

Code de Bonne Pratique 5

Traitement in situ des pollutions de l'eau souterraine par les solvants chlorés à l'aide de barrières réactives de fer

Bruxelles Environnement

Contenu

1.	Introduction.....	3
2.	Description de la technique et des principes technologiques mis en œuvre.....	5
2.1.	Principes généraux du fonctionnement du Fe^0	5
2.2.	Composés susceptibles d'être décomposés en présence de Fer zéro-valent.....	6
2.3.	Aspects cinétiques.....	7
2.4.	Les différents dispositifs de traitement in situ par passage au travers de barrières réactives de Fe^0	8
3.	Description des variantes	9
4.	Objectifs poursuivis : panache versus noyau.....	10
5.	Polluants et situations les plus favorables (notions qualitatives).....	11
6.	Examen a priori de la faisabilité technique	12
6.1.	Caractéristiques limites du sol à traiter.....	12
6.1.1.	Caractéristiques physiques du sol.....	12
6.1.2.	Propriétés physico-chimiques de l'eau souterraine.....	12
6.2.	Caractéristiques limites du site à assainir ou gérer	12
7.	Examen spécifique de la faisabilité du traitement	13
7.1.	Paramètres du polluant, du sol et du site à mesurer	13
7.2.	Nécessité d'essais préalables au laboratoire.....	15
7.2.1.	Première étape : tests en batch.....	15
7.2.2.	Deuxième étape : tests en colonne.....	16
7.3.	Nécessité d'un test pilote.....	20
8.	Description d'une installation type.....	21
8.1.	Barrière continue.....	21
8.2.	Système Funnel & Gate.....	22
8.3.	Dispositif à capsule de traitement.....	22
9.	Descriptif de l'installation qui sera mise en place.....	23
10.	Limitation des incidences du projet sur l'environnement : odeurs, bruits, poussières, etc.	25
10.1.	Points à prendre en compte.....	25
10.2.	Risques liés à la perturbation du mode de circulation de l'eau souterraine.....	25
10.3.	Risque de libération de polluants métalliques à partir de la barrière de fer et risques liés à l'augmentation du pH de l'eau souterraine	25
10.4.	Risques pour les installations de captage voisines	25
10.5.	Risques pour la stabilité des bâtiments et des ouvrages présents à proximité du chantier de mise en place du dispositif	26
10.6.	Conformités aux cadres légaux existants	26
11.	Supervision du traitement	27
11.1.	Objectifs de la supervision.....	27
11.2.	Mesures de surveillance : dispositif type.....	27
11.2.1.	Barrière continue	28
11.2.2.	Dispositif « Funnel & Gate »	29
11.2.3.	Dispositif Barrière active équipée d'une ou de plusieurs capsules	31
11.2.4.	Remarque générale.....	32
11.3.	Mesures de supervision : paramètres de supervision du traitement et fréquences	33
12.	Rapportage, optimisation et mesures correctives	36
12.1.	Rapportage.....	36
12.2.	Mesures correctives et optimisation.....	37
12.2.1.	Diminution progressive de la conductivité hydraulique de la barrière perméable	37
12.2.2.	Bypass de la barrière active par une partie du panache de pollution	37
13.	Mesures de validation et schéma décisionnel arrêt-prolongation du traitement	38
14.	Monitoring à long terme éventuel : dispositif et type de mesures	40
15.	Recommandation en matière de santé, sécurité et organisation	42
15.1.	Check-list succincte pour les entrepreneurs	42
15.2.	Check-list succincte pour les experts en pollution du sol.....	42
16.	Sources bibliographiques	45

1. Introduction

La technique d'intervention s'intitule « Traitement in situ des pollutions de l'eau souterraine par les solvants chlorés à l'aide de barrières réactives de Fe^0 ».

Par solvants chlorés on entend les composés organiques aliphatiques chlorés volatils :

- Ethènes substitués : Tétrachloroéthène(PCE), trichloroéthène (TCE), dichloroéthènes (DCE dont les isomères cis, trans, et 1,1), le chlorure de vinyle (VC) ;
- Les éthanes substitués : trichloroéthane(TCA), dichloroéthane (DCA, dont les isomères 1,1 et 1,2), le chloroéthane (CA) ;
- Les méthanes substitués : tétrachlorométhane (CT ou tétrachlorure de carbone), trichlorométhane (CF ou chloroforme), dichlorométhane (DCM) et chlorométhane (MC).

Elle vise la prise en charge in situ d'une pollution de l'eau souterraine par le passage de celle-ci au travers d'une barrière réactive contenant des granules de fer à l'étage d'oxydation 0. Ces granules peuvent contenir soit du fer seul ou être de type bi-métallique (Fe^0/Ni^0 ou Fe^0/Pd^0 , Fe^0/Cu^0) ou encore être composées de fer accompagné de catalyseurs métalliques. Des matériaux réactifs composés de Fe^0 accompagnés de composés réducteurs (Na_2S , FeS , FeS_2) sont également utilisés.

Les barrières actives sont conçues de sorte qu'à leur sortie, les solvants chlorés ont été transformés en ions Cl^- et en composés aliphatiques non substitués (éthène, éthane et méthane) naturellement présents dans les sols, facilement dégradables et peu toxiques pour la santé.

Cette méthode de traitement in situ présente les avantages suivants :

- Faible niveau de coût de fonctionnement et d'entretien : l'entraînement de l'eau souterraine au travers de la barrière réactive utilise exclusivement le gradient hydraulique naturellement présent dans les couches aquifères ;
- Une vitesse de dégradation accélérée par comparaison avec l'atténuation naturelle (stimulée ou non) ;
- Un coût de prise en charge réduit par comparaison avec les autres méthodes de traitement (oxydation chimique, sparging + sve, pump and treat, ...) ;
- Peu d'encombrement du site traité étant donné que toutes les infrastructures de prise en charge sont souterraines ;
- Les volumes de sol et d'eau souterraine à déplacer pour l'établissement de l'infrastructure de prise en charge sont limités.

Les limitations de cette technique sont les suivantes :

- La durée de vie d'une barrière active en Fe^0 n'est pas encore totalement connue vu l'aspect récent de cette technique et le manque de retour d'expérience de longue durée ;
- La mise en œuvre de cette technique exige une bonne connaissance du site à traiter (composition du sol et hydrogéologie) ;
- La supervision du traitement durant de nombreuses années est nécessaire ;
- Les contaminations profondes sont malaisées à traiter et leur prise en charge selon cette technique entraîne des coûts prohibitifs.

Les solvants chlorés sont en général peu solubles dans l'eau et lorsque présents à de fortes teneurs, ils forment une phase libre. Compte tenu de la densité élevée de ces composés, cette phase libre est de type plongeant (DNAPL) s'enfonçant dans les couches de sol (saturées ou non) et rampant sur le toit des couches imperméables. Ces phases libres se dissolvant lentement dans les eaux



souterraines constituent des sources secondaires persistantes de composés chlorés en direction de l'eau souterraine.

L'élimination de ces phases libres (par excavation, extraction des vapeurs du sol, ...) s'impose donc comme un préalable nécessaire à une opération de traitement de la contamination de l'eau souterraine. Cette étape préliminaire peut cependant s'avérer malaisée compte tenu des difficultés rencontrées pour localiser et éradiquer ces phases de produit pur.

