

// RETOUR D'EXPÉRIENCE

PILOTE DE TERRAIN POUR LE TRAITEMENT IN-SITU D'UNE NAPPE POLLUÉE AUX SOLVANTS CHLORÉS PAR BIOSTIMULATION ANAÉROBIE

Les solvants chlorés (PCE - tétrachloroéthylène, TCE - trichloroéthylène) sont des polluants souvent rencontrés dans les eaux souterraines. Les traitements biologiques in-situ de tels panaches sont souvent pertinents en termes de ratio coût / efficacité. Ils nécessitent néanmoins la réalisation préalable d'un Plan de Conception de Travaux (PCT selon la NFX 31-620-3) intégrant plusieurs étapes de pilote (laboratoire puis terrain) afin de définir les conditions les plus favorables de biostimulation des micro-organismes et le gain réellement attendu.

Présentation du site d'étude

Le site a été le siège de stockage en cuves aériennes de solvants divers des années 80s aux années 90s. Les études préliminaires ont mis en évidence plusieurs zones d'impact. A proximité de la limite aval du site, la présence d'une phase coulante est suspectée (jusqu'à 9 500 mg/kg de PCE au contact du substratum argileux), générant un panache hors site présentant de fortes concentrations (3 à 16 mg/L pour la somme PCE + TCE). Du fait de puits privés présents à 75 m de distance en aval hydraulique du site, Tauw France, en sa qualité de maître d'œuvre, a proposé un traitement par biostimulation anaérobie in-situ selon deux scénarios alternatifs: soit une bar-

rière réactive visant à l'atténuation des teneurs dans le panache hors site, soit un réacteur in-situ pour traiter la (ou les) source(s) de pollution. Ces scénarios permettront de pallier à différentes incertitudes lors de la finalisation du PCT, notamment la délimitation des sources, non complète au démarrage des études de traitement.



Implantation du site et des piézomètres

Essais préliminaires et d'orientation au labora- toire

Les essais préliminaires ont porté sur l'évaluation du potentiel de biodégradation de la flore bactérienne existante dans l'aquifère du site. Les essais d'orientation au laboratoire ont porté sur l'efficacité de la bio-

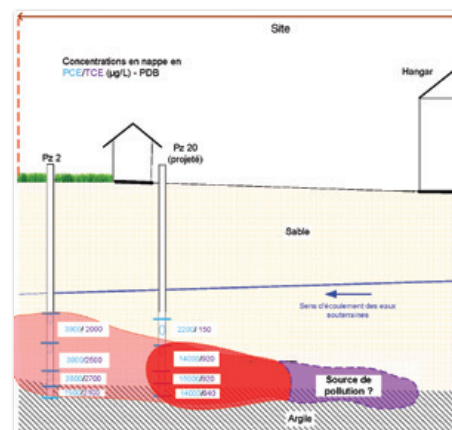
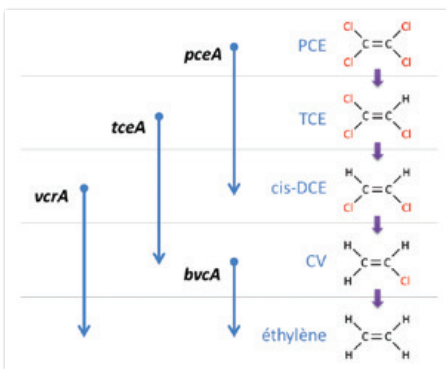


Schéma de principe du panache selon l'axe d'écoulement

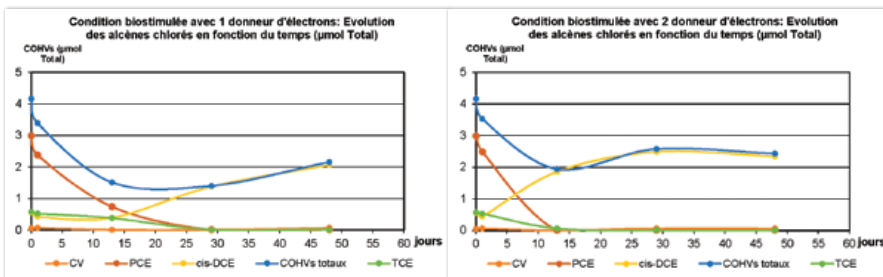
stimulation sous différentes conditions, comparée à celle d'autres techniques chimiques.

Des échantillons d'eau de nappe ont été soumis à l'analyse des marqueurs de biologie moléculaire¹. Ces analyses ont révélé la présence en faible quantité et l'activité des biomarqueurs *pceA* et *tceA*, cohérente avec l'accumulation de Cis-Dichloroéthylène (Cis-DCE) dans le panache comme produit de dégradation des PCE-TCE.



