



INJECTION IN SITU DE FLUIDES NON NEWTONIENS

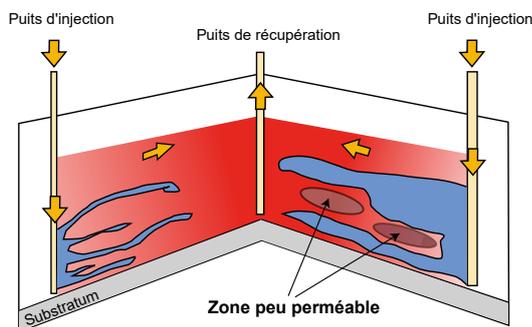
SOUTIEN À LA RÉCUPÉRATION DE PRODUIT PUR PLONGEANT

DESCRIPTION DU PRINCIPE DE LA TECHNIQUE

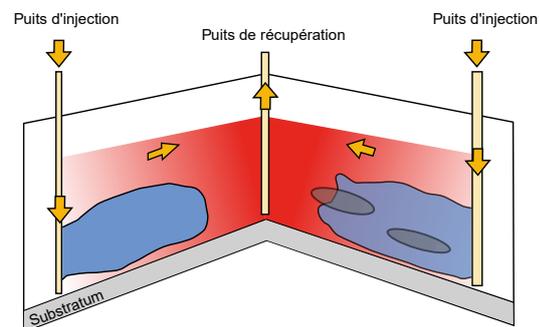
Le balayage par fluides non newtoniens est une technique de **dépollution in situ qui concerne les eaux souterraines et les sols**. Cette technique vise à extraire les polluants organiques denses en phase liquide (Dense Non-Aqueous Phase Liquids – DNAPL) du sol de **manière homogène** en utilisant des fluides non newtoniens de type rhéofluidifiant. Les fluides non newtoniens peuvent être **une mousse** (mélange de gaz (70 à 99%) et d'une solution de tensioactifs)

et/ou une solution de polymère (fluide visqueux obtenu par ajout de polymères dans une solution aqueuse). Les fluides sont formulés pour que leurs propriétés physiques s'adaptent aux caractéristiques du milieu et à la pollution à traiter.

Le mécanisme de dépollution est principalement physique : il consiste à accéder à toute la pollution et à déplacer mécaniquement le polluant pur et les eaux polluées vers un point d'extraction.



Pompage / écrémage classique : ratio de viscosité défavorable et contournement des zones moins perméables



Utilisation d'un fluide non newtonien rhéofluidifiant la variation de la viscosité du fluide à la perméabilité de la zone traversée permet un avancement de manière homogène

Déplacement de la pollution hétérogène dans le cas d'un pompage/écrémage classique (gauche) et homogène avec l'utilisation d'un fluide rhéofluidifiant (droite).

Le meilleur rendement épuratoire du balayage *in situ* par fluides non newtoniens par rapport à une technique de pompage/écrémage ou de lavage repose sur le contrôle des **propriétés physiques** (viscosité, densité) et **chimiques** des fluides (tension interfaciale avec le polluant) pour mobiliser voire désorber le plus de polluant et lui permettre un déplacement homogène jusqu'au puits de récupération [1] :

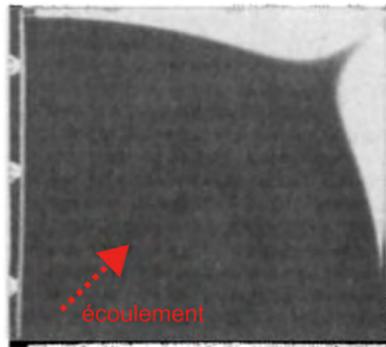
- la **viscosité des fluides non newtoniens, plus élevée que celle de l'eau, assure un front plat** durant l'infiltration du fluide dans la zone saturée, ce qui permet de limiter la création de chemins préférentiels (digitations),
- leur viscosité diminue lorsqu'une contrainte mécanique est appliquée au fluide. Ils deviennent ainsi plus « fluide » lorsque la perméabilité du sol diminue d'où leur nom de rhéofluidifiant (fluides à rhéologie dite non newtonienne). Cette **variation de viscosité selon la perméabilité** leur

permet de balayer de manière équivalente les horizons à la fois grossiers et fins d'un sol saturé ou non en eau et leur permet **d'avancer de manière homogène** (front plat).

