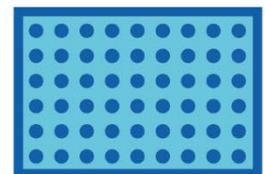


## COMMUNICATIONS ORALES

# 5<sup>e</sup> RENCONTRES NATIONALES

de la Recherche sur  
les sites et sols pollués

**04 et 05 février 2025 - Paris**



**Recueil des résumés**

ATELIER 4B : Injection de fluides  
pour la mobilisation des phases pures

En partenariat avec :

# Atelier 4B

---

## **Injection de fluides pour la mobilisation des phases pures**

[Techniques de dépollution, modalités de gestion et travaux]

- |  |           |
|--|-----------|
| <b>Remediation of DNAPL polluted soil by polymer injection</b>   | <b>3</b>  |
| Challenges, Innovations, and the Path Forward  |           |
| <b>Utilisation de fluides à seuil comme agent bloquant pour la remédiation de sols pollués</b>   | <b>6</b>  |
| <b>Enhanced remediation of Inapl-contaminated soil by emulsion</b>   | <b>10</b> |
| A novel polymer-surfactant-alcohol emulsion for in-situ remediation of diesel-contaminated soil  |           |
| <b>Les gels, réactifs innovants pour la dépollution <i>in situ</i></b>   | <b>15</b> |
| Retours d'expériences de plusieurs pilotes sur site  |           |
| <b>Suivi géophysique d'expérimentations multiphasiques relatives à la récupération de solvants chlorés en phase pure dans un milieu poreux saturé par injection de polymères</b> | <b>18</b> |

# Remediation of DNAPL polluted soil by polymer injection

## Challenges, Innovations, and the Path Forward

---

**Amir Alamooti <sup>a,b,c</sup>, Stéfan Colombano <sup>a</sup>, Dorian Davarzani <sup>a</sup>, Azita Ahmadi-Sénichault <sup>b</sup>**

a BRGM (French Geological Survey), Orléans 45000, France

b Institut de Mécanique et Ingénierie de Bordeaux (I2M), Arts et Métiers Institute of Technology, CNRS, Talence, 33405, France

c ADEME (Agence de la transition écologique), ANGERS, 49004, France

## Résumé

Polymer injection is a well-established method in enhanced oil recovery (EOR) and is gaining interest for soil remediation due to its non Newtonian behavior. However, unlike EOR applications, soil is an unconsolidated medium where gravity forces are more active, and strict environmental standards require precise design for successful field-scale implementation. These challenges underscore the need for innovative, interdisciplinary research to fully unlock the potential of polymer injection in soil remediation.

## Introduction

Dense Non-Aqueous Phase Liquids (DNAPLs), such as chlorinated solvents, are denser than water and can form immiscible lenses below the groundwater table when spilled through soil. Polymer solutions, due to their high viscosity, can provide a favorable mobility ratio, improving recovery efficiency while maintaining a stable front in heterogeneous media. They can also deliver other remediation agents like surfactants, nanomaterials, and solvents. However, in DNAPL displacement within soil, gravity plays a significant role when capillary forces are weak, often causing the aqueous (polymer) solution to override the DNAPL-saturated zone. This highlights the need for a blocking zone above the contaminated area or methods to counteract gravity forces. Additionally, residual DNAPL, especially in layered soils, can persist after primary flushing with polymers. It is essential to maintain a favorable mobility ratio to prevent channeling and to mobilize or dissolve residual DNAPL ganglia. In the context of the PAPIRUS project, we have developed innovative solutions to address these challenges, bringing practical remediation strategies for DNAPL-polluted soils into reality.

## Matériel et méthodes

To evaluate the efficiency of this technology, a range of experimental and numerical analyses were conducted. The non-Newtonian behavior of polymer solutions, along with other chemical substances such as suspended particles, surfactants, salts, and alcohols, was examined both in bulk and in porous media. Displacement studies were carried out using 1-column (377 mL) and 2D-tank (ranging from 300 mL to 4000 mL) experimental setups, with numerical simulations performed using COMSOL Multiphysics. These tests aimed to assess the behavior of the injected solutions and the recovery efficiency of DNAPL at full saturation in a source zone or at residual saturation, using various solution combinations: polymer (xanthan or CMC), surfactant-polymer (SDBS), surfactant-alcohol-polymer (1-propanol/1-hexanol), and densified polymer (barite or NaI).

## Résultats et discussion

The impact of densifying the polymer solution with suspended particles or soluble salts demonstrated that polymer densification can improve the DNAPL recovery factor in an unconfined aquifer by up to four times. Two-phase flow numerical simulations in porous media were used to assess various scenarios during the displacement of DNAPL with polymer solutions. The numerical results show that to overcome gravity forces and to have radial propagation in soil it is necessary to keep the density of polymer solution close to the DNAPL.

To minimize residual DNAPL saturation in the multilayer system, the efficiency of post-injection mixtures of polymer, alcohol, and surfactant was evaluated. Density analysis of samples obtained from displacement experiments in both single-layer columns and multilayer 2D tanks showed that the mobilization mechanism could improve the recovery factor from 91% (achieved by primary flushing) to 99% in 1D columns, and from 86% to 94% in 2D tanks.

## Conclusions et perspectives

To properly understand the processes occurring in a real polluted site, experiments must be conducted in an unconstrained aquifer to avoid unrealistically high recovery rates. In such conditions, the effects of gravity forces are more clearly observed. To address this challenge in the field, the density of the polymer solution should be increased using densifiers like soluble salts. Post-injection of alcoholic polymer solutions can help minimize the presence of residual DNAPL in the soil, potentially reducing it to nearly zero saturation. For field applications, the non-Newtonian behavior of the polymer solution in soil must be carefully considered during both the design and numerical simulations

## Références

- 1-Alamooti, A., Colombano, S., Davarzani, D., Lion, F., & Ahmadi-Sénichault, A. (2024). Gravity-driven remediation of DNAPL polluted aquifers using densified biopolymer brine solution. *Advances in Water Resources*, 185, 104643. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2024.104643>
- 2- Alamooti, Amir, Stéfan Colombano, Abbas Shoker, Azita Ahmadi-Sénichault, Fabien Lion, David Cazaux, Cédric Marion, Jérôme Lagron, Idriss Sawadogo, and Dorian Davarzani. "Enhancing remediation of residual DNAPL in multilayer aquifers: Post-injection of alcohol-surfactant-polymer mixtures." *Science of The Total Environment* 918 (2024): 170680. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.170680>
- 3- Alamooti, Amir, Stéfan Colombano, Zakari Abdullaziz Glabe, Fabien Lion, Dorian Davarzani, and Azita Ahmadi-Sénichault. "Remediation of multilayer soils contaminated by heavy chlorinated solvents using biopolymer-surfactant mixtures: two-dimensional flow experiments and simulations." *Water Research* 243 (2023): 120305. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.120305>
- 4- Alamooti, Amir, Stéfan Colombano, Sagyn Omirbekov, Azita Ahmadi, Fabien Lion, and Hossein Davarzani. "Influence of the injection of densified polymer suspension on the efficiency of DNAPL displacement in contaminated saturated soils." *Journal of Hazardous Materials* 440 (2022): 129702. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.129702>
- 5- Omirbekov, Sagyn, Stéfan Colombano, Amir Alamooti, Ali Batikh, Maxime Cochennec, Yerlan Amanbek, Azita Ahmadi-Sénichault, and Hossein Davarzani. "Experimental study of DNAPL displacement by a new densified polymer solution and upscaling problems of aqueous polymer flow in porous media." *Journal of Contaminant Hydrology* 252 (2023): 104120. <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2022.104120>

## Remerciements

This study was performed as part of the PAPIRUS project. The authors would like to thank ADEME (French Environment and Energy Management Agency) and BRGM for co-funding the project under the "GESIPOL" program. The authors also gratefully acknowledge the financial support provided to the PIVOTS project by the "Région Centre – Val de Loire" and the European Regional Development Fund. We thank INEOS INOVYN for the assistance provided during the PAPIRUS project, in particular for providing access to the Tavaux site.

# Utilisation de fluides à seuil comme agent bloquant pour la remédiation de sols pollués

**Antonio RODRIGUEZ DE CASTRO<sup>1</sup>, Amine BEN ABDELWAHED<sup>1</sup>, Zhansaya AITKHOZHA<sup>2</sup>, Henri BERTIN<sup>3\*</sup>**

<sup>1</sup>I2M, Arts et Métiers Institute of Technology, CNRS, Esplanade des Arts et Métiers, 33405 Talence Cedex, France

<sup>2</sup>Université de Lorraine, CNRS, F-54000 Nancy, France

<sup>3</sup>I2M, CNRS, Esplanade des Arts et Métiers, 33405 Talence Cedex, France

\* Contact : henri.bertin@u-bordeaux.fr

## Résumé

Ce travail présente une méthode de remédiation de sols pollués par blocage sélectif d'hétérogénéités locales. Le procédé est basé sur l'utilisation de fluides à seuil, solutions concentrées de polymères, qui de part leur rhéologie particulière, circulent préférentiellement dans les pores les plus grands. Lors de la reprise des écoulements l'eau s'écoule préférentiellement dans les pores les plus petits et permet une diversion des écoulements vers des zones peu ou pas accessibles lors des opérations de remédiation.

