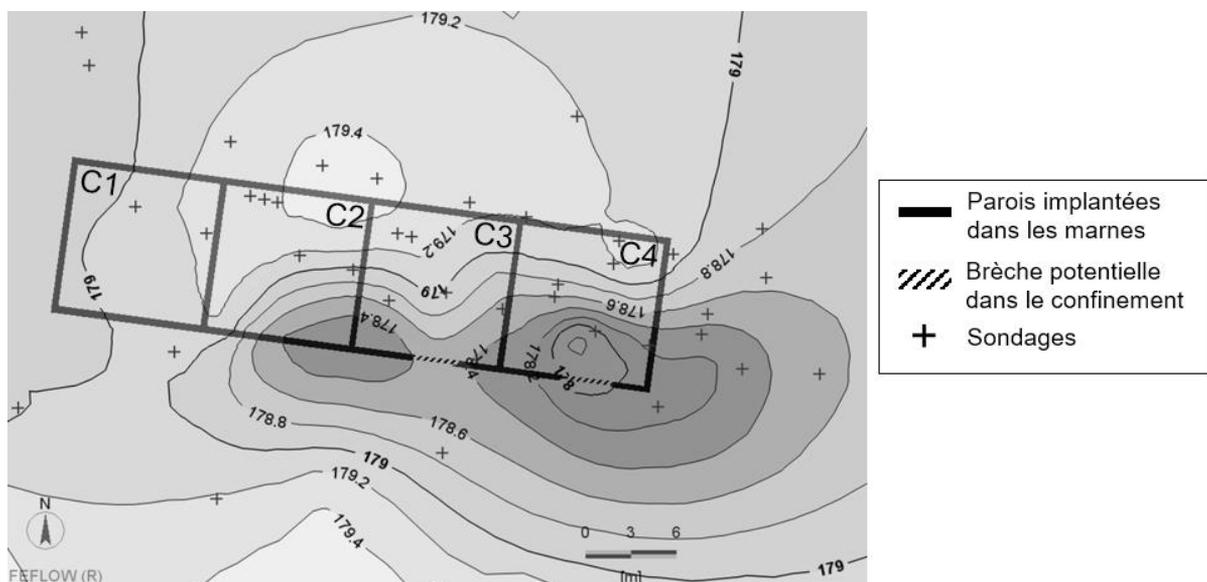
Les tests sur les casiers 1 et 2 indiquent ainsi une bonne étanchéité de leurs parois. On démontre en revanche que les casiers 3 et 4 présentent un défaut d'étanchéité identifié par une chute des niveaux plus marquée.

2.3. Modèle numérique

2.3.1. Hypothèses et objectifs

Les forages réalisés après l'installation des casiers ont permis de cartographier un toit du substratum marneux incliné vers le sud avec de cotes comprises entre 179,4 et 177,8 m NGF. La topographie du substratum a été interpolée à partir des données de sondage par la méthode du krigeage. A partir de cette cartographie (Figure 2), on constate que les parois descendant à la cote 178 m NGF sont globalement bien ancrées dans les marnes pour les casiers 1, 2 et 3. Seule une partie de la paroi sud du casier 4 n'atteint pas le substratum situé à une cote inférieure à 178 m NGF. Ainsi l'ancrage partiel au substratum du casier 4 semble être à l'origine du défaut d'étanchéité observé.

Le casier 3 présente un comportement à la vidange similaire à celui du casier 4 voisin. Si la cartographie du substratum ne permet pas de révéler un défaut d'ancrage de ce casier, nous ne pouvons pas écarter cette hypothèse compte tenu des incertitudes liées à la profondeur du substratum en dehors des données de forage. Deux cas sont alors envisagés: soit le casier 3 communique hydrauliquement avec le casier 4 fuyard, soit il présente un défaut d'ancrage de sa paroi sud à l'instar du casier 4. C'est cette deuxième hypothèse qui est adoptée par notre modèle conceptuel en considérant une brèche dans la paroi sud du casier 3 (Figure 2).



