// DOSSIER : LES POLLUANTS EMERGENTS

REHABILITATION DES EAUX SOUTERRAINES IMPACTEES PAR L'ION PERCHLORATE

Les perchlorates d'origine anthropique sont des oxydants puissants utilisés principalement dans la fabrication des propergols composites (produit de propulsion des moteurs de fusées, missiles...) et divers dispositifs pyrotechniques (feux d'artifice, airbags, etc.). Les sels de perchlorate sont persistants, très solubles dans l'eau (200 g/l à 25°C pour le perchlorate d'ammonium) et se dissolvent rapidement (quel que soit le pH.) sous forme anionique ClO4-.

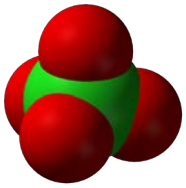
Dans l'environnement, ces propriétés confèrent à l'anion un comportement analogue à un traceur parfait, très mobile dans le sol et les eaux souterraines (faible capacité d'adsorption et faible biodégradation naturelle).

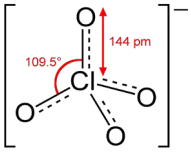
De nombreux travaux réalisés aux Etats-Unis d'Amérique décrivent les technologies applicables au traitement du perchlorate (cf. synthèse référence publiée par l'Interstate Technology & Regulatory Council en 2007). Les techniques éprouvées pour le traitement des nappes polluées par perchlorate sont soit biologiques soit physiques.

EXEMPLE D'UNE STRATEGIE DE REHABILITATION

Un site industriel exploitant le perchlorate d'ammonium utilisé durant plusieurs décennies a dû réhabiliter les eaux souterraines au droit de son emprise pour réduire son impact vis-à-vis de cibles extérieures (captage d'Alimentation en Eau Potable notamment, présentant un seuil réglementaire de potabilité très faible 4 µg/l). L'ion perchlorate s'est infiltré dans les eaux souterraines à l'aval d'ateliers de production (nappe phréatique dans un réservoir silicoclastique interstitiel et nappe captive dans un réservoir calcaire fissuré).

La sensibilité importante de ces cibles





impliquait la mise en place d'actions rapides de réhabilitation visant à supprimer les transferts dans l'environnement extérieur au site via la migration des perchlorates dissous dans les eaux souterraines (installation d'une barrière de confinement hydraulique multiniveaux).

les efforts ont également été portés sur la résorption des sources sols (excavation et traitement biologique sur site) et des sources primaires en nappe (traitement biologique par réduction anaérobie in-situ – procédé Bionappe®).

Au fur et à mesure de la maîtrise des transferts hors-site, le dispositif de pompage-traitement a été progressivement déployé en aval des zones sources en cours de traitement, afin de résorber plus rapidement la présence de perchlorate dans les panaches en nappe (figure 1)

ANTEA GROUP a accompagné le Maître d'Ouvrage pour le traitement d'une des zones impactées sur le site à travers des prestations variées d'études environnementales et d'ingénierie des travaux de réhabilitation (Maîtrise d'œuvre et expertises techniques notamment).

SUEZ REMEDIATION est intervenu pour la conception et la mise en œuvre de l'ensemble des travaux de réhabilitation sur le périmètre concerné, depuis la déclinaison opérationnelle des scénarii de gestion jusqu'à leur exécution (essais-pilotes, exploitation des systèmes de traitement, optimisations continues).