Des expériences de laboratoire à l'échelle de la carotte et à l'échelle du pore ont été menées pour caractériser cette méthode. Pour cela nous avons utilisé plusieurs échantillons d'un même milieu poreux consolidé synthétique bien caractérisé et des solutions aqueuses de gomme de xanthane pour bloquer les gros pores. L'influence de la concentration en polymère et des conditions d'écoulement nous ont permis de mettre en évidence les effets bénéfiques de la méthode proposée. Des expériences effectuées sur des micromodèles de milieux poreux nous permettent de visualiser les différents phénomènes mis en jeu à l'échelle du pore.

## Introduction

La décontamination des sols pollués par des hydrocarbures peu ou pas miscibles avec l'eau constitue un défi important. Parmi les différentes méthodes utilisées sur site les techniques in-situ présentent de nombreux avantages mais ne permettent pas toujours d'atteindre des niveaux de dépollution satisfaisants au vu des objectifs initiaux.

Le travail que nous présentons est focalisé sur la décontamination in-situ de sites pollués par des hydrocarbures ou des solvants chlorés. Les méthodes de remédiation basées sur l'injection de différents produits, tensioactifs, polymères etc. [1], ne permettent pas de balayer la totalité de l'espace poral où se trouvent les polluants à cause des hétérogénéités locales et de la dispersion des tailles de pores. L'injection de solutions de polymères suivie d'écoulements d'eau a permis d'améliorer sensiblement le taux de récupération des polluants. D'autres méthodes telles que l'utilisation de la mousse ont été utilisées pour améliorer le balayage des milieux poreux en bloquant certaines zones au profit d'autres zones non balayées.

Nous proposons ici une méthode nouvelle [2] basée sur le caractère discriminant de l'écoulement de fluides à seuil dû à la distribution des tailles de pores observée sur des milieux poreux homogènes. Un fluide haute viscosité est injecté dans le milieu poreux en envahissant les pores de plus grande taille. L'injection d'eau qui suit la solution de polymères permet de balayer les pores de plus petite dimension où le polymère n'est pas présent.

# Matériel et méthodes

Deux types d'expériences ont été réalisées à des échelles différentes en utilisant les mêmes fluides et en observant la même procédure expérimentale (séquences d'injection des fluides).

## Echelle de la carotte homogène.

Des échantillons cylindriques ( $D = 5\text{cm}$ ,  $L = 10\text{cm}$ ) d'Aerolith-10 ont été utilisés. Il s'agit de milieux poreux synthétiques obtenus par frittage dont les propriétés pétrophysiques (porosité, perméabilité, distribution des tailles de pores) sont bien documentées dans la littérature et représentatives des milieux rencontrés dans les sols.

Le polluant est une huile minérale de viscosité  $30\text{mPaS}$ .

Des solutions de polymère (gomme de xanthane) de différentes concentrations (2000, 4000, 8000ppm) ont été utilisées. Les propriétés rhéologiques de ces solutions sont présentées dans les Figures 1a et 1b. Ces solutions présentent les caractéristiques de fluides à seuil c'est à dire qu'ils se mettent en mouvement une fois un seuil de contrainte atteint. La contrainte exercée sur le fluide dépendant des caractéristiques hydrauliques des pores, le fluide à seuil circulera plus facilement dans les grands pores que dans les petits [3,4].

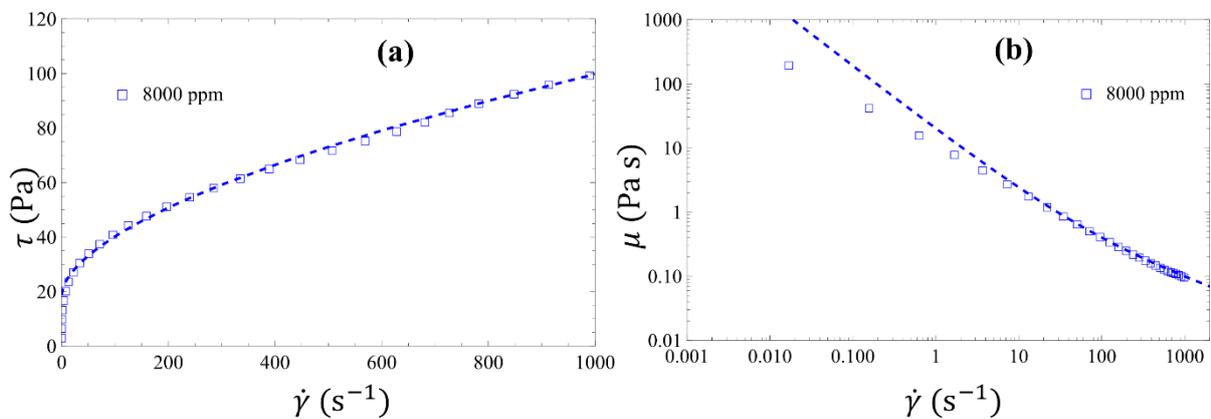


Figure 1: Propriétés rhéologiques mesurées (symboles) et calées sur le modèle de Herschel-Buckley (ligne continue) d'une solution de gomme xanthane ( $C = 8000\text{ppm}$ ).

Un montage expérimental constitué d'une pompe volumétrique, d'un capteur de pression différentielle et d'une balance de précision permet l'injection initiale du polluant suivie d'un premier déplacement d'eau pour récupérer le polluant mobile. Le polymère est ensuite injecté dans le milieu immédiatement suivi par une injection d'eau pour déplacer le polluant résiduel.

## Echelle du pore, utilisation de micromodèles.

Des micromodèles en verre borosilicaté transparent ( $20\text{mm} \times 10\text{mm} \times 0.02\text{mm}$ ) sont utilisés pour la visualisation directe des écoulements. Les figures 2a et 2b présentent le micromodèle dans son ensemble, le réseau d'injection qui assure une bonne répartition des fluides et un détail des pores. La répartition des tailles de pores présentée en Figure 2b a été obtenue par analyse d'image. La porosité est de 58%, la perméabilité de 2,5 Darcy ( $\approx 2,4 \cdot 10^{-5} \text{ms}^{-1}$ ) et le volume de pores de  $2,4 \mu\text{L}$ . Les micromodèles peuvent être mouillables à l'eau ou à l'huile.

Les fluides utilisés eau et huile sont les mêmes que précédemment, les solutions de polymère sont toujours de la gomme de xanthane de concentrations 3000, 5000 et 7000ppm. Des colorants ont été ajoutés pour distinguer chacune des phases présentes dans le micromodèle.

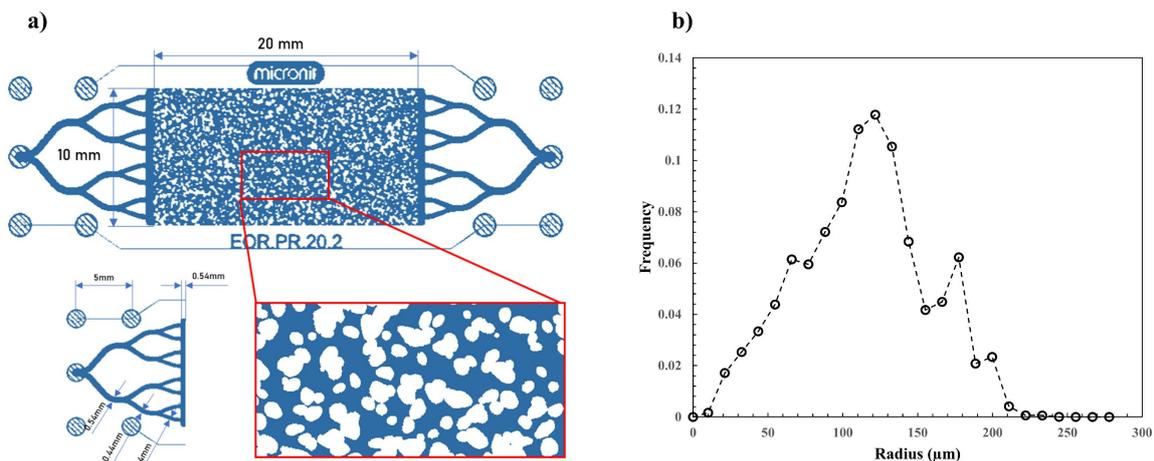


Figure 2 : Le micromodèle et ses caractéristiques.