Comme les casiers 3 et 4 présentent des défauts de confinement, seules les mesures obtenues à partir des casiers 1 et 2 sont représentatives de la perméabilité in-situ du béton. Elles peuvent aussi traduire l'influence potentielle de condition de drainance à travers les marnes du substratum. Quant aux mesures obtenues sur les casiers 3 et 4, elles donnent une estimation de la perméabilité de brèches potentielles en pied de paroi.

En résumé, l'objectif de la modélisation est de définir des perméabilités des parois moulées en tenant compte i) de l'existence de brèche à la base des murs sud des casiers 3 et 4 (Figure 2), ii) et de l'influence potentielle de condition de drainance à travers les marnes pouvant expliquer les baisses de niveau dans les casiers 1 et 2, selon des conditions hydrogéologiques jugées plausibles.

2.3.2. Construction du modèle

Les modèles numériques se basent sur un modèle d'écoulement régional préexistant et développé par INTERA. Les propriétés hydrauliques de l'aquifère sont tirées des propriétés calées du modèle régional.

En revanche les conditions aux limites du modèle régional sont modifiées afin d'obtenir des charges hydrauliques initiales identiques aux conditions du test.

Le maillage est formé d'éléments tétraédriques classiquement utilisés par les codes à éléments finis. La discrétisation horizontale est particulièrement fine et contrastée avec des cellules variant de 10 cm à 30 m de côté (Figure 3). La discrétisation verticale est basée sur des tailles de couches numériques allant de 50 cm à 2 mètres d'épaisseur. Il est à noter que le substratum marneux n'est pas représenté sur les modèles 1 et 2 dont le mur de l'aquifère constitue une limite à flux nul (Figure 4a). Il est en revanche inclus dans le modèle 3 grâce à 3 couches numériques supplémentaires (Figure 4b).

Les Figures 4a et 4b présentent une coupe verticale nord-sud à travers le maillage du casier 4. La brèche dans la paroi sud du casier 4 correspond à l'interstice entre le pied de la paroi sud et le substratum. Elle se caractérise par une épaisseur de 10 cm et une longueur d'environ 3 mètres. Une brèche identique est insérée au pied de la paroi sud du casier 3 conformément à la Figure 3 présentée ci-dessous. La perméabilité de ces brèches sert de paramètre de calage car elle contrôle directement le débit de la fuite.

A titre de comparaison, la Figure 5 présente une coupe verticale nord-sud à travers le maillage du casier 2 (modèles 1 et 2). Les parois moulées de ce casier sont parfaitement ancrées dans le substratum.

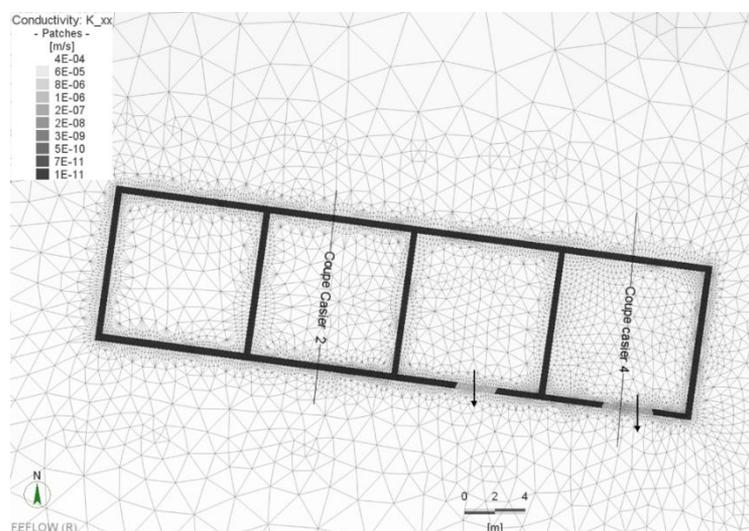


Figure 3 : Discretisation horizontale du maillage autour des casiers. Les brèches de confinement sont placées à la base des parois sud des casiers 3 et 4 (flèches noires, voir coupes Figures 4&5).