Remarque

L'ordonnance du 5 mars 2009 relative à la gestion et à l'assainissement des sols pollués et ses arrêtés d'exécutions stipulent dans plusieurs articles le respect des codes de bonnes pratiques. En ce qui concerne les codes de bonnes pratiques relatifs au traitement, l'expert en pollution du sol agréé peut, dans certains cas, par exemple sur proposition de l'entrepreneur en assainissement, déroger aux dispositions reprises dans les codes de bonnes pratiques, moyennant une argumentation dûment fondée. Dans ce cas, Bruxelles Environnement se réserve à tout moment le droit de demander des informations complémentaires ou de demander des investigations de terrains supplémentaires, sur base des dispositions reprises dans les codes de bonne pratique, s'il le juge nécessaire et pertinent.

Nous précisons que ce code est d'application pour tous travaux impliquant un traitement par assainissement ou par gestion de risque, y compris les traitements de minime importance, les traitements de durée limitée, les mesures de suivi et les mesures d'urgence .

2. Description de la technique et des principes technologiques mis en œuvre

2.1. Principes généraux du fonctionnement du Fe^0

Il reste de nombreuses questions concernant le mode exact de fonctionnement de la déchloration réductrice des solvants chlorés dans l'eau souterraine en présence de fer zéro valent. Ce mécanisme implique un certain nombre de réactions d'oxydo-réduction, parmi lesquelles, les plus connues sont les suivantes :

- En conditions aérobies, l'oxygène dissous réagit rapidement avec le fer, lequel rouille ou forme de l'hydroxyde ferreux :

$$2 \text{Fe}^0 + \text{O}_2 + 2 \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2 \text{Fe}^{2+} + 4 \text{OH}^-$$
- En conditions anaérobies, le fer est corrodé en présence d'eau avec formation d'hydrogène selon la réaction suivante :

$$\text{Fe}^0 + 2 \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + \text{H}_2 + 2 \text{OH}^-$$

Dans ces deux types de situation, la corrosion du fer produit des ions hydroxydes, ce qui entraîne une augmentation du pH de l'eau souterraine.

En présence de fer zéro valent, les composés organochlorés dans l'eau souterraine peuvent être déchlorés de manière abiotique, selon certaines conditions, suivant différents mécanismes décrits dans la **Figure 1**.

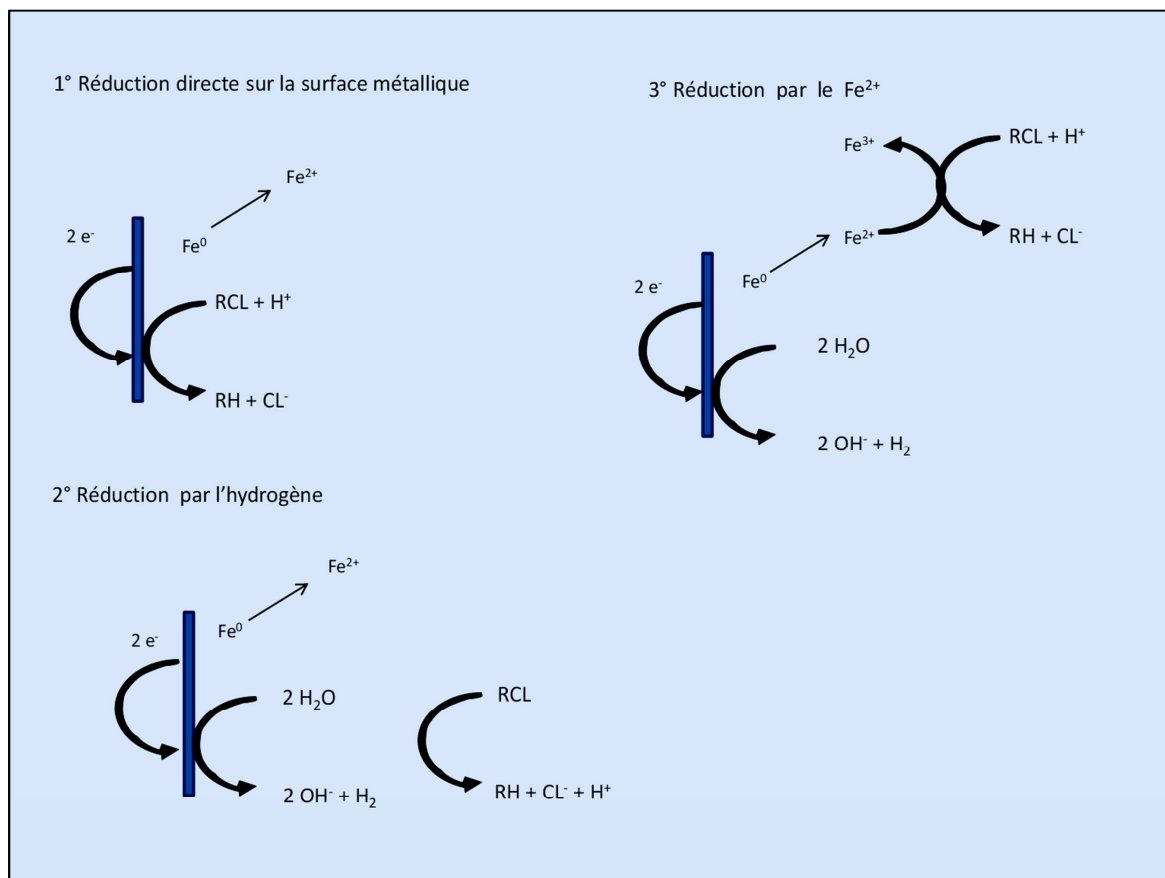
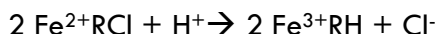


Figure 1 : Mécanismes de réactions possibles pour la déchloration réductrice des composés organiques chlorés en présence de fer zéro valent

- Le premier mécanisme : réaction de réduction des composés chlorés en contact avec la surface métallique de Fe^0 par suite du transfert d'électrons à partir de celle-ci suivant la réaction suivante :

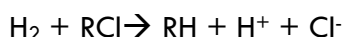


- Un second mécanisme serait l'oxydation du Fe^{2+} en Fe^{3+} avec transfert d'un électron vers le composé chloré selon la réaction suivante :



A noter que le Fe^{2+} est le produit de réaction du premier mécanisme ;

- Dans un troisième mécanisme, l'hydrogène produit par la corrosion du Fe^0 au contact de l'eau est responsable de la déchloration réductrice du composant chloré selon la réaction :



L'importance relative de chacun de ces trois mécanismes dans la déchloration réductrice des solvants chlorés n'est pas encore établie.

2.2. Composés susceptibles d'être décomposés en présence de Fer zéro-valent

Le **Fout! Verwijzingsbron niet gevonden.**reproduit ci-après fournit une liste de composés halogénés dont la dégradation en présence de Fe^0 a été testée. Un composé est signalé comme ne réagissant pas lorsque la déhalogénéation est soit absente, soit très lente.