Le montage expérimental est constitué d'une micro-pompe qui permet de contrôler le débit ou la pression d'injection. Le micromodèle transparent est positionné sous un microscope équipé d'une caméra et connecté à un ordinateur pour enregistrer et stocker les images de l'écoulement. Un traitement des images acquises permet de mesurer les volumes de fluides présents et de définir la répartition des phases en fonction de la taille des pores.

## Résultats et discussion

### Echelle de la carotte homogène.

Plusieurs séries d'expériences ont été effectuées en faisant varier les débits et les volumes d'injection dans l'objectif de comparer différentes stratégies de remédiation. Il apparaît clairement que la simple injection d'eau ne permet pas de dépolluer le milieu poreux. L'injection de polymère suivie d'injection d'eau effectuée à différentes valeurs du débit a permis de réduire sensiblement les volumes de polluant résiduel. Cette amélioration de la récupération est attribuée au caractère bloquant du fluide à seuil qui permet un meilleur balayage de l'espace poral. Des résultats plus détaillés sont présentés dans la figure 3 (tirée de [2]) qui résume les résultats obtenus à l'issue de plusieurs injections d'eau (WF) et de polymère (PI) au travers des gains de récupération du polluant.

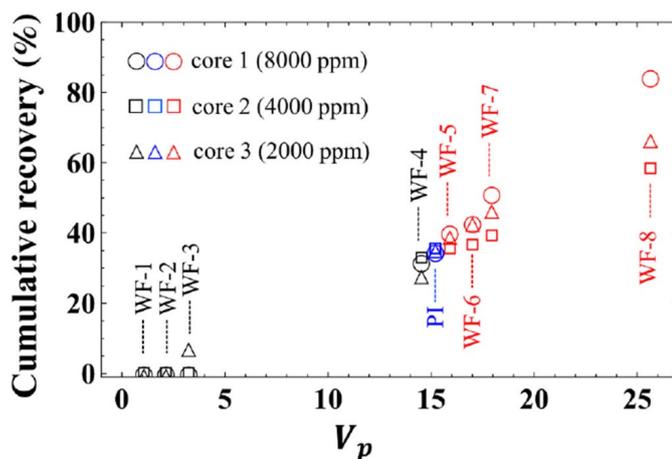


Figure 3 : Récupération de polluant à l'issue des séquences d'injection de l'eau et des solutions de polymères. WF 1-4 correspondent à des WF effectués avec un nombre capillaire croissant, avant l'injection de polymère (PI). WF 5-8 correspondent à des WF effectués avec un nombre capillaire croissant, après PI.

## Echelle du pore

Plusieurs séries d'expériences ont été effectuées en faisant varier les débits, les pressions et les volumes d'injection dans l'objectif de comparer différentes stratégies de remédiation. Il apparaît clairement que la simple injection d'eau ne permet pas de dépolluer le milieu poreux. L'injection de la solution de polymère permet dans un premier temps une amélioration de la récupération du polluant en place par effet visqueux tout en se localisant dans les pores les plus gros. La reprise de l'injection d'eau met en évidence l'écoulement dans les pores les plus petits et favorise le balayage du micromodèle. Un exemple de résultat est présenté dans la figure 4 où on distingue les différentes phases en présence et la répartition des phases à l'échelle du pore.

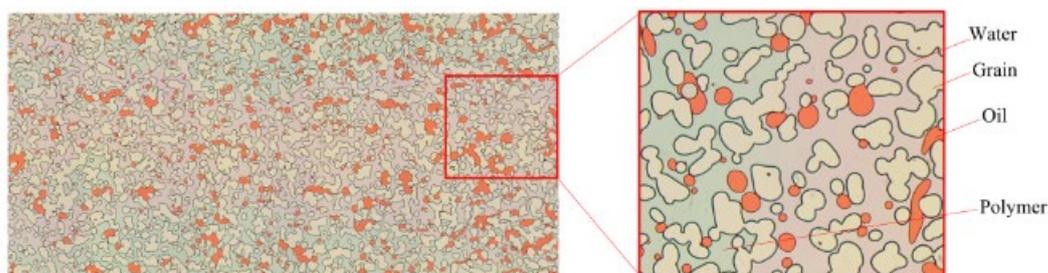


Figure 4 : Exemple d'un micromodèle saturé des différents fluides.

## Conclusions et perspectives

Des séries d'expériences ont été menées sur des carottes homogènes et des micromodèles qui mettent en évidence le caractère bloquant de fluides à seuil et favorisent le balayage de l'espace poral en réduisant la saturation résiduelle en polluant. Nous avons pu observer que la concentration en polymère joue un rôle important sur la récupération du polluant. La stratégie d'injection des fluides, débit ou pression imposée, conduit à des résultats différents.

Les perspectives de cette étude concernent l'optimisation des propriétés rhéologiques des solutions de polymère en adéquation avec les stratégies d'injection, taille des bouchons de solution, pression d'injection, etc.

## Références

- [1] ATTEIA O., DEL CAMPO ESTRADA, E. & H. BERTIN, Soil flushing: a review of the origin of efficiency variability, *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, 12 (4) pp. 379 – 389, 2013
- [2] RODRIGUEZ DE CASTRO, BEN ABDELWAHED A. & BERTIN H., Enhancing pollutant removal from contaminated soils using yield stress fluids as selective blocking agents. *J. Contaminant hydrology*. 255, 104142, February 2023.
- [3] RODRIGUEZ DE CASTRO, A., AGNAOU, M., AHMADI-SENICHAULT, A., OMARI, A., Numerical investigation of Herschel-Bulkley fluid flows in 2D porous media: yielding behaviour and tortuosity. *Computers & Chemical Engineering* 140, 106922, 2020.
- [4] TALON, L., ANDERSEN HENNING, A., HANSEN, A., ROSSO, A. Influence of the imposed flow rate boundary condition on the flow of Bingham fluid in porous media, *Phys. Rev. Fluids* 9, 063302, 2024.

# Enhanced remediation of LNAPL-contaminated soil by emulsion

## A novel polymer-surfactant-alcohol emulsion for in-situ remediation of diesel-contaminated soil

Bexultan SABYRBAY<sup>1,2,3,\*</sup>, Dorian DAVARZANI<sup>1</sup>, Christophe DICHARRY<sup>3</sup>, Sagyn OMIRBEKOV<sup>1,4</sup>, Fabien LION<sup>1</sup>, Mélanie LORTHIOY<sup>2</sup>, Mohamed KRIMISSA<sup>2</sup>, Stéfan COLOMBANO<sup>1</sup>

1 BRGM, Orléans 45100, France

2 EDF R&D, Chatou 78400, France

3 CNRS/TOTALENERGIES/UNIV PAU & PAYS ADOUR, Pau Cedex 64013, France

4 Nazarbayev University, Astana 010000, Kazakhstan

\* Corresponding author

## Abstract

Environmental pollution, particularly soil contamination by light refined petroleum products known as light non-aqueous phase liquids (LNAPL), remains a pressing global issue aggravated by anthropogenic activities. Traditional remediation techniques such as pump-and-treat (PT) have proven inefficient, prompting the investigation of alternative approaches such as injecting shear-thinning fluids like aqueous polymers for in-situ soil remediation. However, challenges persist, including incomplete removal of LNAPL ganglia and limitations associated with injecting high-viscosity fluids into the soil, which can lead soil uplift.

In this study, we developed a new formulation termed COCKTAIL emulsion, which includes xanthan gum (XG), sodium dodecyl sulfate (SDS), and 1-pentanol, a biodegradable alcohol. Batch experiments demonstrated the effective partitioning of 1-pentanol into the diesel phase, promoting LNAPL mobilization/swelling mechanism. The COCKTAIL emulsion exhibited excellent performance in one-dimensional column experiments, achieving up to 100% diesel recovery.

Further studies using a Hele-Shaw cell will delve deeper into the mechanisms of diesel ganglia swelling at a pore scale. This study highlights the effectiveness of combining polymer solution with partitioning alcohol for LNAPL remediation in heterogeneous porous media, offering a pathway toward sustainable soil contamination management strategies.