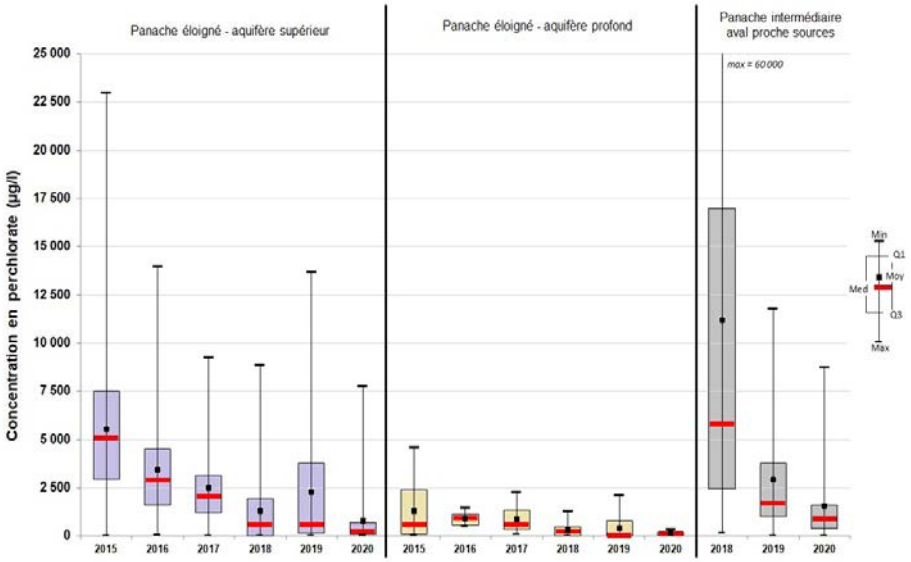


Figure 1 : Evolution des panaches

TRAITEMENT DES ZONES SOURCES : RÉDUCTION DU PERCHLORATE PAR DÉGRADATION BIOLOGIQUE EN ANAÉROBIE IN-SITU

Deux méthodes de traitement ont été envisagées et testées via des pilotes de terrain :

- Pompage puis traitement sur biofiltre planté de roseaux. Cette technique a été envisagée en alternative/optimisation à la filtration du perchlorate sur résines échangeuses d'ions.
- Traitement biologique par réduction anaérobie in-situ : (procédé Bionappe® anoxie). Ce type de traitement est très adapté au contexte du site (milieu industriel, présence de bâtiments, zones peu accessibles). Il a contribué à la résorption des impacts dans la nappe en supprimant l'alimentation des panaches, et à la réduction de la durée d'exploitation du dispositif de pompage-traitement.

MISE EN ŒUVRE DES SOLUTIONS DE TRAITEMENT)

CONFINEMENT HYDRAULIQUE : POMPAGE/TRAITEMENT DES EAUX PERCHLORATÉES ISSUES DU PANACHE DE POLLUTION

Afin de stopper la migration hors site du perchlorate présent dans les eaux souterraines dans la zone concernée, un confinement hydraulique a été mis en place au niveau des deux aquifères présents au droit du site. Les perchlorates sont traités au niveau d'une unité de traitement des eaux de 50 m3/h via filtration sur **résines échangeuses d'ions**. Cette technique couramment utilisée dans le traitement d'eau pour capter des ions en excès, a été utilisée pour fixer l'ion perchlorate à la place de l'ion chlorure. Ces résines, non régénérables, ont pu être éliminées par incinération une fois saturées.

TRAITEMENT DU PERCHLORATE SUR RESINES ECHANGEUSES D'IONS

Le traitement sur résine échangeuse d'ions est un procédé fiable et robuste qui confère un abattement des teneurs en perchlorate en sortie de traitement à plus de 99% permettant ainsi un respect des seuils de rejet autorisé. Ce processus reste néanmoins très coûteux, notamment en lien avec la consommation importante de résines.

Compte tenu de l'évolution des teneurs en perchlorate en entrée d'unité au cours du temps, et du coût significatif du traitement des perchlorates sur résines, un bilan technico économique a été réalisé par SUEZ REMEDIATION afin de trouver le meilleur compromis (efficacité VS prix). Les résines testées sont les suivantes :

- Résines fournisseur 1 : X et Y
- Résines fournisseur 2 : Z

La figure 2 présente le taux de captation des résines (g/l) en fonction des teneurs en perchlorate (mg/l) sur la base des données fournisseurs et du retour d'expérience opérationnel.

En couplant la performance au coût de mise en œuvre et d'exploitation, une résine a été privilégiée (résine économique, dont le taux de chargement en perchlorate reste en dessous de la classification pyrotechnique).