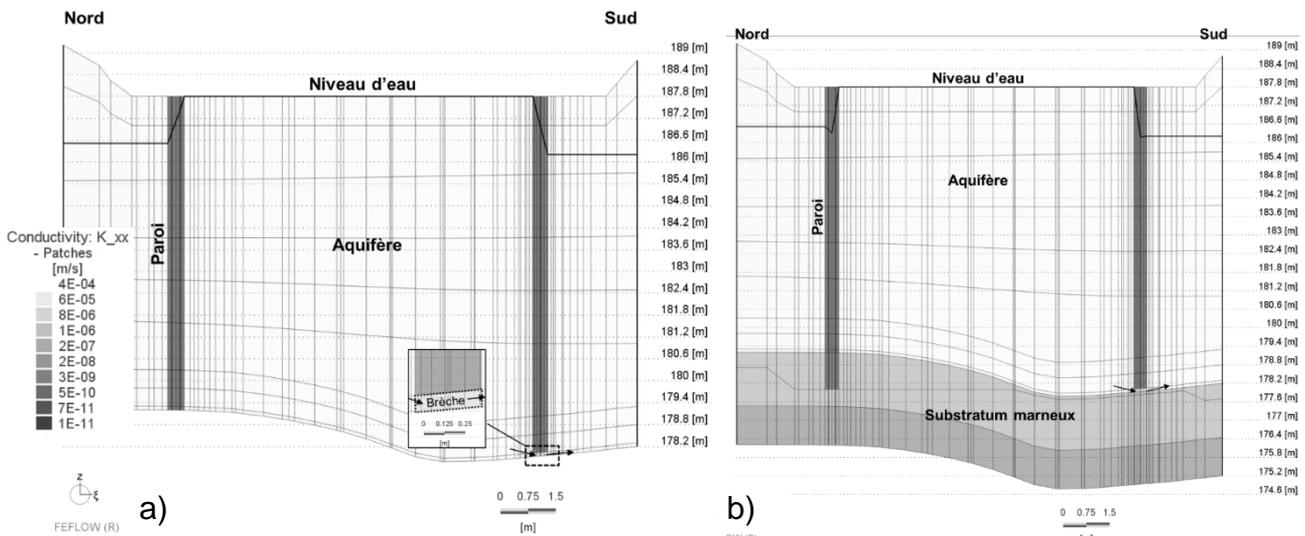


Figure 4 : a) Modèles n°1 et 2 - Coupe verticale à travers le casier 4 (C4). La brèche dans le confinement du casier correspond à la zone interstitielle entre le pied de la paroi et le substratum, elle est agrandie dans l'encart. b) Modèle n°3 - Coupe à travers le casier 4. Le substratum marneux est représenté par trois couches numériques additionnelles à la base du modèle. La brèche est indiquée par les flèches

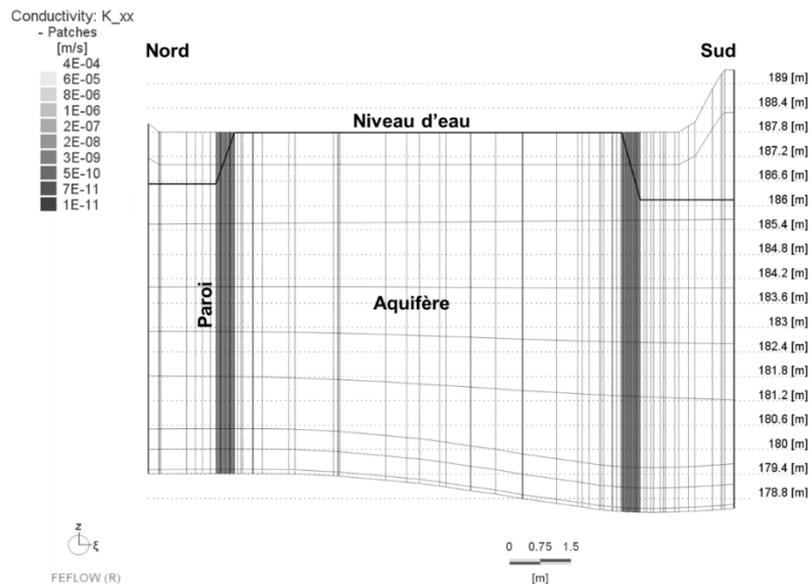


Figure 5 : Modèles n°1 et 2 - Coupe verticale à travers le casier 2 (C2). Les parois sont toutes en contact avec le substratum

