

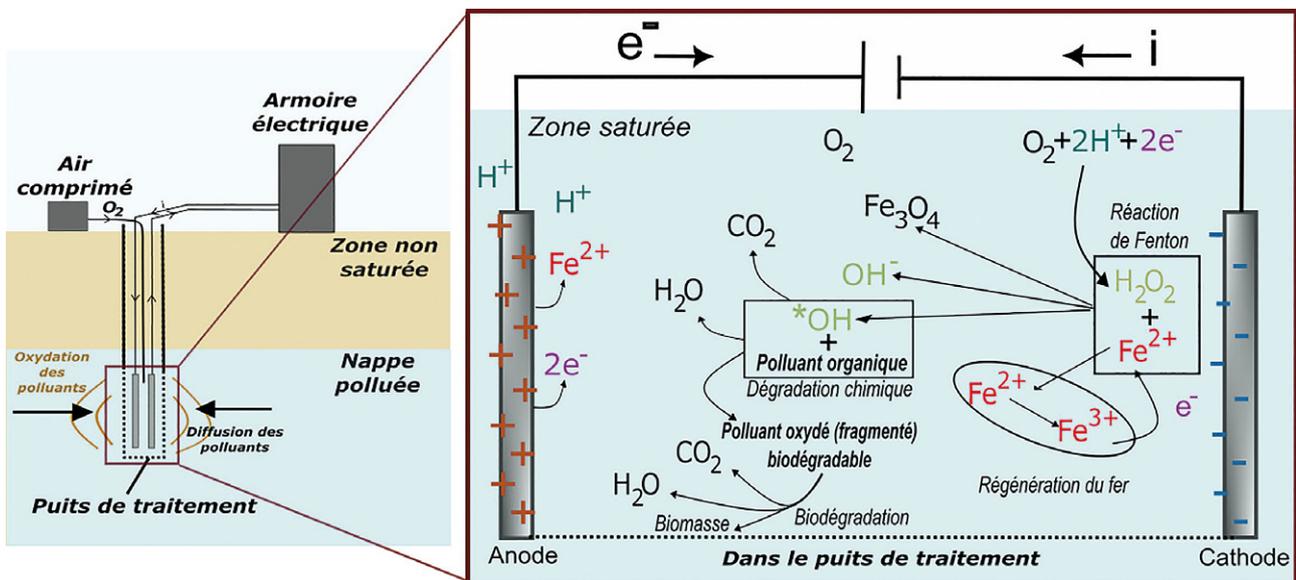
ELECTROREMEDIATION FENTON OPTIMISÉE

TRAITEMENT DES NAPPES PAR ÉLECTROCHIMIE

DESCRIPTION DU PRINCIPE DE LA TECHNIQUE

La technique d'électroremédiation fenton optimisée (EFO) est une technique de **dépollution *in situ* des eaux souterraines par une oxydation chimique optimisée** qui couple l'électrochimie et la réaction de Fenton dans la zone saturée [1]. Elle repose sur l'utilisation, dans un même puits, d'une anode de fer et d'une cathode. Ce réacteur électrochimique est capable de produire *in situ* des radicaux hydroxyles $\bullet\text{OH}$. Ces radicaux hydroxyles sont

des oxydants très puissants ce qui leur permet de **dégrader chimiquement la plupart des composés organiques dont les organohalogénés jusqu'à leur minéralisation totale** (décomposition en CO_2 et H_2O ainsi que, selon les polluants dégradés, N, Cl, ...). Le fer est un catalyseur de la réaction : le Fe^{3+} obtenu par la réaction de Fenton réagit au niveau de la cathode pour régénérer le Fe^{2+} .



Principe de fonctionnement d'une unité d'EFO

© BRGM

Contrairement aux méthodes de dépollution classiques reposant sur la réaction de Fenton et optimales à $\text{pH} = 3$ en raison de la plus forte solubilité du Fe^{3+} dans l'eau à pH acide, l'EFO produit directement des ions par corrosion électrique des électrodes de fer, et peut donc être utilisée quels que soient le pH et la teneur en fer de l'eau à traiter. De même, l'injection d'air comprimé en permanence dans les puits de traitement permet de maintenir les conditions aérobies nécessaires au bon déroulement de la réaction de Fenton quelle que soit la teneur initiale de l'eau en oxygène.