# Introduction

Environmental pollution, notably soil contamination, is one of the urgent problems at present. Light refined petroleum products (gasoline, diesel, engine oil, etc.) which represent light non-aqueous phase liquids (LNAPL) are among the most widely spread environmental pollutants (Charbeneau, 2006; Tomlinson et al., 2017). The primary source of soil and water pollution by petroleum hydrocarbons is anthropogenic activity. These are the activities of enterprises in the oil refining and petrochemical industries, wastewater from industrial enterprises, accidents and fires at oil storage facilities and refineries, and numerous oil spills as a result of malfunctions of pipelines and tankers. Every year, the volume of polluted territories with oil products constantly increases, threatening the world with an ecological catastrophe. Penetration of LNAPL into the soil or groundwater makes it unsuitable for plant, animal, and microorganism life. Therefore, searching for effective ways to dispose of hydrocarbon pollution is critical. One of the most widely known LNAPL remediation methods is pump-and-treat (PT), which is considered inefficient due to prolonged operation and low recovery efficiency of around 60% (Charbeneau et al., 2000; Colombano et al., 2020). Injecting non-Newtonian fluids such as aqueous polymers presents a significant industrial application interest for in situ remediation of contaminated soil, especially for aquifers with significantly high permeability and strong heterogeneity (Hernández-Espriú et al., 2013; Martel et al., 1998; Omirbekov et al., 2023). However, after flushing with the polymer solution, there will still remain some LNAPL ganglia trapped in pore space that cannot be mobilized anymore. In addition, there are some limitations on the use of high-viscosity fluids. For instance, injecting a high-viscosity polymer solution during soil remediation may increase the injection pressure, leading to injection difficulties or soil uplift. Consequently, developing eco-friendly, sufficiently viscous, and biodegradable fluid is highly in demand. Therefore, in this study, we show how the injection of polymer-surfactant-alcohol emulsion can improve the recovery of residual LNAPL (here diesel fuel) in porous media.

## Materials and methods

In this study, we prepared a new formulation using biopolymer Xanthan Gum (XG), eco-friendly surfactant sodium dodecyl sulfate (SDS), and water-insoluble biodegradable alcohol "1-pentanol". This mixture forms a stable emulsion in which the alcohol is dispersed in an aqueous solution. Batch experiments were conducted in small glass vials to test the mechanisms of alcohol partitioning in the presence of aqueous and diesel phases. To evaluate the performance of the emulsion, the recovery of diesel was tested in one-dimensional 30 cm long silica sand-pack columns. A conceptual illustration of the 1D column experiment setup is presented in Figure 1. The 1D column experiments consider different fluid injection methods such as direct and post-injection. The concentration of diesel fuel in the effluent was measured using refractive index analysis. Furthermore, the effectiveness of the emulsion will be assessed using a Hele-Shaw cell to evaluate the diesel displacement mechanism at the pore scale.

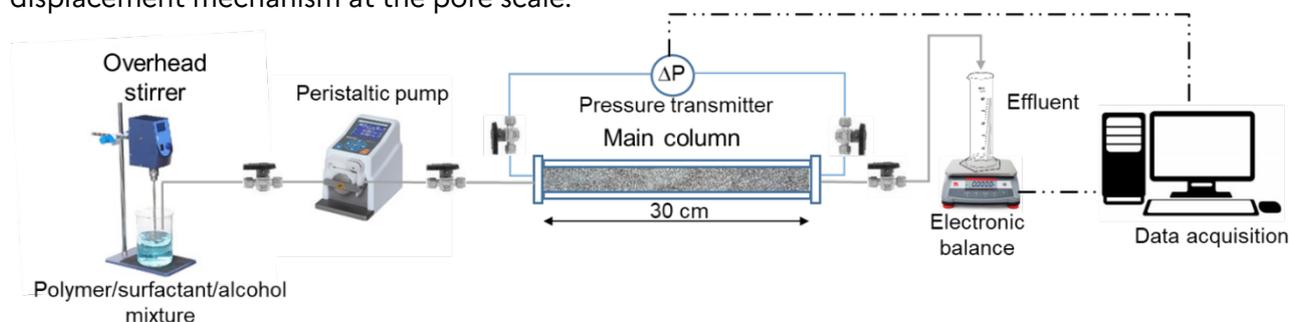


Figure 1: Schematic of the experimental setup for emulsion injection into a sand column

## Results and discussion

Batch experiment results demonstrated that water-insoluble 1-pentanol in the presence of aqueous and diesel phases promotes partitioning into the diesel phase. As a result, swelling in the volume of the diesel phase was noted, which is typical for the LNAPL mobilization mechanism. Moreover, when 1-pentanol was mixed with XG-SDS solution, it formed stable cloudy emulsions. The new XG-SDS-1-pentanol emulsion was named "COCKTAIL" due to its cloudy white color. Further, we studied the direct injection of COCKTAIL emulsion (at 50% alcohol content in the mixture) for diesel removal in the 1D column experiments. Figure 2 depicts the diesel removal efficiency results through direct injection for COCKTAIL emulsion and a combination of XG solution at different concentrations (1 and 2 g/L) with SDS (5 g/L) as a function of pore volume (PV). Increasing polymer (XG) concentration in solutions correlates with an increase in the recovery factor, with values of 83.4% and 88.3% for XG concentrations of 1 g/L and 2 g/L, respectively. Nevertheless, after flushing with the polymer solution, residual LNAPL ganglia still remain trapped in pore spaces, hindering further mobilization. Combining SDS surfactant with XG solution significantly enhances LNAPL recovery efficiency compared to injecting XG alone. The addition of SDS at a concentration of 5 g/L (2 CMC) has a more pronounced effect at a higher XG concentrations, resulting in an increase in recovery efficiency of 4.9% for 1 g/L XG and 5.6% for 2 g/L XG. The primary mechanism for enhancing LNAPL recovery by SDS surfactant in XG solutions is the mobilization of contaminants rather than their solubilization (Bernardez & De Andrade Lima, 2021). This implies a reduction in IFT between the XG+SDS solution and diesel oil, facilitating enhanced diesel mobilization. Notably, employing the newly developed COCKTAIL emulsion yields the highest LNAPL recovery results, reaching up to 100%. The primary displacement mechanism during COCKTAIL emulsion injection is the 1-pentanol partitioning into the diesel phase, causing it to swell and mobilize simultaneously (Jeong et al., 2009). Using a viscous polymer solution combined with partitioning alcohol helps overcome soil heterogeneity and facilitates the targeted delivery of alcohol droplets to residual LNAPL in low-permeability areas within porous media.

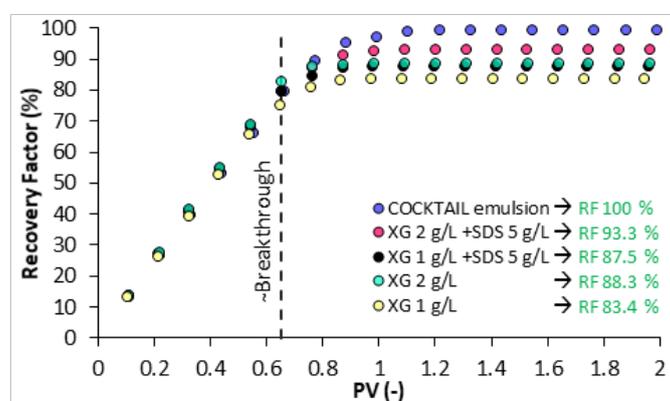


Figure 2: LNAPL production in 1D column as a function of PV through direct-treatment

The remediation of diesel-contaminated porous media using post-conventional methods involved a sequential process of water flooding (WF) followed by COCKTAIL emulsion injection (see Figure 3). The waterflooding step served as the primary phase for the initial removal of pure free product, akin to the pump-and-treat technique. To examine the influence of LNAPL residual saturation on post-treatment using our emulsion, a column experiment was conducted, producing varied residual LNAPL saturations during this stage. The results demonstrated that the recovery factor reached 64.3% and 79% under less favorable and optimal conditions, respectively. The LNAPL residual saturations obtained were 21%, 26%, 29.6%, and 35.7%. Beyond approximately 2 pore volumes of water injection, no further recoveries were observed in the effluent. The low recovery factor in this stage is attributed to the development of capillary and viscous fingering in the porous medium. Following the post-treatment via COCKTAIL emulsion injection, the recovery factors significantly improved, reaching values between 99.9% and 100%. These results underscore the exceptional performance of the newly developed emulsion in eliminating all residual LNAPL after waterflooding. Moreover, the initial LNAPL residual saturation was found to have a non-significant impact on the final recovery rate during COCKTAIL emulsion injection.

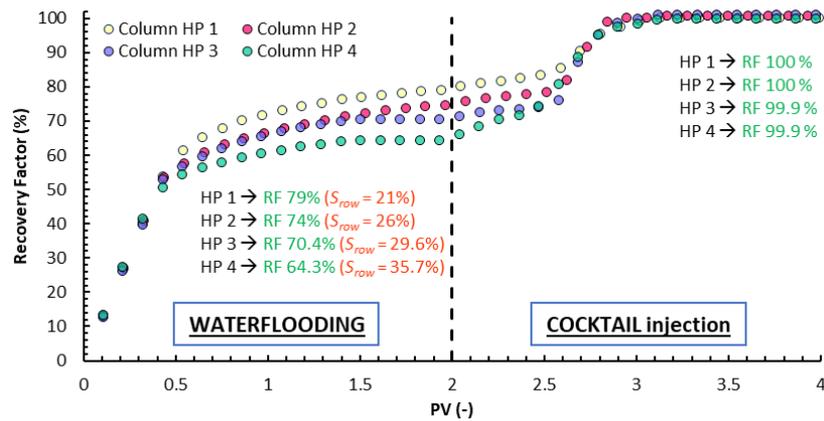


Figure 3 : LNAPL production in 1D column as a function of PV through post-treatment

## Conclusions and perspectives

Based on the results obtained the following conclusions can be drawn:

- Utilizing a combination of swelling alcohol and a polymer solution is an effective approach to enhance the recovery of residual LNAPL in heterogeneous porous media.
- The new COCKTAIL emulsion exhibited an improved recovery of 100% during direct treatment in 1D columns.
- Post-injection of COCKTAIL emulsion after waterflooding enhanced diesel removal up to 100%.
- The primary remediation mechanism through COCKTAIL emulsion in porous media is the swelling of residual diesel ganglia, leading to their subsequent mobilization.
- The combination of a polymer solution with partitioning alcohol facilitates targeted delivery of the alcohol to low-permeability areas in porous media, thereby promoting the swelling mechanism.