2.3.3. Protocole de modélisation

Trois cas sont simulés en régime transitoire d'écoulement sur une durée de dix heures équivalente à la durée des essais d'infiltration.

L'objectif est de reproduire l'évolution des niveaux d'eau mesurés en calant :

- Modèle n°1 : La perméabilité des parois moulées de tous les casiers, et des zones fuyardes existantes pour les casiers 3 et 4. Le calage est réalisé en condition de nappe libre, en ajustant l'emmagasinement correspondant à la porosité de drainage ;

- Modèle n°2 : La perméabilité des parois moulées de tous les casiers, et des zones fuyardes existantes pour les casiers 3 et 4. Le calage est réalisé en condition de nappe confinée, en ajustant l'emmagasinement spécifique correspondant à la compressibilité du milieu poreux ;
- Modèle n°3 : La perméabilité des marnes sous-jacentes en condition de nappe libre. La perméabilité des parois moulées est fixée à la valeur de laboratoire. La perméabilité de la zone de fuite et la porosité de la nappe libre reprennent les valeurs calées du modèle n°1.

3. Résultats de simulation

Les simulations sont réalisées en régime transitoire d'écoulement sur une durée de dix heures équivalente à la durée des essais d'infiltration.

La reproduction des niveaux simulés est satisfaisante pour les trois modèles. Les Figure 6 et Figure 7 présentent l'évolution des niveaux simulés au regard des niveaux mesurés et montrent une correspondance presque parfaite avec une erreur inférieure au centimètre.

Les paramètres de calage sont présentés dans le Tableau 1. Les perméabilités des parois moulées calées en condition de nappe captive sont de deux ordres de grandeur plus faibles que celles obtenues en condition de nappe libre. La différence des résultats de calage est principalement liée à la valeur de l'emmagasinement qui met en jeu un volume d'eau 100 fois moindre pour une nappe captive que pour une nappe libre. La perméabilité des parois moulées est ainsi comprise entre 4.10^{-9} m/s pour un aquifère libre et 4.10^{-11} m/s pour un aquifère captif. La valeur en condition confinée se rapproche de la valeur de laboratoire de 10^{-11} m/s.

La perméabilité des brèches évolue quant à elle entre 2.10^{-5} (nappe libre) et $1,5.10^{-7}$ m/s (nappe captive), la valeur de nappe libre étant proche de la perméabilité des alluvions établie à 4.10^{-4} m/s.

Le troisième modèle simule l'influence de la perméabilité des marnes sur le rabattement des casiers. Pour reproduire les rabattements des casiers 1 et 2, la perméabilité horizontale des marnes est calée à une valeur de 4.10^{-7} m/s, en tenant compte d'un ratio d'anisotropie K_h/K_v de 10.