La puissance fournie par l'EFO est faible (200 à 300 W au maximum) ce qui est insuffisant pour échauffer un aquifère. Par comparaison, les puissances utilisées en désorption thermique *in situ* sont de l'ordre de 500 kW à 1 MW. De plus, aucun courant n'est induit dans l'aquifère à l'extérieur d'un puits de traitement puisque chaque puits comporte sa propre anode et cathode. La tension et l'intensité électriques appliquées aux électrodes de fer et au réacteur de production d' H_2O_2 sont adaptées au cas par cas, en temps réel, pour moduler les différentes réactions en fonction de l'objectif à atteindre (temps de dépollution souhaité). Cette modularité sur la quantité d'oxydant produit *in situ* dans la nappe permet de limiter l'impact de l'EFO sur les microorganismes. Ainsi, l'injection d'oxygène et la fragmentation des polluants, même

réfractaires, liées à la technique peut offrir des conditions favorables au biotraitement des concentrations résiduelles si des microorganismes capables de biodégrader les polluants sont présents dans le milieu.

Utilisation d'un module optionnel dit électrokinétique

Utilisation d'un module optionnel dit « électrokinétique » qui, en appliquant un potentiel électrique entre deux puits, permet une **migration des substances chargées électriquement vers un puits d'extraction comme les métaux en solution pour les extraire du milieu par pompage**. Un courant électrique est induit dans l'aquifère par l'EFO en dehors des puits de traitement uniquement si ce module est activé. En plus des radicaux $\bullet\text{OH}$ très puissants, de la magnétite (Fe_3O_4) ayant également des effets oxydants est également produite au niveau des électrodes de fer et peut, grâce au potentiel électrique, être mobilisée à contre-courant du sens d'écoulement de la nappe pour le traitement des panaches de pollution.

Dans le cas d'un objectif d'abattement rapide des concentrations en polluants, les concentrations en oxydant peuvent donc être maximisées par le module d'électrokinétique, avec potentiellement plus d'impact sur les microorganismes présents.

EFO, ELECTROREMÉDIATION FENTON OPTIMISÉE

CONTEXTE D'UTILISATION

La technique EFO est utilisable *in situ* pour la dépollution des **nappes** (zones sources ou panaches de pollution), uniquement en **zone saturée, sans limite de profondeur** et quel que soit le niveau piézométrique.

Bien qu'utilisable dans des contextes variés de sites pollués, elle est particulièrement **adaptée sur des pollutions d'aquifères sensibles en zones alluvionnaires** (aquifères perméables), par exemple en cas de pollution accidentelle dans des périmètres de protection de captages d'alimentation en eau potable, car elle ne nécessite l'injection d'aucun produit chimique dans la nappe et les seuls résidus après traitement sont des oxydes de fer.

Des rayons d'action maximums de l'ordre de 15 m sont mesurés (sous l'effet de la dilution, l'advection, et la diffusion chimique des polluants depuis les zones les plus concentrées vers les zones traitées moins concentrées) pour une nappe alluvionnaire de perméabilité moyenne ($> 10^{-6}$ m/s). Ce rayon d'action des puits et donc le nombre de réacteurs (nombre de puits) pour la dépollution dépend de la nature de l'aquifère (perméabilité, milieux fragmentés) et de l'ampérage utilisé mais peut être optimisé par le module électrokinétique. De manière générale, moins l'aquifère est perméable, moins le rayon d'action est important et plus le temps de traitement est long, ce qui implique un ampérage et un nombre de puits nécessaires plus importants. La technique est donc peu adaptée aux milieux argileux, peu perméables, d'autant plus

que certains polluants peuvent rester immobilisés dans les feuillets d'argiles inaccessibles aux radicaux hydroxyles.