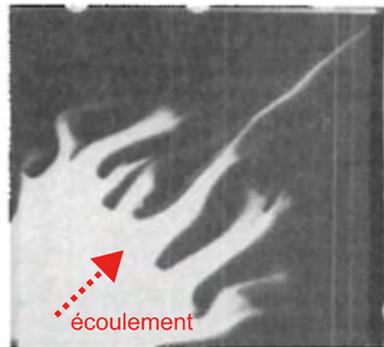
- la **faible tension interfaciale** entre le polluant et le fluide de balayage, liée à l'utilisation de tensioactifs (nécessaires à la fabrication de la mousse et éventuellement ajoutés dans la formulation de solution de polymère), **diminue les forces capillaires qui retiennent le polluant** dans les pores du sol.
- la **densification du fluide de balayage** (dans le cas de solution de polymère) évite qu'il ne passe au-dessus des zones de produit pur (DNAPL) et **améliore le déplacement de la pollution**.

Ce sont les deux propriétés liées à la viscosité qui sont le plus influentes.

INJECTION IN SITU DE FLUIDES NON NEWTONIENS



a)



b)

© N. Mungan, 1971

Essais en laboratoire de déplacement d'un fluide par rapport à un second fluide selon le rapport de leur viscosité : si le fluide de déplacement est plus visqueux que le fluide poussé (a), le déplacement est stable; si le fluide de déplacement est moins visqueux (b), le déplacement est instable

CONTEXTE D'UTILISATION

La technique de balayage par fluides non newtoniens dans le domaine des sites et sols pollués est dérivée des techniques utilisant ces fluides pour la récupération assistée du pétrole. Elle est utilisable dans des sols avec des **propriétés physiques homogènes ou hétérogènes**. Cette méthode est seulement appropriée en présence de **produit pur**. Elle

est applicable quel que soit le volume et la profondeur de la pollution.

À quelle étape ?

Évalué dans le cadre du **plan de gestion** et du **plan de conception des travaux** (PCT), le balayage par fluides non newtoniens est utilisé à l'étape de **dépollution**.

POLLUANTS CONCERNÉS

Les polluants concernés sont les **polluants organiques immiscibles dans l'eau** et plus denses que l'eau (**DNAPL**) : goudron de houille (notamment des Hydrocarbures

Aromatiques Polycycliques - HAP), composés chlorés (perchloroéthylène, trichloroéthylène...).

MATÉRIEL NÉCESSAIRE

Le matériel déployé est en grande partie similaire à celui utilisé pour le lavage *in situ* (flushing). Cela inclut le matériel pour **l'injection** et **l'extraction** (puits verticaux ou/et tranchées, pompes, tuyauteries), un **réseau piézométrique** pour le suivi des écoulements et la qualité des eaux souterraines et une **filière de traitement** des eaux usées récupérées en surface. Le matériel spécifique à la préparation et l'utilisation de fluides non newtoniens inclut les **additifs** de préférence bio-

sourcés (polymère comme la gomme de xanthane ou de guar) et **tensioactifs** (Sodium Dodecyl Sulfate SDS ou autre), les cuves de stockage, le système de mélange avec l'eau et une unité d'injection de gaz pour la génération de la mousse. **Les additifs et tensioactifs utilisés ne sont pas toxiques pour l'homme ni pour l'environnement dans les conditions de mise en œuvre** et n'impactent pas significativement le traitement des eaux usées récupérées.



© Projet SILPHES - BRGM / Serpol

Injection de mousse in situ pour la récupération de DNAPL.

MÉTHODOLOGIE

La phase de test en laboratoire, étape préalable et indispensable au choix du fluide non newtonien, peut nécessiter plusieurs semaines voire mois de travail. Il s'agit de choisir les paramètres suivants pour la formulation du fluide :

- pour les mousses : les ratios air/liquides, les concentrations en surfactants, les débits et pressions, le type de surfactant et sa concentration
- pour les solutions de polymère : les concentrations en polymères et en surfactants si nécessaire ainsi que les débits et pressions.