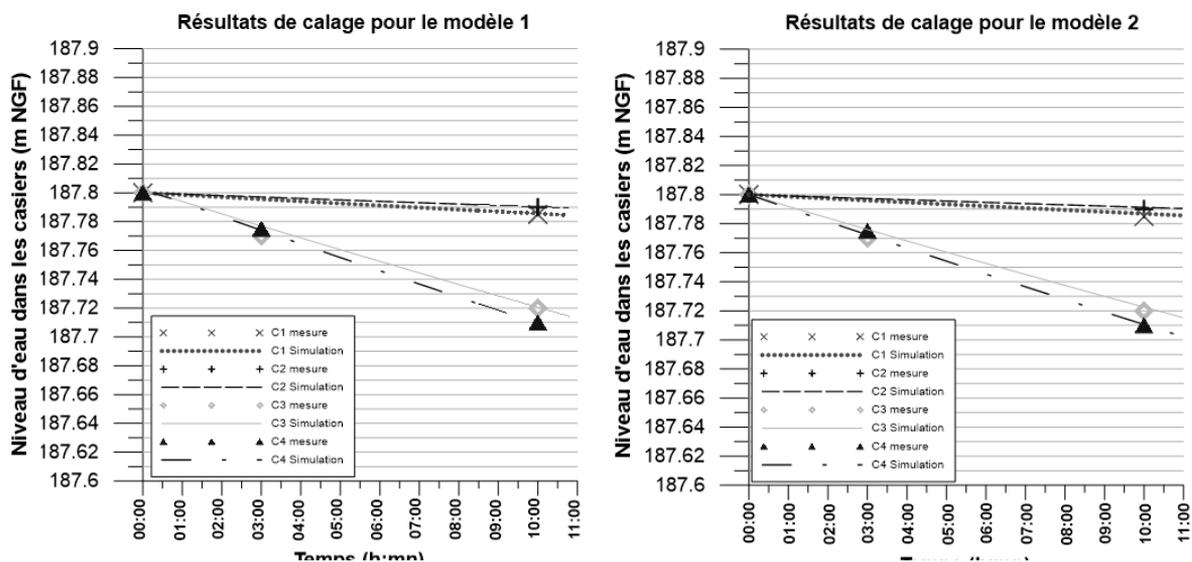


Figure 6. Comparaison entre les niveaux d'eau simulés et mesurés pour les modèles d'aquifère libre (n°1) et confiné (n°2)

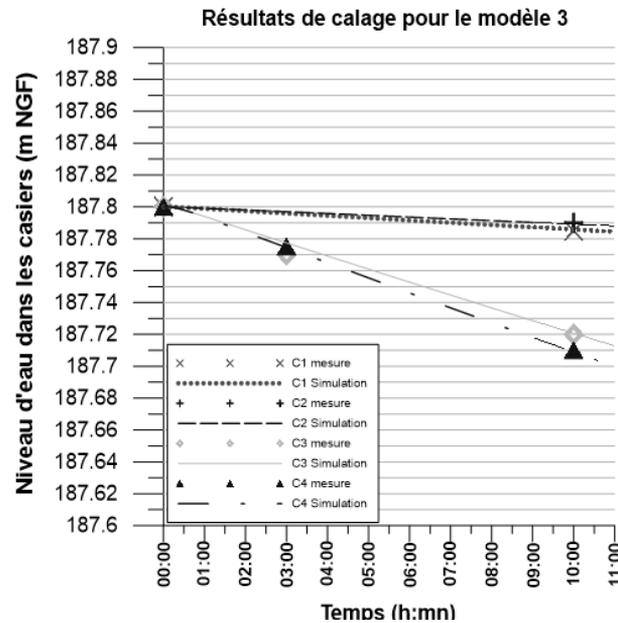


Figure 7. Comparaison entre les niveaux d'eau simulés et mesurés pour le modèle d'aquifère libre avec modélisation du substratum marneux (n°3)

Tableau 1. Perméabilités calées du béton, des brèches, et du substratum marneux et valeurs d'emmagasinement des alluvions

	Modèle n°1 Aquifère libre	Modèle n°2 Aquifère confiné	Modèle n°3 Aquifère libre	Ratio de perméabilité
Matériaux	Perméabilité [m.s ⁻¹]	Perméabilité [m.s ⁻¹]	Perméabilité [m.s ⁻¹]	Kh/Kv
Béton	3,8.10 ⁻⁹	3,5.10 ⁻¹¹	1.10 ^{-11*}	1
Brèche	2.10 ⁻⁵	1,5.10 ⁻⁷	2.10 ^{-5*}	1
Marnes	Condition de flux nul		4.10 ⁻⁷	10
Emmagasinement	10%	10 ⁻⁴ m ⁻¹	10%	-

* Valeurs fixées d'après la valeur de laboratoire pour le béton et la perméabilité des brèches calée par le modèle en condition de nappe libre. Le ratio de perméabilité correspond au rapport de la perméabilité horizontale Kh sur verticale Kv

4. Conclusions

L'étanchéité de casiers expérimentaux confinés par des parois moulées a été évaluée par des essais d'infiltration. Lors de ces essais, des vitesses de vidanges significatives ont été observées suggérant que deux de ces casiers présentaient un défaut d'étanchéité.