En six ans d'exploitation, au niveau de l'unité de traitement des eaux souterraines, ce sont :

- **Plus d'1 million de m³ d'eau souterraine pompée qui ont été traités**
- **4,5 T de perchlorates qui ont été captées et éliminées**
- **Un rendement de filtration des perchlorates sur résines de 99,6 %**
- **Le respect accru des seuils de rejet (99,3% de rejets conformes)**

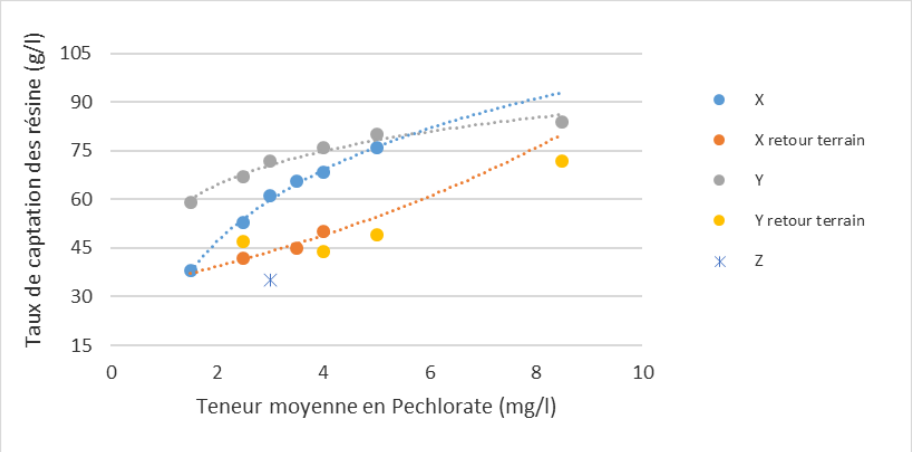


Figure 2 : Taux de captation des résines

TRAITEMENT DU PERCHLORATE PAR FILTRATION SUR BIOFILTRE PLANTE DE ROSEAUX

Afin de disposer d'une alternative au traitement sur résine, un pilote de traitement via un biofiltre planté de roseaux a été réalisé en 2014/2015. La faisabilité du procédé a préalablement été validé via un essai en laboratoire réalisé par SUEZ REMEDIATION.

Principe

Le biofiltre se compose d'un support bactérien granulaire minéral saturé en eau dans lequel circule l'eau à traiter issue du pompage en nappe. L'eau est enrichie en carbone pour permettre la consommation de l'oxygène dissous dans l'eau puis le passage en anoxie, condition d'environnement favorable à la biodégradation des nitrates et des perchlorates. Les substrats carbonés nécessaires à la biodégradation sont apportés sous forme solide ou sous forme liquide. En sortie de biofiltre, les eaux sont réinjectées en nappe.

Objectifs du pilote

L'essai pilote de terrain avait pour objectif de confirmer la faisabilité du traitement avec les eaux du site, et de vérifier les principaux paramètres de dimensionnement : temps de dégradation du perchlorate, hydraulique du procédé, typologie, qualité et quantité de substrat carboné à apporter au milieu, qualité des eaux en sortie de procédé (teneur en perchlorate, concentration résiduelle en substrat carboné, présence de sous-produits de dégradation).

L'essai a été suivi mensuellement sur le terrain et en laboratoire, avec réalisation de mesures physico-chimiques et analyses du perchlorate, COT (Figures 3 et 4)

Résultats obtenus

- Temps de séjour des eaux dans le biofiltre de quelques heures
- Teneurs en perchlorates en entrée de process (environ 10 mg/L en moyenne)
- Performance étroitement liée aux apports en carbone

A l'issue du pilote, ce traitement - bien qu'efficace - n'a pas été retenu dans la zone concernée pour les raisons suivantes :

- Débits importants et seuils de rejets très bas non compatibles avec le procédé
- Au niveau des zones sources : traitement biologique in-situ retenu