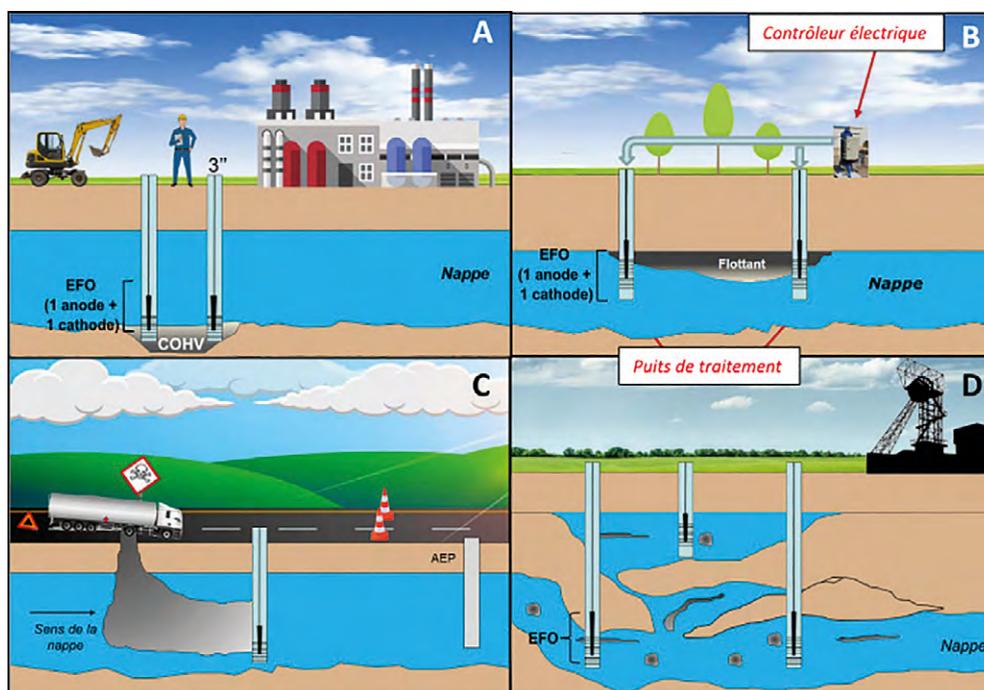
La **présence de structures métalliques enterrées** doit être déterminée préalablement à l'utilisation du module électrokinétique car l'ensemble des pièces métalliques risquent de subir une corrosion liée au passage du courant. En cas de pertes ou de courants vagabonds liés à la présence de structures métalliques non documentées (fondations de bâtiment, capteurs, alarmes, ...), le module d'électrokinétique se déconnecte automatiquement (disjoncteur différentiel).

Cette technique ne peut être utilisée dans des puits métalliques.

Enfin, la présence d'électricité sur site (220V, 16A) ou d'une alimentation par un groupe électrogène, des panneaux solaires ou des batteries est nécessaire.

À quelle étape ?

Évaluée dans le cadre du **plan de gestion** et du **plan de conception des travaux** (PCT), l'EFO est utilisée à l'étape de dépollution. Elle nécessite une bonne connaissance hydrogéologique du site (type d'aquifère ; taille, emplacement du panache/de la source), des essais de traitabilité et une phase **pilote sur site** pour déterminer la cinétique de dégradation des polluants ou de migration pour les ETM.



Différents contextes d'applications de la technique : A) application aux solvants chlorés, B) aux HCT, C) en situation post-accident en complément d'une barrière hydraulique, D) en zone saturée complexe.

POLLUANTS CONCERNÉS

La technique est utilisable pour tous les **polluants organiques en phase dissoute et en phase pure (LNAPL/DNAPL)** et pour l'ensemble des **polluants sous forme ionisée**. Elle a été validée pour le traitement des HCT, COHV, BTEX,

HAP (minéralisation totale) et des ETM (migration via l'électrokinétique vers un puits de pompage) et des tests sont en cours pour une application à des polluants spécifiques tels que les PCB ou les PFAS.