Future perspectives include studying the swelling mechanism of diesel ganglia at a pore scale using a Hele-Shaw cell. Furthermore, we aim to reduce the alcohol content of the COCKTAIL emulsion to minimize flushing costs.

## References

- Bernardez, L. A., & De Andrade Lima, L. R. P. (2021). Microemulsions for remediation of light non-aqueous-phase liquids in aquifer rocks. *Environmental Earth Sciences*, *80*(7), 257. <https://doi.org/10.1007/s12665-021-09548-z>
- Charbeneau, R. J. (2006). Soil and Groundwater Contamination: Nonaqueous Phase Liquids. *Vadose Zone Journal*, *5*(4), 1294–1295. <https://doi.org/10.2136/vzj2006.0101br>
- Charbeneau, R. J., Johns, R. T., Lake, L. W., & McAdams, M. J. (2000). Free-Product Recovery of Petroleum Hydrocarbon Liquids. *Groundwater Monitoring & Remediation*, *20*(3), 147–158. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6592.2000.tb00280.x>
- Colombano, S., Davarzani, H., Van Hullebusch, E. D., Ignatiadis, I., Huguenot, D., Omirbekov, S., & Guyonnet, D. (2020). Free Product Recovery of Non-aqueous Phase Liquids in Contaminated Sites: Theory and Case Studies. In E. D. Van Hullebusch, D. Huguenot, Y. Pechaud, M.-O. Simonnot, & S. Colombano (Eds.), *Environmental Soil Remediation and Rehabilitation* (pp. 61–148). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-40348-5\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-030-40348-5_2)
- Hernández-Espriú, A., Sánchez-León, E., Martínez-Santos, P., & Torres, L. G. (2013). Remediation of a diesel-contaminated soil from a pipeline accidental spill: Enhanced biodegradation and soil washing processes using natural gums and surfactants. *Journal of Soils and Sediments*, *13*(1), 152–165. <https://doi.org/10.1007/s11368-012-0599-5>
- Jeong, S.-W., Ju, B.-K., & Lee, B.-J. (2009). Effects of alcohol-partitioning type and airflow on cosolvent flooding to benzene-LNAPL saturated porous media. *Journal of Hazardous Materials*, *166*(2–3), 603–611. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.11.102>
- Martel, K. E., Martel, R., Lefebvre, R., & Gélinas, P. J. (1998). Laboratory Study of Polymer Solutions Used for Mobility Control During In Situ NAPL Recovery. *Groundwater Monitoring & Remediation*, *18*(3), 103–113. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6592.1998.tb00734.x>
- Omirbekov, S., Colombano, S., Alamooti, A., Batikh, A., Cochennec, M., Amanbek, Y., Ahmadi-Senichault, A., & Davarzani, H. (2023). Experimental study of DNAPL displacement by a new densified polymer solution and upscaling problems of aqueous polymer flow in porous media. *Journal of Contaminant Hydrology*, *252*, 104120. <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2022.104120>
- Tomlinson, D. W., Rivett, M. O., Wealthall, G. P., & Sweeney, R. E. H. (2017). Understanding complex LNAPL sites: Illustrated handbook of LNAPL transport and fate in the subsurface. *Journal of Environmental Management*, *204*, 748–756. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.08.015>

## Acknowledgments

This work was carried out within the framework of the MOBILMOUSSE project. The authors thank BRGM (French Geological Survey), EDF (Électricité de France), and ANRT (Association Nationale de la Recherche et de la Technologie) for co-financing the project. The authors also acknowledge the financial support of the PIVOTS project from the “Region Centrale-Val-de-Loire” and the European Regional Development Fund.

# Les gels, réactifs innovants pour la dépollution *in situ*

## Retours d'expériences de plusieurs pilotes sur site

Julien Maire<sup>1</sup>, Iheb Bouzid<sup>1</sup>, Laurent Mansuelle<sup>1</sup>, Antoine Joubert<sup>1</sup>

<sup>1</sup> SERPOL, Vénissieux, julien.maire@serpol.fr

### Résumé

Les gels sont des fluides prometteurs pour répondre aux principaux défis liés à la dépollution *in situ*. En zone non saturée, où la gravité limite les rayons d'injection, la viscosité des gels limite cet effet et permet d'obtenir une propagation horizontale et verticale uniforme dépassant plusieurs mètres, même dans des matériaux très grossiers. Là où le temps de contact entre la pollution adsorbée et le réactif est un enjeu, les gels, grâce à leur viscosité, sont peu mobiles, restant en place plusieurs mois même au sein de nappes très rapides et permettent d'assurer un temps de contact long entre le réactif transporté au sein du gel et le sol. Là où les forces visqueuses de l'eau sont insuffisantes pour déplacer des phases pures (hydrocarbures, solvants chlorés...), les gels ont la capacité de pousser efficacement les gouttelettes de phase vers des points de pompage. Dans tous les cas, les cheminements préférentiels causés par les différences de perméabilité sont moins un problème pour les gels (comportement non Newtonien, rhéofluidifiant) que pour les réactifs liquides classiques. Toutes ces observations sont confirmées par des essais laboratoire et pilotes sur site menés par SERPOL et ses partenaires.

### Introduction

La dépollution *in situ* est un défi pour de multiples raisons : L'apport de réactifs injectables, par exemple, est limité en zone non saturée par les faibles rayons d'action qui peuvent être atteints. En zone saturée, le temps de contact entre réactif et sol contaminé peut être réduit à cause de l'éluion des réactifs par la nappe. Lorsqu'il s'agit d'aller améliorer la récupération de phases pures (hydrocarbures ou solvants chlorés), une quantité importante de phase reste piégée dans les sols, les forces appliquées par l'eau pompée sur les gouttelettes étant trop faibles pour les déplacer. En outre, la sensibilité des fluides classiques aux hétérogénéités de perméabilité ne permet pas d'imprégner les milieux de façon homogène et prédictible. SERPOL et ses partenaires, grâce au cofinancement par l'ADEME de plusieurs projets R&D collaboratifs sur le sujet, ont eu l'occasion de développer en laboratoire et de valider à l'échelle du pilote sur site, des stratégies de dépollution améliorées grâce à l'utilisation de réactifs sous formes de gel. Ces gels ont en effet plusieurs propriétés intéressantes (viscosité, comportement non Newtonien, etc...) qui sont mises à partie.

### Matériel et méthodes

Les résultats présentés seront une synthèse de différentes technologies de traitement à base de gels qui ont été évaluées sur site : (1) L'utilisation d'un gel réactif pour dégrader un polluant persistant au sein d'une nappe circulant très rapidement (10 m/j). (2) L'utilisation d'un gel de mobilisation pour

améliorer la récupération d'hydrocarbures sous une station essence, en cours de pilotage. (3) D'autres applications qui seront mises en pilotage d'ici la tenue de la conférence. Pour tous les pilotes, des stratégies de mesure et de suivi importantes et adaptées à chacun (analyses d'eau, de sol, traçages, tomographie de résistivité électrique...) ont été mises en place pour s'assurer de l'obtention de résultats de qualité. Ces résultats seront présentés. Au total, SERPOL a eu l'occasion d'injecter plusieurs centaines de m<sup>3</sup> de gel sur différents sites.