Tableau 1 : Liste des composés halogénés testés pour leur dégradation en présence de Fe^0

Composé halogéné	Dégradation observée	Dégradation non observée
CT	Oui	
CF	Oui	
DCM		Non
MC		Non
Tribromométhane	Oui	
Hexachloroéthane	Oui	
1,1,2,2-Tétrachloroéthane	Oui	
1,1,1,2-Tétrachloroéthane	Oui	
1,1,1-TCA	Oui	
1,1,2-TCA	Oui	
1,1-DCA	Oui	
1,2-DCA		Non
CA		Non
1,2-Dibromométhane	Oui	
Fréon 113 trichlorotrifluoroéthane	Oui	
Fréon 11 Trichlorofluoroéthane	Oui	
PCE	Oui	
TCE	Oui	
Cis-DCE	Oui	
Trans-DCE	Oui	
1,1-DCE	Oui	
CV	Oui	



1,2,3-Trichloropropane	Oui	
1,2-Dichloropropane	Oui	
1,3-Dichloropropane	Oui	
Hexachlorobutadiène	Oui	

2.3. Aspects cinétiques

Selon les différents tests menés en laboratoire, la déhalogénéation réductrice en présence de Fe^0 suit une cinétique d'ordre 1 comme exprimé par la relation suivante :

$$dC/dt = -kC$$

avec :

C = teneur en polluant dans l'eau souterraine

t = temps

k = constante d'ordre 1 de la dégradation

Cette équation différentielle a comme solution les relations suivantes :

$$C = C_0 e^{-kt}$$

$$\ln(C/C_0) = -kt$$

avec :

C_0 = teneur en polluant initiale ($t = t_0$)

C = teneur en polluant au temps t.

Pour une cinétique d'ordre 1, la demi-vie $t_{1/2}$ se définit comme l'intervalle de temps nécessaire pour réduire de moitié la teneur en polluant initialement présente, elle est égale à :

$$t_{1/2} = 0.693/k$$

Les demi-vies mesurées de manière expérimentale et rapportées dans la littérature pour les différents composés chlorés sont très variables étant donné qu'elles dépendent des paramètres suivants :

- Le pH : une augmentation du pH a comme résultat une diminution de la constante de dégradation k ;
- Une augmentation de la masse de fer disponible (ou de la surface spécifique de cette masse) entraîne une augmentation de la constante k ;
- Un mélange efficace entre l'eau à traiter et la masse de fer entraîne une augmentation de la constante de premier ordre k ;
- La composition chimique de l'eau souterraine : la présence de Cl^- et de $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ augmenterait la réactivité du fer tandis que les ions PO_4^{3-} , SO_4^{2-} et NH_4^+ exerceraient un effet négatif sur la vitesse de dégradation. L'influence de ces paramètres varie selon le type de fer présent. Les espèces ioniques suivantes, NO_3^- , CrO_4^{2-} , SO_4^{2-} et l'oxygène dissous, exercent un effet retardateur sur la dégradation étant donné qu'ils entrent en compétition en qualité d'accepteurs d'électrons ;
- Le type de fer utilisé et la surface spécifique des granules de fer influencent également la vitesse de dégradation.

2.4. Les différents dispositifs de traitement in situ par passage au travers de barrières réactives de Fe⁰

Différents dispositifs de traitement peuvent être mis en place :

- La barrière réactive continue : la barrière réactive abritant le fer est disposée suivant toute la largeur et la puissance du panache de pollution à traiter. La conductivité hydraulique de la barrière est supérieure à celle de la formation aquifère de sorte que l'impact sur la circulation de l'eau souterraine est minimal ;
- Le dispositif « Funnel&Gate » selon lequel des parois imperméables sont mises en place menant l'eau souterraine vers un certain nombre de barrières perméables abritant le fer réactif. Le ratio conseillé entre longueur des parois imperméables et longueur des barrières réactives est de 5/1. Ce dispositif entraîne une perturbation plus importante du mode de circulation de l'eau souterraine. Il est particulièrement indiqué dans le cas de faibles vitesses de circulation de l'eau souterraine et faibles teneurs à traiter ;
- Le dispositif en capsule se distinguant du précédent par la conception de la barrière perméable. Cette dernière abrite une (ou plusieurs) capsule(s) remplie(s) du fer réactif vers où l'eau souterraine est dirigée et circule de manière verticale. Ces capsules peuvent être remplacées après constatation d'une baisse de leur réactivité.

3. Description des variantes

La technique de traitement in situ par barrière réactive est utilisée pour la prise en charge d'un grand nombre de types de pollutions de l'eau souterraine. Le dispositif mis en place au niveau de la barrière réactive peut par exemple consister en :

- Traitement des hydrocarbures par adsorption sur charbon actif, par oxydation chimique ;
- Traitement des métaux lourds par précipitation par augmentation du pH ou par addition de sulfures ;
- Traitement des composés volatiles par injection d'air et extraction des vapeurs (stripping) ;
- Atténuation naturelle stimulée en conditions anaérobies et aérobies ;
- ...

Chacun de ces types de barrières réactives requiert des caractéristiques et des propriétés spécifiques adaptées aux réactions qui y prennent place, de sorte que leur description sort du cadre de ce code. L'objet de ce code se limite en effet à l'utilisation d'une barrière réactive de Fe^0 pour le traitement des composés chlorés.

4. Objectifs poursuivis : panache versus noyau

Le traitement de l'eau souterraine par passage au travers d'une barrière réactive de Fe^0 est principalement orienté vers le traitement du panache de pollution. Même si cette technique permet de traiter des teneurs élevées de polluant sous forme dissoute dans l'eau souterraine (jusqu'à 300.000 $\mu\text{g/l}$, selon le rapport de USEPA, 1998), elle n'est pas adaptée au traitement des polluants présents à de fortes teneurs et adsorbés sur la phase solide du sol ou sous la forme d'une phase libre plongeante (DNAPL) ou piégée dans les pores du sol.

5. Polluants et situations les plus favorables (notions qualitatives)

La technique de traitement de l'eau souterraine par passage au travers d'une barrière réactive de Fe^0 peut être appliquée pour le traitement d'une pollution par les solvants chlorés avec des résultats favorables lorsque les circonstances suivantes sont rencontrées :

- Le composé chloré n'est pas présent au niveau du noyau de pollution sous forme de phase libre peu accessible (DNALP) piégée dans les pores du sol, par exemple. Compte tenu de la faible vitesse de mise en solution de cette phase libre, le temps nécessaire à la dégradation peut s'avérer trop long sans mise en œuvre de techniques complémentaires (excavation du noyau par exemple) ;
- La source de pollution est éradiquée de sorte que l'arrivée du polluant dans le sol est définitivement interrompue ;
- Le composé chloré est dégradable (dans un laps de temps raisonnable) par contact avec une surface de Fe^0 (voir la liste reproduite au tableau 1) ;
- Les caractéristiques hydrogéologiques du site et le mode d'écoulement de l'eau souterraine sont bien connus ;
- La ou les couche(s) aquifère(s) présente(nt) une bonne perméabilité ;
- Le sol est de composition homogène : absence de couches et de lentilles de textures différentes, absence de voies de circulation préférentielles résultant de la présence d'impétrants et d'infrastructures enterrées ;
- La profondeur et la puissance du panache de pollution sont limitées. On considère que l'implantation d'une barrière réactive au-delà de 10 m de profondeur entraîne des coûts prohibitifs (nécessité d'utiliser un matériel plus lourd) ;
- La présence d'une couche imperméable à faible profondeur est considérée comme un avantage. En effet, l'installation de la barrière réactive sur cette couche garantit que le polluant ne migrera pas sous le dispositif de traitement malgré sa densité élevée ;
- La vitesse de circulation de l'eau souterraine dans la couche aquifère n'est pas trop élevée auquel cas la barrière active doit être suffisamment épaisse de manière à garantir un temps de résidence suffisant. Le coût de mise en place de la barrière est, bien évidemment, dépendant de l'épaisseur de la couche réactive de Fe^0 ;
- La composition chimique de l'eau souterraine doit être favorable : teneurs en carbonates limitées ce qui limite le risque d'occlusion de la barrière en résultat de la précipitation de carbonates métalliques, teneurs limitées en espèces chimiques entrant en compétition en qualité d'accepteur d'électrons (NO_3^- , SO_4^{2-} , ...) ;
- L'accessibilité du site à traiter aux machines et à l'équipement pour la mise en place de la barrière active. Une fois mise en place la barrière active n'engendre plus d'encombrement de la surface. Les piézomètres de supervision doivent cependant rester accessibles pour les campagnes de prélèvement réalisées par l'expert. Il doit également être tenu compte de la nécessité de renouveler ou revitaliser la barrière active au terme de 15 à 20 ans de fonctionnement, suite au risque d'occlusion par les précipités ou de passivation de la surface des granulés de fer ;
- Absence dans le sol d'impétrants sensibles susceptibles d'être impactés par l'augmentation du pH et la création de conditions réductrices dans l'eau souterraine par suite du traitement.