MATÉRIEL NÉCESSAIRE

Le matériel déployé se compose :

- D'une **armoie électrique** (220V, 16A) et, en l'absence de branchement électrique, d'un groupe électrogène, de batteries, ou de panneaux solaires ;
- D'une production d'**air comprimé** (apport d'oxygène) basse pression pour une bonne homogénéisation dans les puits et l'évacuation des faibles quantités d' H_2 produites au niveau des électrodes ;
- De **réacteurs de production d' H_2O_2** (cathode) ;
- D'électrodes de **production de Fe^{2+}** (anode, barres de fer simple) pour assurer la présence de fer pour la réaction de Fenton et pour l'utilisation du module électrokinétique (consommable). Les électrodes ont une durée de vie qui dépend de l'intensité du courant mise en œuvre (rapidité du traitement). Pour un traitement de COHV sur une nappe très calcaire, la durée de vie des électrodes est supérieure à 5 ans.

Cette technique s'utilise directement dans des **piézomètres** standards non métalliques ; des piézomètres de 3 pouces ou plus sont idéaux. Les piézomètres réalisés sur site lors des étapes préalables de diagnostics peuvent être utilisés, du moment que la position des crépines soit adaptée aux profondeurs visées et que leur diamètre soit suffisant pour

recueillir le réacteur de production d' H_2O_2 , les électrodes de fer ainsi que l'alimentation constante en air comprimé.

Afin de pouvoir suivre la dépollution, des prélèvements classiques d'eau souterraine sont régulièrement réalisés à l'aide d'une **pompe** dans les piézomètres en aval avant d'être envoyés au laboratoire pour analyse.



Armoie électrique

2 électrodes/piuits

Matériel nécessaire au déploiement de la technique

© SEMACO Environnement

MÉTHODOLOGIE

Caractérisation préalable et essais de traitabilité

Une étude hydrogéologique précise et le diagnostic du site doivent avoir été menés en amont afin d'évaluer l'emplacement, la taille, la profondeur de la source ou du panache à traiter et ainsi pouvoir déterminer le nombre et la position des puits/unités de traitement.

La première étape consiste à vérifier la **traitabilité des polluants en batch** pour connaître leur potentiel et leur cinétique de dégradation par oxydation. Ces tests sont réalisés sur des volumes de 60 à 1 000 L d'eau prélevée du site. Ces tests de dégradabilité sont réalisés sur 12 à 72 heures. Des analyses chimiques permettent de valider la minéralisation complète (suivi des produits de dégradation des polluants).

Essais de faisabilité par pompage différentiel

Un **essai pilote in situ** est réalisé par pompage différentiel entre un puits de traitement et un piézomètre de contrôle en aval immédiat. Cet essai permet de déterminer le rayon d'action du puits et de paramétrer les tensions et ampérages optimaux pour l'électro-oxydation dans les conditions du site. En cas d'activation du module électrokinétique, cette optimisation permet de limiter au mieux les impacts potentiels sur la biodiversité du milieu. Durant cet essai pilote, des analyses chimiques sont réalisées sur des échantillons d'eau prélevés toutes les 10-20 minutes dans le piézomètre de contrôle. En cas de présence trop importante de polluants ou de produits de dégradation, la quantité d'oxydant produit peut être augmentée en jouant sur les tensions et l'ampérage électriques.

Phases de traitement

Si les essais pilotes sont concluants, les **puits de traitements** supplémentaires à celui du pilote sont positionnés de manière pertinente selon l'étude hydrogéologique préalable et la position de la source.

Le suivi du traitement par des prélèvements d'eau classiques et des analyses permet d'évaluer l'évolution de la composition chimique (polluants et produits de dégradation) de la nappe traitée. En complément des analyses chimiques, il est possible de mesurer la DCO (demande chimique en oxygène), le COT (carbone organique total) ou le suivi de l'évolution des ions minéraux formés pour suivre la minéralisation du polluant.

En fonction du résultat des analyses, le traitement est poursuivi ou non, en adaptant si besoin la tension et l'ampérage des électrodes.

Le temps de traitement varie selon la perméabilité de l'aquifère, la taille de la source ou du panache à traiter, le nombre d'unités de traitement, le type de polluant et l'ampérage sélectionné. Lorsque le suivi par analyses chimiques montre que les objectifs de traitement sont atteints, le traitement prend fin. Les rendements (pourcentage de la pollution initiale qui a été totalement minéralisée) peuvent atteindre 98 %.