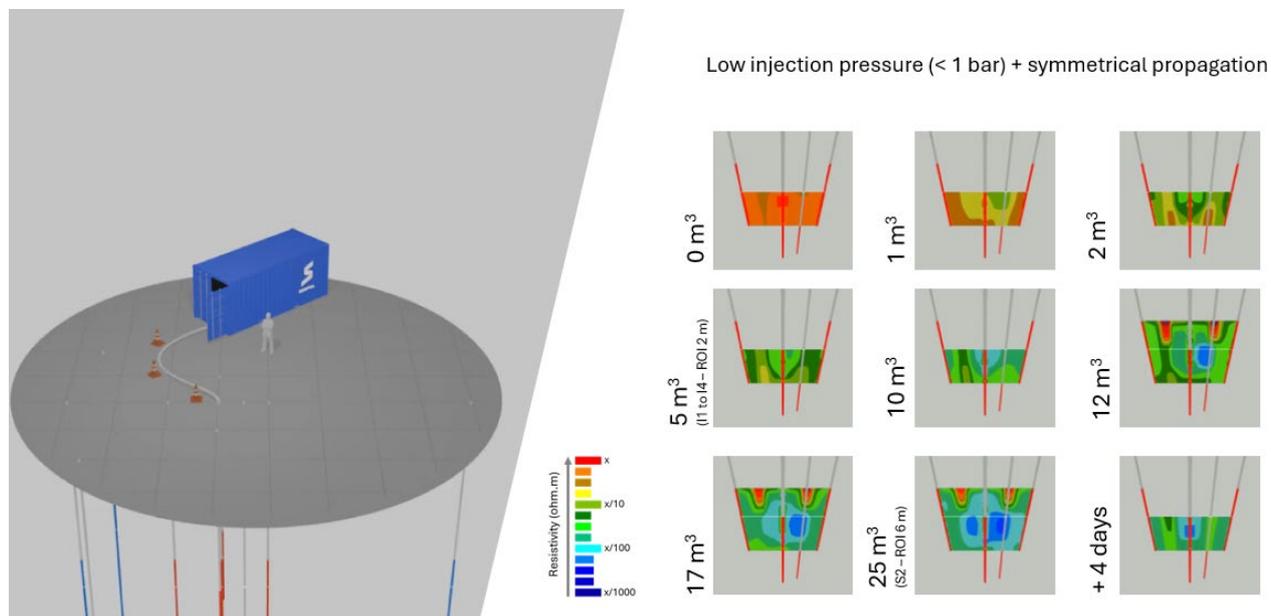


Figure 1 : Propagation du gel dans une zone saturée, visualisée par tomographie de résistivité électrique (nappe circulante à 10 m/j).

## Résultats et discussion

Les pilotes terminés ont donné d'excellents résultats. Au sein de la nappe se déplaçant très rapidement, injecter le réactif en une fois sous forme de gel a permis de le propager de façon homogène et de le maintenir en place durant plusieurs mois, assurant le temps de contact nécessaire pour la dégradation de 99 % de la pollution adsorbée au bout d'un mois. Pour le pilote de mobilisation de phase pure en cours, les résultats laboratoire ont d'ores et déjà montré que l'association de gel et de tensioactif permettait non seulement de réduire le piégeage dû aux forces capillaires (effet du tensioactif) mais également de pousser cette phase libérée grâce au gel dont la viscosité est supérieure. Les résultats à l'échelle du pilote seront acquis d'ici la conférence.

### Results for the target depth (8-12 m) – 1 month after injection

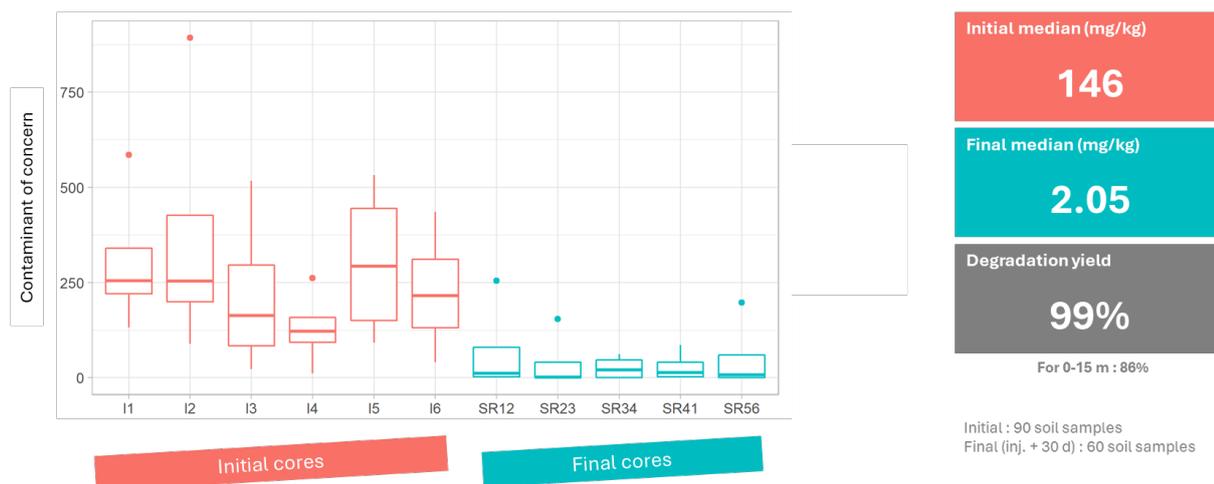


Figure 2 : Résultats de dégradation du lindane par le réactif apporté sous forme de gel (nappe circulant à 10 m/j).

## Conclusions et perspectives

Grace à leurs propriétés uniques, les gels sont des fluides très intéressants pour vectoriser de façon homogène des réactifs in situ, assurer un temps de contact long entre les réactifs et le sol contaminé. Ils permettent aussi de mobiliser des phases organiques de façon contrôlée pour améliorer leur pompage, en laissant une saturation résiduelle inférieure aux technologies de pompage classiques.

## Références

Livrables des projets GESIPOL FAMOUS, PAPIRUS et ISMIIR.

Maire et al (2024). Gels as Innovative Fluids for In Situ Remediation, Overview of Projects from Lab to Field-Scale. Communication orale à Battelle Chlorinated Conference (Denver, USA).

## Remerciements

SERPOL remercie l'ADEME pour le cofinancement des projets de recherche PAIRUS, FAMOUS et ISMIIR, au sein desquels ces technologies en rupture ont pu être développées. SERPOL remercie aussi ses partenaires au sein de ces projets R&D collaboratifs AECOM, BRGM, GENDRY, IC2MP/Univ. de Poitiers, INEOS INOVYN, INP Bordeaux, INTERA and SOLVAY.

# Suivi géophysique d'expérimentations multiphasiques relatives à la récupération de solvants chlorés en phase pure dans un milieu poreux saturé par injection de polymères

Jacques DEPARIS<sup>1</sup>, Amir ALAMOOTI<sup>1</sup>, Henri LIM<sup>1</sup>, Fabien LION<sup>1</sup>, Behshad KOOHBOR<sup>2</sup>, Stéfán COLOMBANO<sup>2</sup>

1: BRGM, Orléans, France, j.deparis@brgm.fr

2: HGM, GeoRessources, University of Lorraine, Nancy, France, Behshad.koohbor@univ-lorraine.fr

## Résumé

Ce travail s'inscrit dans le cadre du projet PAPIRUS Géophy (Pompage Assisté par Puits Inclinés avec Récupération par Upwelling et injection de Stabilisants – aspect géophysique) qui a pour but de développer une méthodologie d'estimation des teneurs en polluants de type composés chlorés en phase pure (DNAPL : Dense Non-Aqueous Phase Liquids) par des méthodes indirectes. Seule la partie expérimentale du projet est présentée car la partie terrain n'a pas encore eu lieu. Le but des expériences de laboratoire est de mettre au point des modèles pétrophysiques permettant l'estimation des teneurs en polluants dans le cadre d'écoulement triphasique (eau/DNAPL/gel) à partir des mesures de résistivité complexe et de permittivité.

## Introduction

Les liquides en phase non aqueuse (NAPL), par ex. les essences ou les solvants chlorés industriels, représentent une part importante de la problématique des sites et sols pollués. Les polluants étudiés dans la présente étude sont des DNAPL (D : dense) de type chlorés. Les sources de pollution en DNAPL relarguent des polluants en phases dissoute et gazeuse, ce qui peut dans certains cas créer des problèmes sanitaires ou de ressources en eau. Le comportement des DNAPL en milieu poreux est complexe car il met en jeu des écoulements multiphasiques (eau/DNAPL/air). Il est donc primordial de bien caractériser cette pollution avant, pendant et après la dépollution (Atekwana et Atekwana, 2010; Ajo-Franklin et al., 2006).

Parmi le large éventail de propriétés géophysiques existantes, la permittivité diélectrique haute fréquence et la résistivité électrique complexe sont les plus adaptés pour pouvoir évaluer l'évolution des teneurs en polluant. Concernant la permittivité diélectrique haute fréquence, les NAPL auront des contrastes de paramètres physiques importants par rapport à l'eau qu'il remplace lors des opérations de pompage. En effet, la constante diélectrique varie de 2 pour le toluène à 10 environ pour le dichloroéthane, alors que l'eau présente une constante diélectrique de 81 (Ajo-Franklin et al, 2006). L'intérêt pour la méthode de résistivité a émergé étant donné le fait que les NAPL sont des isolants électriques ; les NAPL peuvent provoquer une augmentation de la résistivité quand ils sont sous forme de produit pur et qu'ils déplacent l'eau dans un sol saturé. La polarisation induite est sensible aux propriétés à l'échelle des pores, telles que la granulométrie, la forme des grains, la chimie des surfaces des grains et la distribution de la taille du pore (Scott et Barker, 2003, Titov et al., 2010). Des études en laboratoire ont montré que la relation entre la concentration en

NAPL et la réponse en polarisation induite est linéaire (Revil et al., 2011, Schmutz et al., 2010, 2012, Irvani et al. 2020, 2021, Colombano et al., 2021).