6. Examen a priori de la faisabilité technique

6.1. Caractéristiques limites du sol à traiter

6.1.1. Caractéristiques physiques du sol

La composition du sol influence la possibilité de migration des polluants vers la barrière réactive de traitement. Les formations à faible perméabilité : limons et argiles (conductivité hydraulique $< 5 \times 10^{-7}$ m/s) où la vitesse de circulation de l'eau souterraine est, par définition, lente, apparaissent comme peu indiquées pour un traitement in situ par barrière active de Fe^0 .

6.1.2. Propriétés physico-chimiques de l'eau souterraine

Lors du traitement par passage dans une barrière active, le pH de l'eau souterraine augmente de 2 à 3 unités. Il en résulte un risque de formation de précipités au sein de la barrière pouvant causer un colmatage partiel ou la passivation de la surface des granules de fer et, en conséquence, une réduction importante de l'efficacité et la durée de vie de la barrière.

Sur base des caractéristiques physico-chimiques et chimiques mesurées de l'eau souterraine, il est possible de prévoir et de quantifier les quantités de matériaux qui risquent de précipiter suite à l'élévation du pH. A cet effet, les paramètres physico-chimique de l'eau souterraine : pH, Eh, conductivité électrique, O_2 dissous, T° et les paramètres chimiques tels que TOC, DOC, matières en suspension, carbone inorganique dissous (alcalinité), Cl^- , Br^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , NO_2^- , PO_4^{3-} , S^{2-} , Fer total, Manganèse, Ca^{++} , Mg^{++} , Ba^{++} , NH_4^+ , K^+ , Na^+ peuvent être introduits dans un logiciel de simulation géochimique afin d'effectuer ces estimations.

6.2. Caractéristiques limites du site à assainir ou gérer

- Accessibilité du site : le site à prendre en charge doit être accessible à l'équipement et les machines nécessaires à la mise en place de la barrière active. Les piézomètres utilisés pour la supervision du traitement doivent rester accessibles pour les campagnes périodiques de prélèvement à mener par l'expert ;
- Environnement sensible : il n'existe pas sur le site et dans les alentours immédiats des personnes ou des activités susceptibles d'être gênées lors des opérations de mise en place de la barrière réactive : bruit des équipements, odeurs, émissions de vapeurs à partir des matériaux excavés ;
- Encombrement du sous-sol : présence peu importante sur le site ou dans les alentours, d'infrastructures enterrées constituant autant de voies préférentielles pour la circulation eaux souterraines et des polluants : réseau de distribution du gaz, de l'eau, de l'électricité, des fibres optiques, égouttage, etc. ;
- Absence d'infrastructures enterrées sensibles à l'augmentation du pH et la création de conditions réductrices dans l'eau souterraine en résultat du traitement.

7. Examen spécifique de la faisabilité du traitement

7.1. Paramètres du polluant, du sol et du site à mesurer

Les **Tableau 2**,

Tableau 3 et 4 suivants présentent les paramètres qui doivent être mesurés et/ou quantifiés avant le lancement d'un programme de traitement d'un cas de pollution de l'eau souterraine par les solvants chlorés au moyen d'une barrière réactive de Fe⁰. Ces tableaux représentent une check liste des données devant être acquises, soit au cours des phases d'études successives (étude de reconnaissance, étude détaillée, étude de risques) soit lors de la rédaction du projet d'assainissement ou de gestion du risque, ou avant le lancement des tests de laboratoire et du test pilote, avant l'exécution de travaux ne nécessitant pas de projet spécifique. Dans ces tableaux distinction est faite entre deux niveaux d'exigence :

- Paramètres dont la mesure ou l'estimation est requise par défaut ;
- Paramètres dont la mesure ou l'estimation est utile

Tableau 2 : Paramètres des polluants à mesurer avant lancement d'un traitement au moyen d'une barrière réactive de Fe⁰

Paramètres	Moyen de mesure	Commentaire
Source de pollution active ou éradiquée	Etude historique, examen des lieux	Disponible au terme de l'étude de reconnaissance
Teneurs dans le sol		
Teneurs dans le sol : délimitation verticale et horizontale des taches de pollution (contour teneurs > NI et teneurs > NA et > teneurs objectifs)	Forages, prélèvement et analyses d'échantillons de sol et tracé des délimitations (p.ex. krigeage)	Pour chaque polluant dont la présence requiert une intervention. Disponible au terme de l'étude détaillée
Estimation de la charge polluante résiduelle	Sur base des volumes estimés et des teneurs moyennes	Pour chaque polluant dont la présence requiert une intervention. Disponible au terme de l'étude détaillée
Teneurs dans l'eau souterraine		
Teneurs dans l'eau souterraine : délimitation verticale et horizontale des taches de pollution (contour teneurs > NI et teneurs > NA et > teneurs objectifs)	Placement de piézomètres, prélèvement et analyse d'échantillons, tracé des délimitations (p.ex. krigeage)	Pour chaque polluant dont la présence requiert une intervention. Disponible au terme de l'étude détaillée
Estimation de la charge polluante résiduelle	Sur base des volumes estimés et des teneurs moyennes	Pour chaque polluant dont la présence requiert une intervention. Disponible au terme de l'étude détaillée
Facteur de retard	Valeurs du Kd et porosité efficace de l'aquifère	Pour chaque polluant dont la présence requiert une intervention. Disponible au terme de l'étude de risque
Vitesse de migration longitudinale du polluant (progression du panache selon la direction d'écoulement de l'eau souterraine)	Simulation à l'aide de modèles analytiques : équations de Domenico faisant intervenir les coefficients de dispersion longitudinale, latérale et verticale ou utilisation de modèles numériques	Pour chaque polluant dont la présence requiert une intervention. Disponible au terme de l'étude de risque
Vitesse de migration longitudinale avérée du polluant (progression du panache selon la direction d'écoulement de l'eau souterraine)	Campagnes de mesures successives dans le réseau de piézomètres d'observation	
Vitesse de migration latérale dans le sol (extension latérale du panache lors de sa migration)	Simulation à l'aide de modèles analytiques : équations de Domenico faisant intervenir les coefficients de dispersion longitudinale, latérale et vertical utilisation de modèles numériques	Pour chaque polluant dont la présence requiert une intervention. Disponible au terme de l'étude de risque
Vitesse de migration latérale avérée du polluant (extension latérale du panache lors de sa migration)	Campagnes de mesures successives dans le réseau de piézomètres d'observation	
Vitesse de migration verticale dans le sol (extension verticale du panache lors de sa migration)	Simulation à l'aide de modèles analytiques : équations de Domenico faisant intervenir les coefficients de dispersion longitudinale, latérale et verticale ou utilisation de modèles numériques	Pour chaque polluant dont la présence requiert une intervention. Disponible au terme de l'étude de risque
Vitesse de migration verticale avérée du polluant (extension verticale du panache lors de sa migration)	Campagnes de mesures successives dans le réseau de piézomètres d'observation	
Présence d'une phase libre (DNAPL)		
Nature chimique de la phase libre	Prélèvement et analyse d'au moins 3 échantillons de la phase libre piégée ou plongeante	
Extension latérale de la phase libre	Observation de la présence d'une phase libre piégée ou plongeante à partir d'un réseau de piézomètres/sondages - campagnes de mesures à l'aide du système MIP ou de mesures de gaz dans le sol	
Mesure de l'épaisseur de la couche piégée ou plongeante	Mesure de l'épaisseur de la couche piégée ou plongeante dans un réseau de piézomètres/sondages d'observation.	
Estimation du volume de la phase libre	Estimation à partir des mesures d'épaisseur dans les piézomètres/sondages	