Le choix entre mousses et solutions de polymère se fait principalement par les tests de compatibilité avec le ou les polluants visés, via des tests préliminaires en laboratoire. La mousse permet une consommation moindre de produit que les solutions de polymère et des gradients de pression plus importants mais leur formulation est plus difficile et nécessite plus d'expérience et d'expertise.

Sur site, la première étape consiste à **préparer le fluide de balayage** par mélange des différents agents. La création de la mousse peut aussi se faire directement dans le sol par coinjection du gaz et de la solution de tensioactif. Cette étape de génération est sensible, et la mousse peut devenir inutilisable si elle est mal produite.

L'étape suivante est **l'injection du fluide de balayage**, via des tranchées ou des puits déjà existants ou créés spécifiquement. L'injection est menée conjointement à un suivi des pressions et des écoulements. Lorsque les pressions d'injection sont

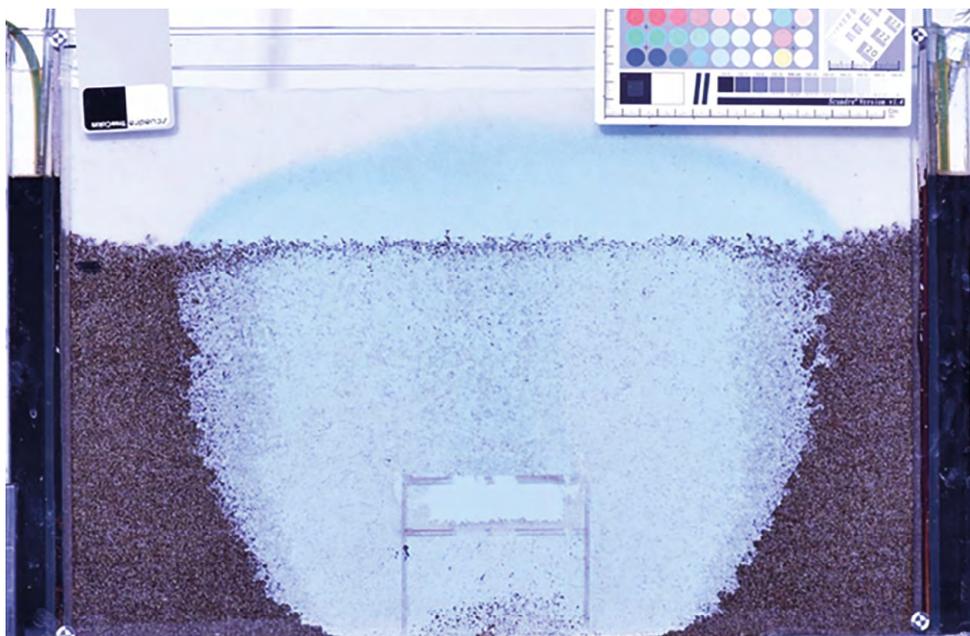
trop élevées, elles doivent être ajustées pour les solutions de polymère. Pour une mousse, la préparation peut être modifiée (fraction volumique du gaz, débit d'injection) pour diminuer sa viscosité. Les rayons d'actions sont de l'ordre de quelques mètres, ils sont légèrement inférieurs à ceux du pompage/écrémage.

L'injection est parfois réalisée en plusieurs passes jusqu'à ce que le fluide récupéré ne soit plus du produit pur mais un mélange avec les eaux souterraines.

À l'issue du traitement, de nouveaux sondages permettent de réaliser des prélèvements de sols pour analyser les pollutions résiduelles sur matrice solide et de valider l'arrêt de chantier de traitement. La technique permet de balayer efficacement les zones peu perméables du sol ce qui limite fortement les effets rebonds.