Dans ce travail, nous proposons de réaliser des expériences de laboratoire afin de modéliser le lien entre les teneurs en polluants et les propriétés électriques et diélectriques de matériaux. Ce modèle pétrophysiques sera ainsi utilisé pour les mesures réalisées qui devront être réalisés d'ici la fin de l'année 2024 sur le site expérimental.

## Matériel et méthodes

Le bac 2D a des dimensions de 30 × 50 × 7 cm (hauteur, largeur, profondeur). La figure 1 montre schématiquement l'avant du réservoir. Le corps du bac 2D est constitué d'un matériau résistant aux solvants appelé fluorure de polyvinylidène (PVDF). La paroi avant du réservoir, d'une épaisseur de 0,8 cm, est constituée d'un verre rectangulaire transparent utilisé pour prendre des photos de chaque étape des expériences.

La figure 1 présente la localisation des électrodes pour les mesures de résistivité électrique complexe ainsi que les quadripôles de mesures. Les cercles noir et bleu montrent respectivement la localisation des 30 électrodes de courant et des 30 électrodes de potentiel. Le courant électrique alternatif (AC) est injecté entre deux électrodes de courant en acier inoxydable et la différence de potentiel est mesurée par l'intermédiaire de deux électrodes de potentiel non polarisables fabriquées (Cu/CuSO<sub>4</sub>) au BRGM. L'ensemble des électrodes ont été placées à l'extérieur des échantillons afin d'éviter les interférences de flux qui peuvent à leur tour interférer avec les signaux de courant électrique (Maineult et al., 2004). Les électrodes impolarisables ont été fabriquées à partir d'un mélange de 72,75 g d'eau milli-Q (eau ultra-pure), 26 g de CuSO<sub>4</sub> et 1,25 g de gélatine dans 100 g de solution. La céramique poreuse a été utilisée à l'interface des électrodes non polarisables et des milieux poreux saturés. Chaque électrode non polarisable a été connectée au SIPLAB IV avec des câbles blindés. Cette appareil permet de mesurer la dépendance fréquentielle de la résistivité entre 0.001 et 2000 Hz. Pour chaque cycle, 47 mesures sont réalisées, dont 20 configurations de type dipôle-dipôle azimutal (figure 1a et b) et 27 configurations de type dipôle-dipôle équatorial (figure 1a et b). Ces deux réseaux ont été représentés sur la figure 1 respectivement par des ronds et des hexagones. Quinze sondes TDR permettant de mesurer la permittivité diélectrique haute fréquence ont été placées dans la Bac 2D (cf. figure 1).

Le monitoring visuel est assuré par une caméra qui est automatisée pour prendre une photo toutes les cinq minutes lors de la montée du DNAPL et toutes les deux minutes lors de l'injection de xanthane densifié. La caméra digitale utilisée est la Nikon® D810 équipée de lentilles NIKKOR LENS 105 (Nikon®). La résolution de la caméra est de 34 mégapixels. Le but de la prise de photo est de photographier les changements lors de l'écoulement multiphasique dans le milieu poreux et d'estimer la saturation en DNAPL après l'expérience.

Le milieu poreux est constitué principalement d'un sable de marbre dont la taille des grains est comprise entre 0,6 et 0,8 millimètres et dont la perméabilité vaut environ 145 darcy. L'eau du robinet a été dégazée à l'aide d'un réservoir à ultrasons (VWR Ultrasonic Cleaner - USC500D). L'eau est injectée à l'aide de cinq tuyaux situés au fond du réservoir. Cette phase est suivie d'une phase de drainage réalisé par l'injection de DNAPL depuis les cinq ports localisés au fond du bac à l'aide de pompes péristaltiques. Le polluant étudié est un solvant chloré prélevé sur un site de l'usine INOVYN à Tavaux (39). Enfin la phase de dépollution est réalisée par l'intermédiaire de l'injection de xanthane densifiée depuis le port inférieur central (Alamooti et al, 2024).

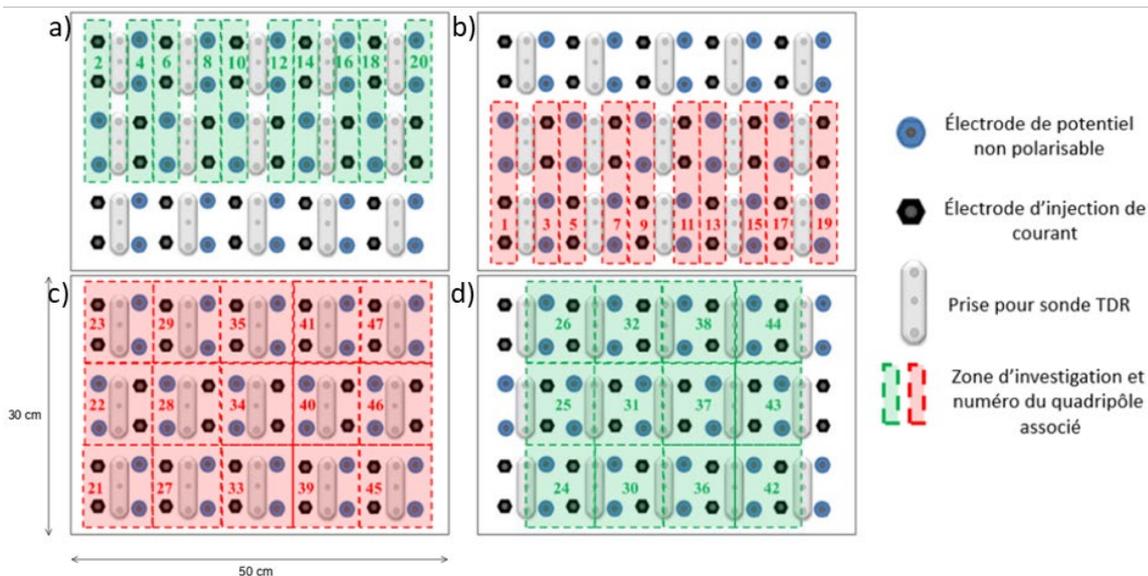


Figure 1 : Positions des électrodes et des sondes TDR dans le bac 2D avec vue de face, les 47 quadripôles de mesures sont montrés pour les 20 configurations de type dipôle-dipôle azimutal (1a et b) et les 27 configurations de type dipôle-dipôle équatorial (figure 1a et b)

## Résultats et discussion

La figure 2 présente l'évolution temporelle de l'amplitude de la résistivité (à gauche) et de la permittivité (à droite) pendant respectivement la phase de drainage de l'eau, le début de la phase de dépollution et la fin de la phase de dépollution. Ces données sont surimposées sur les photographies correspondantes.

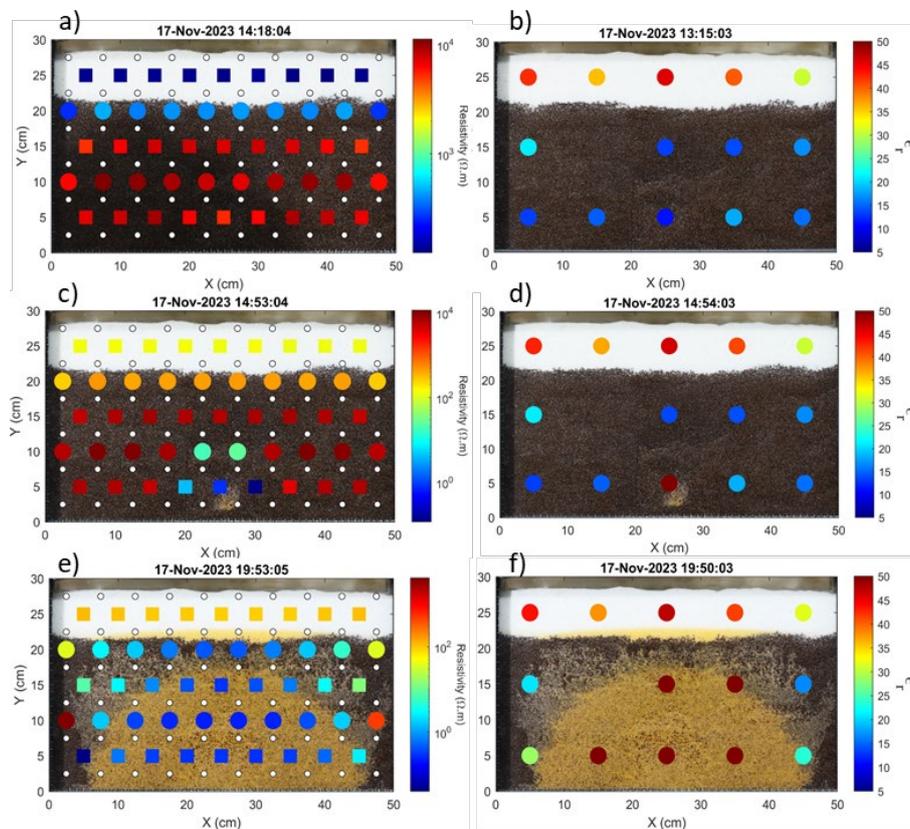


Figure 2 : Séries de photos avec mesures de résistivité (a, c, e) et de permittivité (b,d,f) respectivement pendant la phase de drainage (haut) et le début (milieu) et la fin (bas) de la phase de dépollution. Pour les mesures de résistivité, les ronds représentent les mesure de type dipole-dipole azimutale et les carrés les mesures de type dipole-dipole équatoriale.