Mobilité de la phase libre	Tests de récupération sur site et estimation préalable par calcul ou utilisation de modèles	
Paramètres globaux (toutes phases confondues)		
Estimation de la charge polluante résiduelle	Sur base des volumes estimés et des teneurs moyennes	Pour chaque polluant dont la présence requiert une intervention. Disponible au terme de l'étude de risque

	= paramètres dont la mesure ou l'estimation est requise par défaut
	= paramètres dont la mesure ou l'estimation est utile

Tableau 3 : Paramètres du sol à mesurer avant lancement d'un traitement au moyen d'une barrière réactive de Fe⁰.

Paramètre	Moyen de mesures	Commentaires
Paramètres hydrodynamique du sol		
Stratigraphie du sol : couches(s) aquifères, aquitard, aquicludes, ...	Cartes géologiques et géotechniques, sondages et description des couches de sol	Disponible au terme de l'étude détaillée
Piézométrie de ou des aquifère(s), gradients hydrauliques, vitesse de circulation, sens d'écoulement, caractère confiné ou semi-confiné	Cartes géologiques et géotechniques, sondages et description des couches de sol, placement de piézomètres, mesures piézométriques et calage en altimétrie	Disponible au terme de l'étude détaillée
Puissance de la couche aquifère ou des couches aquifères	Cartes géologiques et géotechniques, sondages et description des couches de sol	Disponible au terme de l'étude détaillée
Variations saisonnières des niveaux piézométriques	Suivi piézométrique lors de campagnes successives	
Caractéristiques de l'eau souterraine		
Paramètres physico-chimiques de l'eau souterraine : pH, Eh, conductivité électrique, O ₂ dissous, T°	Mesure sur le terrain	Disponible au terme de l'étude détaillée
Paramètres chimiques : TOC, DOC, Matières en suspension, Carbone inorganique dissous (alcalinité), Cl ⁻ , Br ⁻ , SO ₄ ²⁻ , NO ₃ ⁻ , NO ₂ ⁻ , PO ₄ ³⁻ , S ²⁻ , Fer total, Manganèse, Ca ⁺⁺ , Mg ⁺⁺ , Ba ⁺⁺ , NH ₄ ⁺ , K ⁺ , Na ⁺	Prélèvements d'échantillons et analyses de laboratoire	OVAM 2008 Risque de formation de précipités et espèces chimiques compétitrices

	= paramètres dont la mesure ou l'estimation est requise par défaut
	= paramètre dont la mesure ou l'estimation est utile

Tableau 4 : Paramètres du site d'intervention à évaluer avant lancement d'un traitement au moyen d'une barrière réactive de Fe⁰.

Paramètre	Moyen de mesures et d'observation	Commentaires
Présence d'impétrants dans le sol au droit du site et ses alentours immédiats	Consultation des concessionnaires des réseaux d'impétrants, Commune, etc.	Réalisé lors des études de reconnaissance et détaillée
	Détection sur le terrain :préfouilles, passage au détecteur CAT, ...	Réalisé lors des études de reconnaissance et détaillée
Présence de cibles aériennes sensibles au bruit, odeurs, vapeurs, etc.sur le site et dans ses alentours immédiats	Inventaire	Nuisances possibles lors de la mise en place de la barrière réactive
Présence de cibles sensibles au niveau de l'aquifère traité et les autres aquifères sous-jacents	Inventaire des installations de captage proches, étude hydrogéologique	Réalisé lors de l'étude détaillée
Accessibilité du site aux équipements et surface disponible suffisante	Inventaire	
Présence d'infrastructures susceptibles d'être endommagées suite à l'augmentation du pH causée par la dégradation des polluants dans la barrière active	Inventaire	

	= paramètres dont la mesure ou l'estimation est requise par défaut
	= paramètre dont la mesure ou l'estimation est utile

Ces tableaux appellent les commentaires suivants :

- Source de pollution éradiquée ou non : une certitude quant à l'absence de source de pollution résiduelle doit être obtenue avant le lancement d'un traitement par passage au travers d'une barrière active de Fe^0 ;
- Teneurs en composés polluants dans la phase gazeuse du sol, utilisées, notamment pour la délimitation d'une phase libre dans le sol : pour le prélèvement des échantillons de l'air du sol, il est renvoyé au code de bonnes pratiques n°3 de Bruxelles Environnement portant sur les prises d'échantillons de sol, d'eau souterraines, de sédiments et d'air du sol ;
- Les risques de formation de précipités au sein de la barrière réactive peuvent être estimés à partir des teneurs mesurées, des valeurs de pH présentes et anticipées à l'aide de modèles géochimiques.

7.2. Nécessité d'essais préalables au laboratoire

Une première étape de test en laboratoire portant sur la faisabilité technique et visant à la mise au point des paramètres du traitement apparaît comme indispensable avant la mise en œuvre du traitement en vraie grandeur.

7.2.1. Première étape : tests en batch

Cette première étape vise à tester le type de matériaux de Fe^0 pouvant être utilisé pour constituer la barrière active. Les différents matériaux testés diffèrent par :

- Leur origine : à choisir en fonction de la proximité par rapport au site d'utilisation, le prix d'acquisition et de transport ;
- La granulométrie et la surface spécifique des granules (mesurée par isotherme d'adsorption/désorption d'azote). Selon Gavaskar et al. (2000), la granulométrie optimale se situe entre 0,3 et 2,38 mm de diamètre (8 à 50 mesh) ;
- L'homogénéité des lots proposés ;
- Leur composition chimique et leur potentiel de libération de polluants métalliques.

Ces tests de laboratoire font appel à des flacons hermétiquement fermés remplis d'eau polluée et de granules de fer, agités par rotation lente (5 rpm) et échantillonnés à intervalles réguliers. Les flacons sont maintenus à des températures proches de celles de l'eau souterraine (8 à 12° C). L'eau polluée utilisée pour le test est soit l'eau souterraine à traiter (caractérisée de manière précise), soit une eau artificiellement polluée (eau pure tamponnée par ajout de CaCO_3 à laquelle est ajoutée une quantité définie de solvant chloré).

Les paramètres suivis de manière périodique sont les suivants :

- Les teneurs en composés chlorés initialement présents et première estimation de la constante de premier ordre k et de la période de demi-vie $t_{1/2}$ des polluants ;
- Les teneurs en composés résultant de la dégradation des premiers ;
- pH ;
- Eh.