Gènes codant pour la biodégradation anaérobie séquentielle du PCE à l'éthylène (source : HYDREKA-ENOVEO)

Les matrices prélevées sur site « nappe + sol » ont été soumises à des essais au laboratoire par Soleo Services. Outre les témoins, deux essais en conditions anaérobies ont été réalisés en flacons fermés par ajout de substrats carbonés complexes permettant de dégrader rapidement les polluants. Ces essais ont conduit au résultat suivant : conversion en Cis-DCE à 100% dès 3 semaines et amorce de production de Chlorure de Vinyle (CV) à 7 semaines.

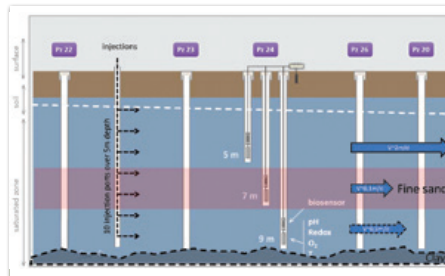


Essais de laboratoire (source : Soleo Services) : suivi de la dégradation des PCE-TCE au cours du temps par biostimulation anaérobie à l'aide de 1 ou 2 substrat(s) carboné(s)

Dimensionnement du pilote de terrain de biostimulation en nappe

Ensuite, plusieurs mesures réalisées sur le terrain ont permis de mettre en évidence de forts contrastes horizontaux et verticaux sur :

- la vitesse d'écoulement de nappe (de 0,1 à 10 m/jour),
- les concentrations en PCE (maximum à 80 mg/L, facteur 8 entre le fond et le haut de l'aquifère) ;
- le potentiel redox (POR, conditions oxydantes, +250mV, en surface et réduites en profondeur, -100mV).



Pilote de biostimulation : vue en plan (haut) et section illustrant la métrologie à l'aide des sondes in-situ (bas)

Compte tenu des caractéristiques du site et afin de tester les deux alternatives de traitement, le dimensionnement suivant a été retenu :

- le choix d'un substrat carboné sous forme d'émulsion pour une stimulation rémanente dans le temps : Lactate / Mélasse / Huile de Soja. ;
- Un système d'injection par le biais de 5 tubes à manchette (TAM) positionnés sur une ligne de 10 m de largeur pour introduire l'émulsion dans le sol sur 10 intervalles répartis sur les 5 m d'épaisseur de l'aquifère.

Ce dimensionnement résulte d'un travail commun entre le bureau d'études et l'entreprise de travaux et la répartition des tâches suivante a été retenue : installation des TAM et injection de l'émulsion par Soléo Services, campagnes de suivi et interprétation par Tauw France.

Monitoring et performances

Le réseau de suivi du pilote doit permettre de décrire les performances de traitement aux différentes profondeurs et distances de l'injection. Il est donc constitué de plusieurs piézomètres en flûte de pan (crépines positionnées à 3 profondeurs : 4-5 m, 6-7 m, 8-9 m) en amont (Pz22) de la ligne d'injection et en différentes positions en aval de la ligne d'injection : Pz24 à 7 m dans l'axe d'écoulement, Pz25 et 26 à 15 m et situés de part et d'autre de l'axe d'écoulement (distance de 10 m). D'autres piézomètres sont crépinés sur toute la hauteur de l'aquifère : Pz23 positionné au centre de la ligne d'injection et Pz20 situé à 35 m de l'injection. .

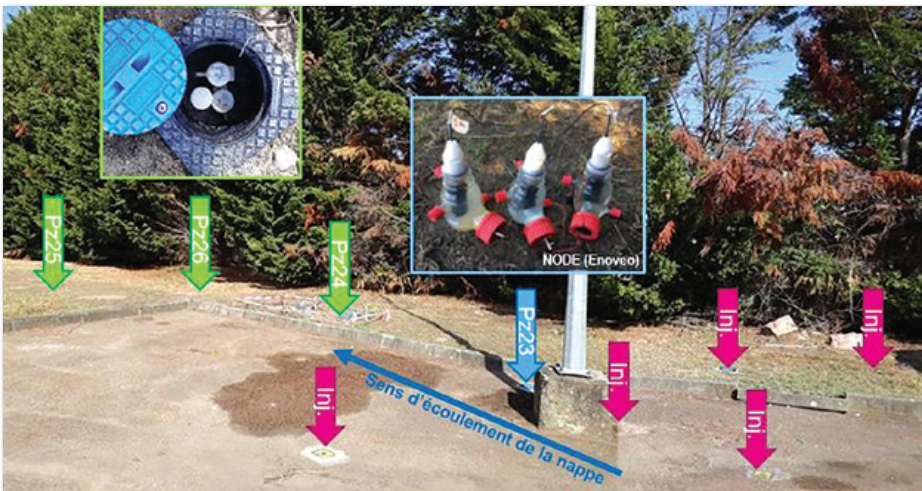
Le suivi du pilote est basé sur des campagnes régulières de prélèvement de la nappe pour l'analyse des polluants et des indicateurs