Biofiltre plante de roseaux

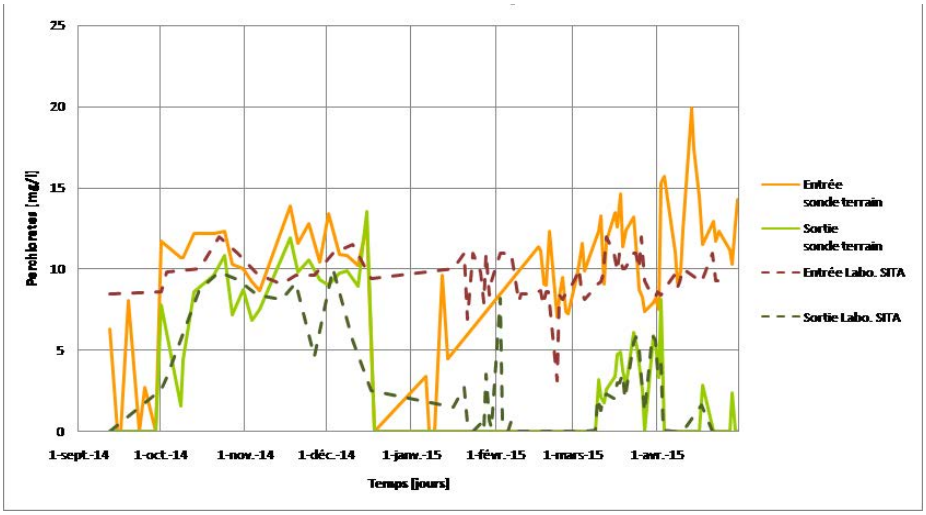


Figure 3 : Suivi des teneurs en Perchlorate

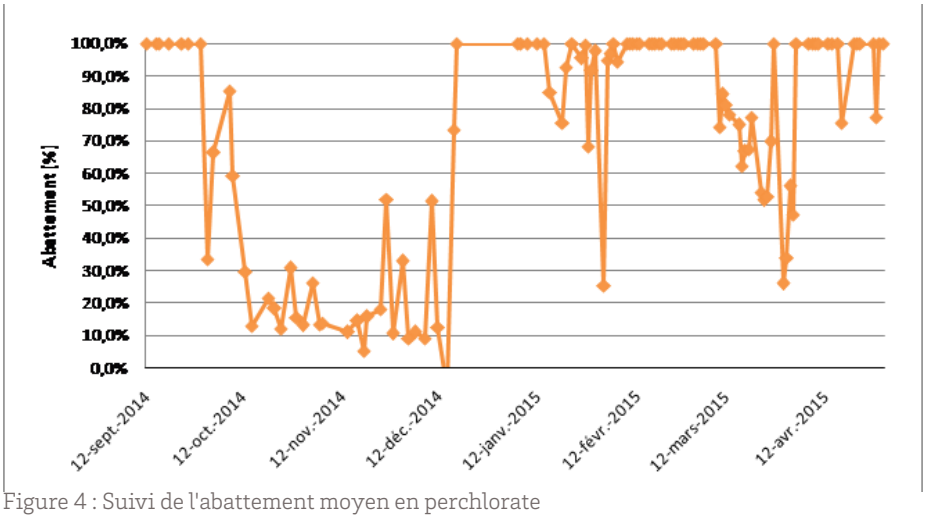


Figure 4 : Suivi de l'abattement moyen en perchlorate

TRAITEMENT DU PERCHLORATE PAR TRAITEMENT BIOLOGIQUE EN ANOXIE IN-SITU (Bionappe®)

Les deux principales zones sources ciblées pour le traitement Bionappe® se situent le long d'un réseau pluvial ayant collecté du perchlorate et en aval des zones de production.

La mise en œuvre du traitement a préalablement été validée par un pilote terrain avant d'être déployée pour le traitement in-situ des zones sources.

Principe

Le traitement biologique en anoxie in-situ Bionappe® consiste en l'ajout d'une source carbonée directement dans le milieu eaux souterraines, visant au développement de micro-organismes spécifiques, qui utiliseront le perchlorate comme accepteur final d'électrons. (Figure 5)

La rémanence de la source carbonée dans le milieu, la présence de microorganismes adaptés dans le sol et leur capacité à mobiliser le carbone comme source primaire de leur métabolisme sont des paramètres essentiels à la réussite du traitement.

Dimensionnement mis en œuvre

Sur la base des données acquises, une approche par front a été privilégiée.