Au terme de ces tests il est possible de sélectionner le type, l'origine et la forme de fer les mieux adaptés au traitement à effectuer et de se prononcer sur la faisabilité du traitement. Il est recommandé de ne pas utiliser les paramètres k et $T_{1/2}$ ainsi obtenus pour dimensionner la barrière réactive, étant donné que les conditions expérimentales des tests par batch peuvent être fort

distantes des conditions réelles du traitement : ratio surface fer/volume d'eau à traiter, atteinte d'un équilibre.

Le type de fer susceptible d'être utilisé doit également être examiné pour son pouvoir de contamination de l'eau souterraine. A cet égard, le matériau de fer doit être soumis à un test de lixiviation en colonne selon la norme NEN7443 (L/S cumulé = 10) et les teneurs en éléments métalliques mesurées dans les lixiviats ne peuvent en aucun cas dépasser les NA de l'eau souterraine ([AGRBC du 29/03/2018](#)).

Si le fer utilisé provient de la valorisation de sous-produits d'aciérie (pailles grasses), leur teneur en hydrocarbures doit être vérifiée (<NA).

7.2.2. Deuxième étape : tests en colonne

Les tests en colonnes ont pour objectif de déterminer :

- Les vitesses de dégradation des composés chlorés présents dans l'eau souterraine et des produits intermédiaires formés lors du procès de dégradation ;
- Le temps de séjour dans le dispositif nécessaire pour assurer la dégradation des composés chlorés jusqu'au niveau désiré ;
- L'influence de la précipitation d'espèces minérales sur le déroulement du procès.

Le dispositif expérimental consiste en (voir **Figure 2**) :

- Une réserve d'eau souterraine (ballon de Téflon) prélevée en un point de la nappe où les teneurs en polluants susceptibles d'être interceptées par la barrière sont les plus élevées ;
- Une ou plusieurs colonnes disposées en série, faites de plexiglas, d'un diamètre intérieur de 4 cm et d'une longueur de 50 cm. Ces colonnes sont remplies du matériau envisagé pour constituer la barrière réactive : granules de fer ou mélange sable + granules de fer. Plusieurs colonnes sont mises en série si, compte tenu de la vitesse de circulation de l'eau, une seule colonne n'est pas suffisante pour assurer un temps de résidence suffisant ;
- Des points d'échantillonnage de l'eau souterraine sont aménagés à l'entrée et la sortie de la colonne ainsi que le long de la colonne (par exemple à 3, 5, 10, 15, 20 30 et 40 cm comptés à partir de la base de la colonne) ;
- Les paramètres physiques du dispositif à mesurer sont les suivants :
 - o Surface spécifique des granules de fer ;
 - o Densité apparente du matériau de remplissage ;
 - o Volume du matériau de remplissage et poids du fer présent (ml et kg) ;
 - o Porosité du matériau (%) ;
 - o Volume poreux du matériau de remplissage (ml).

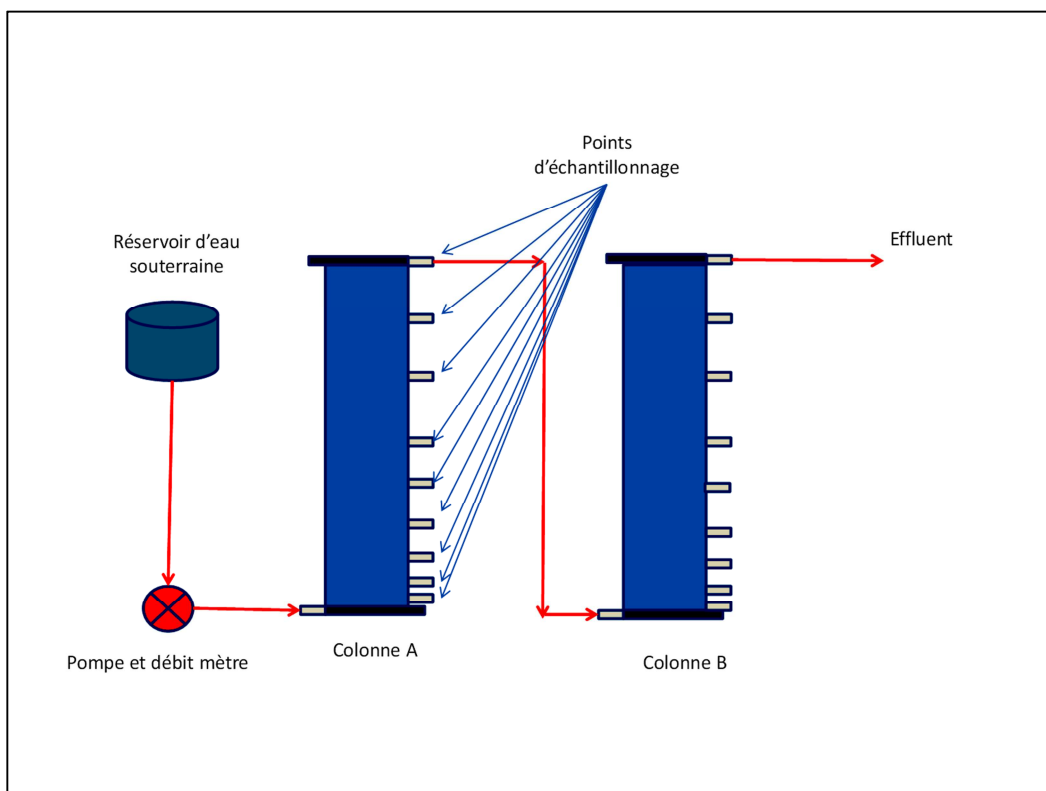


Figure 2 : Représentation schématique (non à l'échelle du dispositif expérimental)

Il est recommandé de procéder à l'échantillonnage au niveau des différents points, lorsqu'un état d'équilibre (steady state) du profil des teneurs en fonction de la distance parcourue dans la colonne est atteint. Généralement ce steady state est atteint après le passage de 40 volumes poreux au travers du dispositif.

Les paramètres à mesurer sont les suivants :

- La vitesse de circulation de l'eau ;
- Les teneurs en composés chlorés : composés présents initialement + produits intermédiaires (par exemple : PCE, TCE, cis-DCE, trans-DCE, 1,1-DCE, CV, 1,1,1-TCA, 1,1-DCA, CT, CF, DCM) au niveau de 9 à 16 points d'échantillonnage représentatifs d'autant de distances (et de temps de parcours) au sein du dispositif ;
- Eh et pH au niveau des mêmes points d'échantillonnage ;
- Analyse des espèces minérales à l'entrée et à la sortie du dispositif : Cations : Ba^{2+} , Ca^{2+} , Fe^{2+} et Fe^{3+} , Mn^{2+} , Mg^{2+} , Na^{+} , NH_4^{+} , Anions : Cl^{-} , SO_4^{2-} , Br^{-} , NO_3^{-} , NO_2^{-} , PO_4^{3-} , S^{2-} , Autres paramètres : alcalinité (teneur en carbone inorganique, teneur en CO_2 et en HCO_3^{-} , capacité tampon à pH 4,3 et 8,3), TOC, résidus secs.

L'interprétation des données se focalise sur trois types d'éléments décrits ci-après.