chimiques et biologiques de la dégradation. Il est complété de sondes in-situ (biocapteurs NODE développés par HYDREKA-ENOVEO). Ces sondes sont placées à 3 profondeurs différentes au droit de Pz24, pour la mesure en continu des paramètres physico-chimiques (pH, POR, O₂ dissous) et du carbone organique

de l'aquifère, plus perméable, les conditions favorables à la déchloration (faible POR, fort COT) sont rapidement lessivées. A proximité de l'injection (Pz24), la dégradation du PCE en Cis-DCE est rapide mais n'évolue pas au-delà du cis-DCE, même 5 mois après l'injection. En revanche, en profondeur, les effets de

avec deux solutions de mélasse / huile de soja / Fer Zéro Valent, en proportions variables selon la profondeur. Les conditions induites par la seconde injection (POR < -60 mV, COT > 25 mg/L) sont visibles pendant au moins 3 mois dans tous les ouvrages et à toutes les profondeurs. En Pz24 (7 m de l'injection),



Monitoring du pilote de biostimulation : détail des piézomètres en flûte de pan (gauche) et des sondes in-situ (droite)

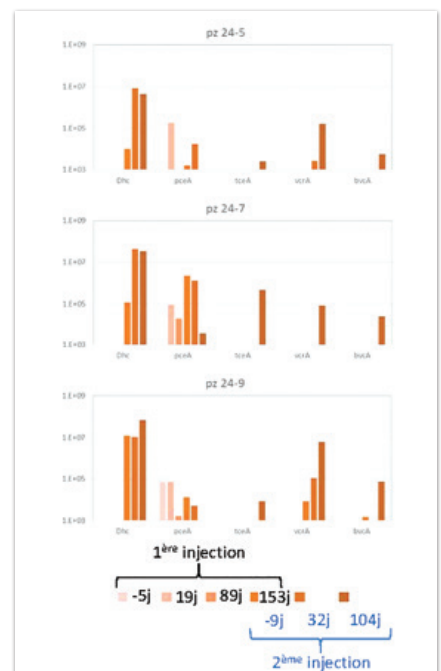
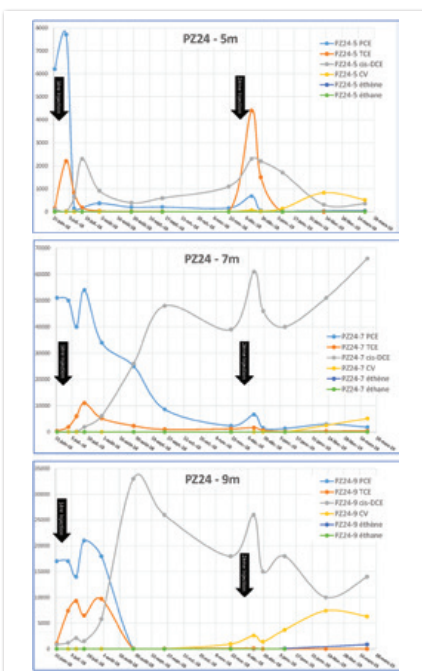
total (COT) consommable par les microorganismes stimulés.

La 1^{ère} injection a permis de libérer rapidement le carbone nécessaire à la stimulation des bactéries. Toutefois, dans la partie supérieure