Points de vigilance :

- La présence de structures métalliques enterrées doit être prise en compte lors du traitement pour éviter d'éventuelles dégradations ;
- Les battements de nappe importants doivent être anticipés de manière à ce que les électrodes soient en permanence immergées ;
- En cas d'eaux souterraines très calcaires, des quantités variables de dépôts peuvent apparaître sur les électrodes. Cet encrassement est détectable par le suivi des variations de tensions et d'ampérage et peut être facilement résorbé par trempage des électrodes dans de l'acide chlorhydrique dilué à 20 % (concentration utilisée couramment par le public pour l'adaptation du pH des piscines).

AVANTAGES – INCONVÉNIENTS – MATURITÉ DE LA TECHNIQUE

AVANTAGES

Polluant

- Efficace sur de nombreux polluants,

Milieu

- Traitement *in situ*,
- Technique adaptée au traitement des aquifères à enjeux,

Mise en œuvre

- Technique simple, robuste, sans limite de profondeur,
- Paramètres de la réaction pilotables à distance,
- Pas d'utilisation de produits chimiques,
- Utilisable sur les sites en activité,
- Coût énergétique faible,
- Déplacement facile des électrodes si évolution de la connaissance de la source et/ou du panache,

Résultats

- Durée de dépollution faible,
- Rendements épuratoires élevés,
- Intensité modulable en fonction des objectifs visés.

INCONVÉNIENTS

Milieu

- Applicable uniquement en zone saturée,
- Formation d'eau ferrugineuse (très peu de fer libéré),
- Non adapté aux milieux argileux ou peu perméables,

Mise en œuvre

- Risque de corrosion des structures métalliques enterrées en cas de traitement des ETM par électrokinétique,
- Durée de vie des électrodes liée à l'ampérage appliqué et à la cinétique de dégradation,
- Électrodes fragiles (à manipuler avec précaution),
- Nombre de puits potentiellement important,
- Nombre limité de prestataires avec ce savoir-faire.

MATURITÉ DE LA TECHNIQUE



L'EFO repose sur le procédé d'Electro-Fenton connu et utilisé depuis plus de 40 ans, mais optimisé pour en maximiser les effets tout en limitant les impacts sur les microorganismes (hors module d'électrokinétique).

DÉLAIS DE MISE EN ŒUVRE

Des mesures géophysiques pour détecter la présence de structures métalliques et une caractérisation hydrogéologique sont à prévoir en amont. Il faut compter, selon les polluants et les conditions du site, une demi-journée pour la mise en place et le repli si les puits sont déjà existants, 12 à 72 heures pour les essais de traitabilité, 24 à 96 heures pour la

réalisation de l'essai pilote et 24 heures à une semaine pour les phases de traitement. Ces phases de traitement peuvent être interrompues en attendant le résultat des analyses chimiques (jusqu'à 1 semaine). Enfin, le faible nombre de prestataires peut ajouter une contrainte temporelle.

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 sont fonction du nombre de puits à équiper (de 2 à plus de 8 selon les contextes). Il faut compter 100 000 € environ pour l'achat ou 10 000 €/mois pour la location de l'ensemble du matériel. L'étude hydrogéologique, la mise

en place de piézomètres et la mise en œuvre des essais de traitement ne doivent pas être oubliées dans les coûts si elles n'ont pas déjà été réalisées.

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] *Traitement des micropolluants organiques dans l'eau par des procédés d'oxydation avancée - L'actualité chimique n° 277-278 - Août-septembre 2004 – page 57*
- [2] *Conférence Intersol - Test de traitabilité de plusieurs polluants persistants (POP) par électro oxydation : essais comparatifs sur diverses familles de composés (PFas, OCHV, PCB) - 2021*
- [3] *Application de l'EBR (Electro-Bio-Remédiation). Protocole de mise en œuvre de tests de traitabilité sur site. Conférence INTERSOL 2022 Philippe Oudin et Hugo Carronier.*
- [4] *EBR as an Advanced Environmental Technology Incorporating Various New Electrochemical Methods Underlying New Frontiers in Groundwater Remediation - Conference Contaminated sites Management in Europe - 2018*
- [5] *Procédés d'oxydation avancée dans le traitement des eaux et des effluents industriels : Application à la dégradation des polluants réfractaires - Revue des Sciences de l'Eau - 2009*