Front 1 à 3 ➡ traitement de la source le long du réseau EP

• 30 injecteurs doubles niveaux implantés dans le premier aquifère et répartis sur 3 fronts disposés en cascade perpendiculairement au sens d'écoulement

Front 4 ➡ traitement de la source en aval des zones de production

• 21 injecteurs simples implantés dans le premier aquifère + 2 injecteurs simples implantés dans l'aquifère sous-jacent

Front 5 ➡ traitement de la source en aval des zones de production

• 17 injecteurs simples implantés dans le premier aquifère + 15 injecteurs simples implantés dans l'aquifère sous-jacent (Figure 6)

4 années de traitement

25 campagnes d'injections et de monitoring sur 45 piézomètres de surveillance

130 m³ de mélasse de canne, 20 m³ de micro-émulsion d'huile végétale consommées

Monitoring du COT comme indicateur biologique (rapidement consommé)

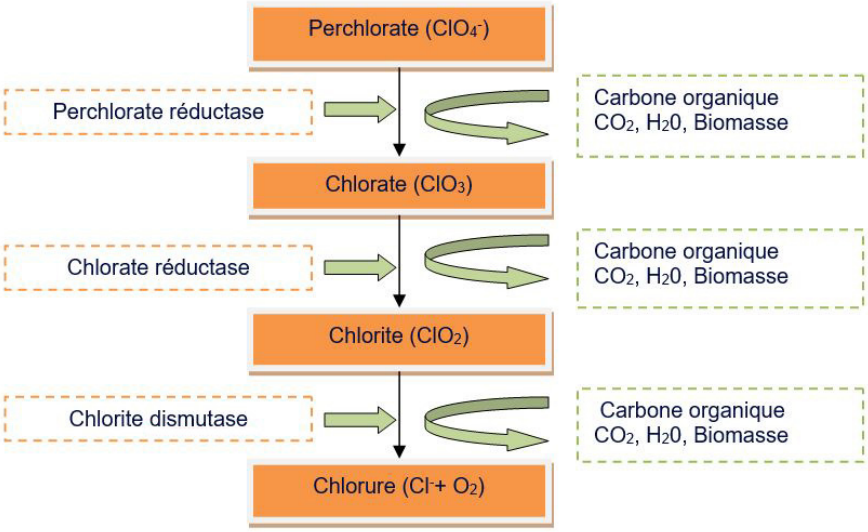


Figure 5 : Chaine de dégradation du perchlorate

Résultats obtenus

Les fronts de traitement biologique ont montré une efficacité supérieure à 90 %, avec des concentrations résiduelles nettement réduites (< 100 µg/l en aval des bioréacteurs, comparables à celles autorisées pour les rejets dans le milieu naturel).

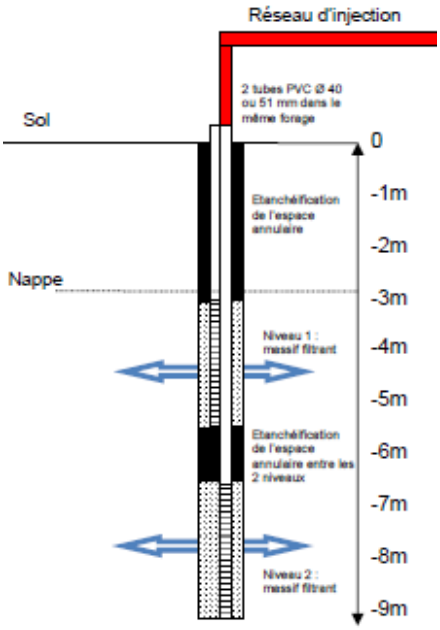


Figure 6 : Schéma d'un injecteur

SYNTHESE DE LA REHABILITATION

L'atténuation des impacts en zones sources a sécurisé la maitrise des transferts vers les récepteurs sensibles en aval, acquise dès les premiers mois de confinement hydraulique (respect des objectifs quantitatifs de protection des cibles : réduction de la contribution en perchlorate dans les eaux superficielles à moins de 1 µg/l, et dans le captage AEP à moins de 4 µg/l, conformément à l'Arrêté de prescription).

Ces résultats ont permis la mise à l'arrêt de l'ensemble des traitements du perchlorate sur le site (notamment la barrière hydraulique) et la pérennité de la remise en exploitation du captage AEP. Un suivi post traitement est en cours.

Camille LORANT (SUEZ REMEDIATION)
Baptiste GRAPTON (ANTEA GROUP)