Points de vigilance :

- La production du fluide non newtonien est une étape sensible, les propriétés rhéologiques dépendent fortement de l'application stricte d'un protocole qui, s'il est mal suivi, peut diminuer très nettement l'efficacité de la méthode comme une mousse qui se liquéfie trop rapidement.
- Il est indispensable d'utiliser des additifs (polymères et/ou tensioactifs) d'origine biologique ou facilement biodégradables et dont l'innocuité sur les milieux est prouvée.
- Il est nécessaire de prévoir une filière de traitement des eaux usées récupérées (avec le DNAPL) en surface.



© Mamouti et al., 2022

Essai en laboratoire : essai d'injection de polymère pour balayer du DNAPL de type chloré.



AVANTAGES – INCONVÉNIENTS – MATURITÉ DE LA TECHNIQUE

AVANTAGES

Polluants

- Efficace sur une large gamme de polluants de type DNAPL,
- Traitement *in situ*,

Milieu

- Efficace pour les eaux souterraines et les sols (zone saturée), homogènes ou hétérogènes,

Mise en œuvre

- Faible volume d'eau utilisé par rapport à un pompage et traitement ou pompage-écrémage,
- Faible volume de tensioactif utilisé par rapport à un lavage chimique,

Résultats

- Traitement plus rapide que le pompage et traitement ou pompage-écrémage,
- Meilleur rendement épuratoire que le pompage et traitement ou pompage-écrémage,
- Effets rebonds minimisés.

INCONVÉNIENTS

Matériel

- Matériel supplémentaire pour la préparation du fluide non newtonien,

Polluants

- Inefficace sur des polluants très fortement adsorbés à la matrice du sol.

MATURITÉ DE LA TECHNIQUE



R&D aboutie, indicateurs non développés, technique rarement utilisée sur le terrain

DÉLAIS DE MISE EN ŒUVRE

La phase de test en laboratoire, étape préalable et indispensable au choix du fluide non newtonien, peut nécessiter plusieurs semaines ou mois de travail. L'implantation sur site est aussi rapide que celle du pompage/traitement ou du lavage

et dure quelques jours. La phase de traitement dépend de la taille du site : elle est de l'ordre de quelques semaines. Cette technique permet un meilleur rendement en un temps plus rapide qu'un pompage/écrémage et sans effet rebonds.

PHASE

CONCEPTION

MISE EN ŒUVRE SUR SITE

TRAITEMENT ET SUIVI DES PERFORMANCES

Délai associé



☒ : jour / ☒☒ : semaine / ☒☒☒ : mois / ☒☒☒☒ : année / ☒☒☒☒☒ : dizaine d'années

ÉLÉMENTS DE COÛTS

Les coûts incompressibles liés à l'aménagement/repli de chantier et à la mise en place du matériel et des puits sont environ deux fois plus chers que le pompage/écrémage. Les coûts de récupération unitaires [4] sont 20 à 30 % plus élevés que ceux pour le pompage/écrémage ; ces derniers sont classiquement compris entre 15 et 25 €/m³ de liquides pompés/traités sur

place hors consommation électrique et peuvent atteindre un maximum de 50 €/m³ [3]. Le surcoût de cette technique est compensé par des coûts de suivi post-traitement faibles liés :

- au fait que traiter les DNAPL de manière plus efficace diminue leur temps de relargage,
- à un faible volume des masses d'eau récupérées à traiter.

PHASE

CONCEPTION

MISE EN ŒUVRE SUR SITE

TRAITEMENT ET SUIVI DES PERFORMANCES

Coût associé



€ < 100 € / €€ < 1 000 € / €€€ < 10 000 € / €€€€ < 100 000 € / €€€€€ > 100 000 €

POUR EN SAVOIR PLUS - RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[1] Expertise ADEME - Utilisation des mousses pour le traitement des sites et sols pollués – Novembre 2019

[2] Alamooti A. et al. Influence of the injection of densified polymer suspension on the efficiency of DNAPL displacement in contaminated saturated soils. *Journal of Hazardous Materials* - 2022

[3] SelecDEPOL - Outil interactif de pré-sélection des techniques de dépollution et des mesures constructives - ADEME/BRGM

[4] Environmental Soil Remediation and Rehabilitation - Existing and Innovative Solutions. Springer International Publishing - 2020