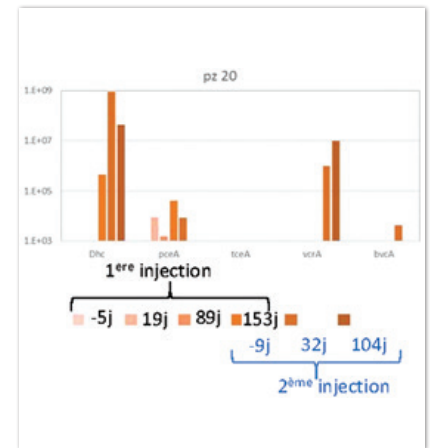
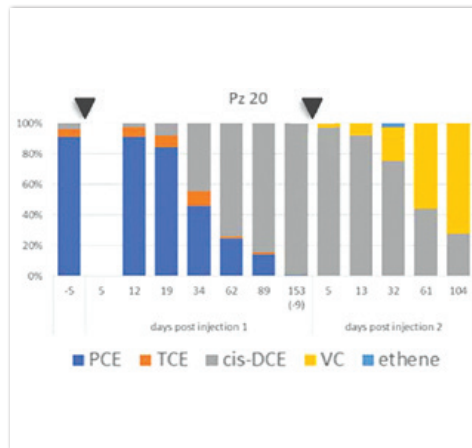
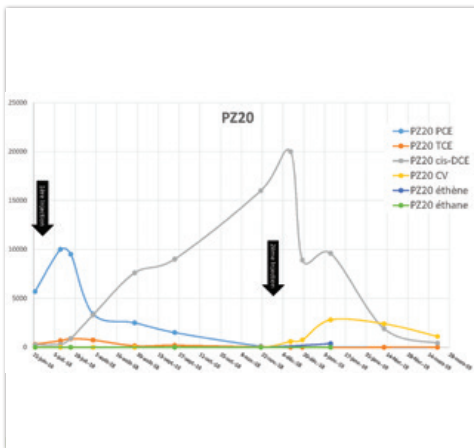
de la biostimulation sont rémanents et efficaces : 99% de réduction du PCE-TCE après 2 mois, apparition de CV au bout de 5 mois.

Afin de maintenir un effet rémanent, une seconde injection a été réalisée

1 mois après l'injection, l'éthène (produit final de dégradation des PCE/TCE) apparaît sauf dans l'horizon intermédiaire de l'aquifère, moins perméable. Ces conditions de dégradation sont également retrouvées plus en aval en Pz26 (15 m de l'injection,



Suivi temporel de la biostimulation au droit de Pz24 en trois profondeurs : concentrations (en µg/L, gauche) et distribution en solvants chlorés (en % molaire, centre), densité des biomarqueurs (densité en copies / L, droite).



Suivi temporel de la biostimulation au droit de Pz20 : concentrations (en $\mu\text{g/L}$, gauche) et distribution en solvants chlorés (en % molaire, centre), densité des biomarqueurs (densité en copies / L, droite).

15% d'éthène produit) puis PZ20 (35 m de l'injection). L'augmentation de l'ARN des biomarqueurs *vcrA* et *bvcA*, gènes encodant la dégradation du Cis-DCE à l'éthène, confirment l'effet de cette seconde injection.

Retours d'expérience

Malgré des conditions difficiles : aquifère très perméable (vitesse jusqu'à 5 m/jour), faible pouvoir tampon, concentrations élevées en PCE (80 mg/L), forts contrastes verticaux de concentrations et de conditions redox, faible activité initiale en Dehalococcoides, présence de cibles sensibles à moins de 100 m en aval hydraulique, les essais réalisés ont montré que les eaux souterraines contaminées en solvants chlorés pouvaient être traitées par des méthodes biologiques. Ces

traitements in situ nécessitent des phases pilotes plus complexes, faisant appel à l'expertise conjointe de bureaux d'études et de sociétés de travaux, mais affichent ensuite généralement un ratio Coût / Efficacité très intéressant, d'où l'intérêt qu'elles suscitent. Les essais réalisés visent à définir les solutions de stimulation, le mode d'introduction des réactifs dans l'aquifère, la durée de stimulation, les paramètres de monitoring, etc., éléments conclusifs permettant de soumettre le plan de conception des travaux à l'administration avant d'engager les mesures de gestion du site. Les capteurs in-situ permettent quant à eux d'optimiser le déclenchement des campagnes de prélèvement.

Néanmoins, les étapes pilotes menées au laboratoire et sur site ont chacune leurs biais. Les premières

sont souvent peu représentatives de la réalité de terrain (absence d'écoulement, conditions homogènes, réactifs en excès, etc.) ; les secondes restent onéreuses (x10), longues (1 an vs. 2 mois) et lourdes en instrumentation. Afin de s'affranchir de ces biais, Tauw France, HYDREKA-ENOVEO et l'Ecole Centrale de Lyon sont engagés dans un projet, dénommé MISS et soutenu par l'ADEME, en vue de développer un outil de biostimulation par microcosme passif in-situ plus flexible et moins cher que les essais de terrain et plus représentatif que les essais au laboratoire. Les résultats finaux sont attendus pour mi-2021. Des premiers résultats concernant la prise en compte de la complexité des communautés bactériennes bio-stimulées seront partagés lors des 4ème rencontres de la Recherche de l'ADEME et les premiers démonstrateurs sur site seront publiés fin 2020.

Sébastien KASKASSIAN, TAUW FRANCE
Marten VAN DER KOUWE, SOLÉO SERVICES
Jean-Michel MONIER, HYDREKA-ENOVEO