7.2.2.1 Détermination de la demi-vie des composés et du temps de séjour nécessaire

L'examen de l'évolution des teneurs des différents composés chlorés en fonction de la distance parcourue dans le dispositif et donc du temps de résidence (compte tenu de la vitesse de circulation de l'eau) permet d'estimer pour chacun d'eux, la constante de dégradation de premier ordre k et donc la période de demi-vie $t_{1/2}$.

Le temps de séjour de l'eau souterraine dans la barrière de traitement peut donc être estimé sur la base de cette constante k , des teneurs maximales attendues à l'entrée de la barrière réactive lors de l'opération de traitement et des valeurs objectives de teneurs visées par les opérations.

Afin de tenir compte de la formation de produits de dégradation intermédiaires lors du traitement, caractérisés eux aussi par une vitesse de dégradation spécifique, il peut être utile d'établir sur la base des teneurs en composés chlorés mesurés à l'entrée et tout au long du dispositif, un modèle de conversion molaire, qui précise pour un composé donné les différentes voies de dégradation possibles et pour chacune de celles-ci, les proportions concernées du composé (exprimées en fractions molaires). Ces modèles de conversion dont un exemple est donné à la **Figure 3** permettent d'estimer les teneurs maximales pour tous les composés chlorés susceptibles d'être présents (dès l'entrée ou formés) dans le dispositif de traitement sur la base des teneurs maximales attendues à l'entrée.

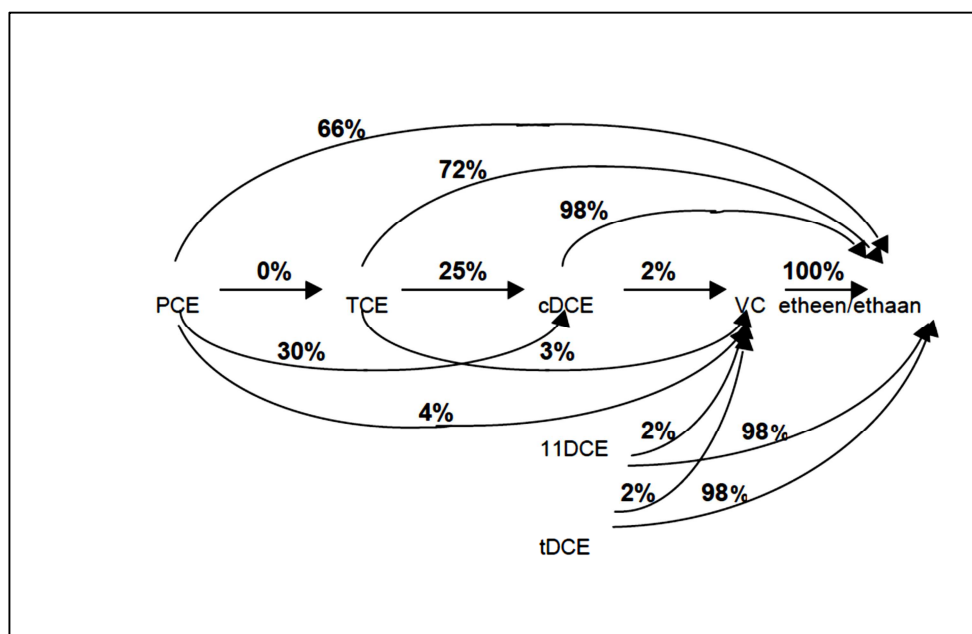


Figure 3 : Exemple de modèle de conversion molaire (Extrait de Reactive IJzerwanden, Code van Goede Praktijk, OVAM 2008).

A l'aide des teneurs maximales attendues à l'entrée de la barrière, du modèle de conversion molaire, des constantes de dégradation des différents composés chlorés (parvenant à l'entrée de la barrière ou formés dans celle-ci), et des objectifs de teneurs, il est possible d'estimer le temps de séjour minimum de l'eau souterraine au sein de la barrière réactive de Fe^0 .

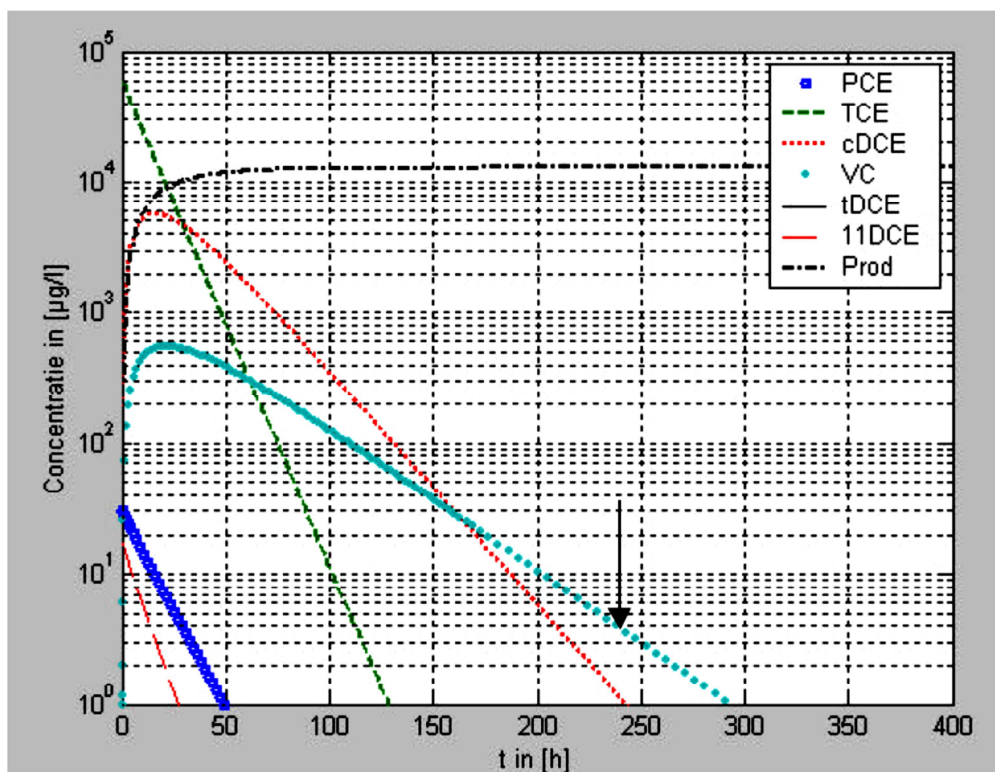


Figure 4 : Exemple d'estimation graphique du temps de séjour minimum de l'eau souterraine sur la base des teneurs attendues, estimées (modèle de conversion molaire) et des constantes de dégradation de premier ordre en fonction des objectifs de teneurs. (Extrait de *Reactive IJzerwanden*, Code van Goede Praktijk, OVAM 2008)

Un exemple d'estimation graphique du temps de séjour à l'aide d'un diagramme semi-logarithmique ($\ln C$ vs t) est reproduit à la **Figure 4**.

Lors du calcul de l'épaisseur de la barrière active sur la base du temps de résidence minimal et de la vitesse de circulation de l'eau souterraine, les précautions suivantes doivent être prises :

- Correction de la vitesse de dégradation si les tests en colonnes sont menés à des T° supérieures à celle existant dans le sol. Passer d'une température expérimentale de 20° à 25°C à des T° naturellement présentes dans le sol (8 à 12°C) amènerait à diminuer les vitesses de dégradation d'un facteur de 2 à 2,5.
- Prise en compte d'un facteur de sécurité lié aux incertitudes découlant de la mise en place effective de la barrière réactive sur le terrain. Un facteur de sécurité de l'ordre de 2 à 3 est recommandé lors du calcul de l'épaisseur de la barrière réactive.