Les analyses des essais hydrauliques sur le terrain est réalisée à l'aide d'un modèle hydrogéologique tridimensionnel. L'interpolation de la topographie du substratum montre une légère pente orientée vers le sud qui pourrait expliquer un défaut d'ancrage des parois sud des casiers 3 et 4.

Les essais de terrain ont été reproduits à l'aide de trois modèles numériques basés sur trois hypothèses conceptuelles. Les deux premiers modèles simulent respectivement les tests d'infiltration en condition de nappe libre et de nappe captive en considérant une brèche en pied des parois correspondant à l'espace laissé entre la base de la paroi non ancrée et le substratum. La perméabilité in-situ des parois moulées est comprise entre

$4 \cdot 10^{-9}$ m/s (nappe libre) et $3,5 \cdot 10^{-11}$ m/s (nappe captive) après calage de ces deux modèles. Ces valeurs sont cohérentes avec la valeur moyenne de 10^{-11} m/s mesurée en laboratoire sur les échantillons de coulis.

Le troisième modèle simule en condition de nappe libre l'influence de la perméabilité des marnes sur la vidange des casiers en faisant l'hypothèse que les parois présentent une perméabilité équivalente à celle estimée en laboratoire, tout en conservant les défauts d'étanchéité sur les casiers fuyards. Une valeur de perméabilité des marnes à $4 \cdot 10^{-7}$ m/s permet de reproduire les vidanges des casiers. Ces valeurs sont jugées réalistes et le modèle ne permet donc pas d'écarter ce scénario. Par ailleurs ce résultat éclaire le fait qu'une connaissance précise des propriétés hydrauliques de la couche géologique d'ancrage est indispensable pour s'assurer de l'étanchéité d'un ouvrage.

En conclusion, nous montrons dans cet article que l'utilisation des calculs hydrauliques tridimensionnels vise à mieux interpréter des tests d'étanchéité réalisés sur des parois moulées. Alors que les méthodes classiques d'interprétation de test de pompage sont contraintes par un paramétrage restreint et homogène des propriétés hydrauliques, et limitées à des écoulements bidimensionnels (plan horizontal), le modèle numérique 3-D à éléments finis n'est pas limité par le nombre de paramètres (e.g. zones de perméabilités variées), prend en charge des géométries complexes et permet de reproduire des écoulements tridimensionnels plus réalistes. La modélisation permet ainsi de tester des scénarios de fuite mettant en jeu des anomalies géométriques de conception (défaut d'ancrage, problème de brèche...), et par conséquent de guider l'auscultation d'ouvrage hydraulique défectueux et/ou d'orienter les essais de caractérisations hydrauliques complémentaires.

5. Références bibliographiques

Beauheim R.L., Robert R.M., Avis J.D. (2013). Hydraulic testing of low-permeability Silurian and Ordovician strata, Michigan Basin, southwestern Ontario. *Journal of Hydrology*, Vol. 509(2014), 163-178

Roberts R.M., Beauheim R.L., Avis. J.D (2002), Quantifying Parameter Uncertainty in Well-Test Analysis, Bridging the Gap Between Measurement and Modeling in Heterogeneous Media, Proceedings of the International Groundwater Symposium, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, California, March 25-28, 2002. Madrid, Spain: IAHR. 20 p. on CD.

Dupuit J. (1863), Solution de Dupuits ou Dupuit-Forchheimer décrivant l'écoulement en milieu poreux sous l'action d'un puits de pompage