Durant la phase d'injection du polluant (Figure 2 a et b), on constate que l'augmentation de la saturation en DNAPL a pour conséquence une augmentation de la résistivité du milieu. En effet, le DNAPL en phase pure n'est pas composé d'ions, le SIP mesure alors une très grande résistivité de l'ordre de  $10^4 \Omega \cdot m$ . Pour la permittivité relative les valeurs diminuent de 35 en début d'expérience quand le bac est saturé en eau à des valeurs proches de 15 pour les parties saturées en DNAPL.

Durant la phase d'injection de la solution, c et d pour le début de l'expérience et e et f pour la fin de l'expérience, les Figure 2 montrent que la solution est visible depuis la vitre et les outils géophysiques perçoivent également ce nouveau fluide grâce au fort contraste entre les propriétés du xanthane densifié par NaI, le DNAPL et l'eau. La solution de xanthane densifiée est très concentrée en ions sodium ( $Na^+$ ) et iodure ( $I^-$ ), la conductivité mesurée est de 2,6 mS/cm à 20,1 °C (résistivité : 3,85  $\Omega \cdot m$ ). On mesure de faibles résistivités associées à la couleur bleue, ce qui est cohérent. On note également que la solution est associée à une très haute valeur de permittivité.

La Figure 3 présente l'évolution temporelle de l'amplitude (a) et la phase (b) de la résistivité pour trois quadripôles centraux. La localisation de ces quadripôles est indiquée sur le schéma du bac. Le code couleur indique la mesure correspondante. Pour la résistivité, durant la phase d'injection, les quadripôles de mesure de bas en haut voient successivement leur résistivité augmenter au fur et à mesure que le niveau de polluant monte sauf pour le quadripôle bleu qui n'est pas en contact avec le polluant. Durant la phase d'injection, la résistivité pour le quadripôle du bas (en rouge) chute aux alentours de quelques ohm mètres. En effet, la solution conductrice est en contact avec le quadripôle. Le quadripôle du centre (en vert) voit ensuite la résistivité diminuer brusquement jusqu'à environ une dizaine d'ohm mètres puis de manière progressive jusqu'à environ quelques ohm mètres.

En ce qui concerne le déphasage, on voit que, pendant la baseline, celui-ci est faible (inférieur à 2 mrad) et stable. La phase d'injection du polluant a pour conséquence d'augmenter le déphasage, comme le montrent des expériences passées

De plus le quadripôle du bas (en rouge) est impacté plus vite que le quadripôle du niveau moyen (en vert). Enfin le quadripôle du haut (en bleu) est peu impacté. Lors de la phase d'injection de polymère, on remarque que le déphasage diminue dès que le polymère arrive au niveau de la zone d'influence du quadripôle de mesure jusqu'à obtenir une valeur négative de l'ordre de -10 mrad. Ces déphasages négatifs restent difficiles à expliquer mais peuvent être induits par les forts contrastes de résistivité lors de la phase de dépollution.

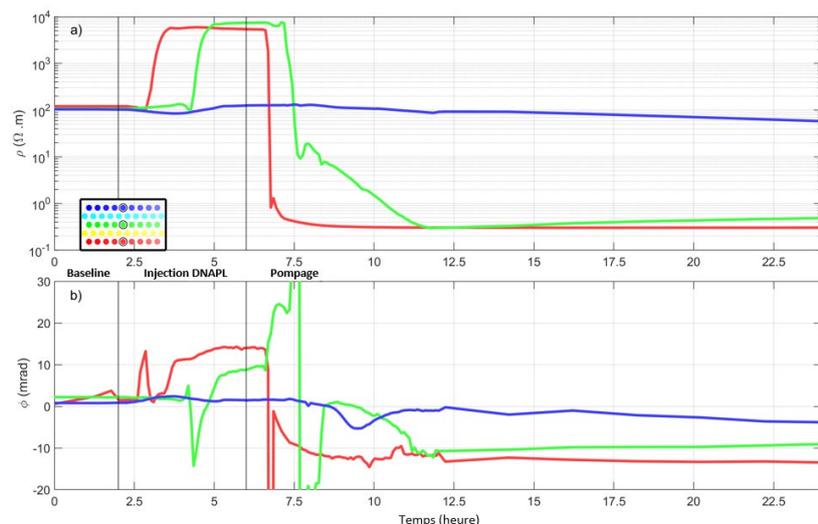


Figure 3 : Evolution temporelle de la résistivité et phase mesurées par les dispositifs équatoriaux centraux pendant l'expérience : a) amplitude, b) phase.

## Conclusions et perspectives

Des expériences de récupération de DNAPL à l'aide d'injection de polymère densifié ont été réalisées dans un bac 2D. Ces expériences ont été suivies à l'aide de mesures géophysiques et optique. Les mesures géophysiques (résistivité et permittivité) de DNAPL et gel densifié ont montré un contraste important entre ces deux phases. Le suivi des essais de dépollution par ces méthodes géophysiques a mis en lumière une bonne corrélation entre les déplacements des différentes phases liquides (DNAPL et gel densifié) et les mesures réalisées. Le suivi par méthode géophysique est fiable et encourageant pour un test à l'échelle décimétrique et métrique sur un site pollué. Ces résultats permettront de mettre au point un modèle pétrophysique par l'intermédiaire de modélisation couplé, qui sera ensuite utilisé sur les données terrain qui devront être acquises cette année.

## Références

Ajo-Franklin, J. B., Geller, J. T., & Harris, J. M. (2006). A survey of the geophysical properties of chlorinated DNAPLs. *Journal of applied geophysics*, 59(3), 177-189.

Atekwana, E. A., & Atekwana, E. A. (2010). Geophysical signatures of microbial activity at hydrocarbon contaminated sites: a review. *Surveys in Geophysics*, 31(2), 247-283.

Colombano, S., Davarzani, H., van Hullebusch, E. D., Huguenot, D., Guyonnet, D., Deparis, J., ... & Ignatiadis, I. (2020). Comparison of thermal and chemical enhanced recovery of DNAPL in saturated porous media: 2D tank pumping experiments and two-phase flow modelling. *Science of The Total Environment*, 143958.

Iravani, M. A., Deparis, J., Davarzani, H., Colombano, S., Guérin, R., & Maineult, A. (2020). Complex electrical resistivity and dielectric permittivity responses to dense non-aqueous phase liquids' imbibition and drainage in porous media: a laboratory study. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 25(4), 557-567.

Revil, A., Schmutz, M., & Batzle, M. L. (2011). Influence of oil wettability upon spectral induced polarization of oil-bearing sands. *Geophysics*, 76(5), A31-A36.

Schmutz, M., Revil, A., Vaudelet, P., Batzle, M., Viñao, P. F., & Werkema, D. D. (2010). Influence of oil saturation upon spectral induced polarization of oil-bearing sands. *Geophysical Journal International*, 183(1), 211-224.

Scott, J. B., & Barker, R. D. (2003). Determining pore-throat size in Permo-Triassic sandstones from low-frequency electrical spectroscopy. *Geophysical Research Letters*, 30(9).

Titov, K., Tarasov, A., Ilyin, Y., Seleznev, N., & Boyd, A. (2010). Relationships between induced polarization relaxation time and hydraulic properties of sandstone. *Geophysical Journal International*, 180(3), 1095-1106.

## Remerciements

Cette étude a été réalisée dans le cadre du projet Papyrus et Papyrus Geophy. Les auteurs remercient l'ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie) pour le cofinancement du projet dans le cadre du programme Gesipol. Nous remercions chaleureusement le soutien financier apporté au projet PIVOTS par la Région Centre – Val de Loire et le Fonds Européen de Développement Régional.