7.2.2.2 Impact du traitement sur le pH et le potentiel rédox de l'eau souterraine

Suite au passage dans la barrière active, le pH de l'eau souterraine augmente de manière sensible tandis que le potentiel redox chute fortement. Ces phénomènes peuvent être anticipés de manière quantitative sur base des résultats du test en colonne.

7.2.2.3 *Impact sur les teneurs en espèces minérales de l'eau souterraine et estimation des quantités de matériaux précipités*

De manière typique lors du passage au travers de la barrière active, l'eau souterraine :

- s'enrichit en Cl^- (produit lors de la dégradation réductive des composés chlorés) et en NH_4^+ (réduction des nitrates et nitrites) ;
- s'appauvrit en Ca^{2+} , Mg^{2+} , carbone inorganique du fait de la précipitation d'hydroxydes et de carbonates en résultat de l'augmentation du pH.

Sur la base des données analytiques, il est possible d'estimer les quantités de précipités qui seront formées au sein de la barrière réactive lors du traitement de l'eau souterraine et d'anticiper les risques de colmatage de l'ouvrage.

7.3. **Nécessité d'un test pilote**

L'exécution d'un test pilote sur le terrain ne se justifie que pour les projets de grande taille, étant donné les coûts élevés qu'entraîne la mise en place du dispositif de traitement (mobilisation des machines, ...).

Dans la majorité des cas, au terme des deux phases de test de laboratoire, l'expert dispose de suffisamment de résultats pour se prononcer sur la faisabilité du traitement (technique et financière) et pour mettre au point les paramètres du traitement : vitesse de circulation de l'eau, temps de séjour, épaisseur du mur, type de fer, etc.

Un prérequis reste cependant une connaissance suffisamment fiable et détaillée des caractéristiques hydrogéologiques du site.

8. Description d'une installation type

Un dispositif de traitement des solvants chlorés par barrière réactive de Fe^0 se compose typiquement des éléments suivants.

8.1. Barrière continue

Une barrière réactive est établie dans les couches aquifères à traiter. Cette barrière est constituée :

- Soit, d'une tranche de granules de Fe^0 (ou granules de Fe^0 + autre métal) seuls ou mélangés à du sable, comprise entre deux tranches de matériaux drainants (graviers calibrés, ...) disposées en amont et en aval de la première ;
- Soit, d'une seule tranche de granules de fer directement mise en place dans les matériaux constitutifs de la ou des formations aquifères à traiter.

La largeur et la puissance de cette barrière doit être suffisante que pour intercepter l'entière du panache lors de sa migration. La conductivité hydraulique de l'ouvrage doit être équivalente ou supérieure à celle de la formation aquifère.

La barrière peut soit reposer sur une couche sous-jacente imperméable (aquitard) ou être du type « hanging ».

Le toit de la barrière active doit être en mesure d'intercepter le panache de pollution même en cas de fluctuations importantes (saisonnières ou autres) des niveaux piézométriques. Autant que faire se peut, la partie supérieure de la barrière réactive reste en zone saturée du sol de manière à éviter la corrosion des granules de fer par l' O_2 circulant dans les couches insaturées du sol.

Les méthodes de mise en place sont multiples (voir à cet égard l'ouvrage de Gavaskar A. et al., Batelle, March 2000). De manière succincte on peut citer :

- Excavation à l'aide d'une grue à godet avec ou sans mesure de soutènement (palplanches, caissons mobiles, ...) et mise en place directe du matériau réactif ;
- Excavation à l'aide d'une grue à godet avec ou sans mesure de soutènement, et utilisation de parois d'isolation temporaires (palplanches, ...) pour la mise en place des tranches de matériaux drainant et de la tranche de matériaux réactifs ;
- Excavation à l'aide d'une grue à grappin ;
- Excavation après mise en place de caissons métalliques foncés, mise en place du matériau réactif (et éventuellement du matériau drainant) et retrait du caisson ;
- Excavation du sol et remplissage direct à l'aide du matériau réactif à l'aide d'une trancheuse ;
- Excavation et stabilisation de la tranchée à l'aide d'un coulis biodégradable (gel de poudre de caroubiers) et mise en place du matériau réactif ;
- Excavation du sol et mise en place directe du matériau réactif à l'aide de tarières creuses ;
- Fracturation hydraulique de la couche aquifère suivie de l'injection du matériau réactif (gel biodégradables contenant le fer réactif) ;
- Injection directe sous pression dans le sol d'un gel biodégradable contenant le fer réactif ;
- Injection d'un gel biodégradable contenant le fer après passage d'un profilé vibrant (forme H) ;
- ...

8.2. Système Funnel&Gate

Ce dispositif repose sur la mise en place d'une paroi imperméable établie sur le trajet du panache de pollution (Funnel) et de barrières perméables dans lesquelles l'eau souterraine circule et est traitée. Le ratio recommandé entre ces deux types d'infrastructures, en termes de longueur, est de 5/1.

Les techniques de mise en place des parois imperméables (conductivité hydraulique $< 10^{-9}$ m/s) sont variées :

- Murs de palplanches métalliques avec joints étanches ;
- Murs emboués : à l'aide de coulis faits de sol excavé + bentonite, à l'aide de coulis de ciment+bentonite, à l'aide de coulis de béton (ciment+agrégats) + bentonite ou à l'aide de barrière composite (bentonite-sol, bentonite ou ciment bentonite – géomembrane en HDPE) ;
- ...

Les techniques de mise en place des barrières perméables actives de traitement sont celles décrites dans la **Section 8.1**.

8.3. Dispositif à capsule de traitement

Ce dispositif constitue une variante du système précédent. Le tronçon de barrière perméable active renferme des capsules réactives contenant les granulats de Fe^0 au travers desquelles l'eau souterraine circule de manière verticale. Ces capsules de traitement restent accessibles après mise en place et peuvent être remplacées dès que leur performance diminue.

9. Descriptif de l'installation qui sera mise en place

Le dispositif qui sera mis en place dans le cadre **des travaux** sera décrit en fournissant, au minimum, les indications suivantes reprises dans le **Tableau 5**.

Lors de la présentation de ce descriptif, la nécessité d'enlever la barrière active au terme du traitement sera discutée.

Tableau 5 : Données à fournir concernant le système de traitement à mettre en place

Partie du dispositif	Élément	Données du descriptif	Commentaire
Barrière active	Dimensions	Largeur, profondeur et épaisseur. Justification des paramètres : vitesse de circulation, temps de séjour nécessaire, paramètres de sécurité, ...	Sur base des tests de laboratoire (batch et colonne)
	Design de la barrière	Tranche de fer simple, Tranches multiples (fer + graviers filtrants). Accès si intervention nécessaire.	
	Type de fer	Origine, composition, performances attendues, potentiel de libération d'éléments métalliques	Sur base des tests de laboratoire (batch et test de lixiviation)
	Méthode de mise en place	Descriptif de la technique de mise en place. Dispositif de stockage des terres excavées. Filière de prise en charge des terres excavées. Mesures de stabilité éventuelles	
	Durée de vie attendue	Performance et durée de vie attendue compte tenu de la passivation des surfaces et de la formation de précipités. Si nécessaire, méthode de réactivation de la couche active (remplacement, mélange, nettoyage par flushing du fer)	
	Aspects hydrogéologiques	Conductivité hydraulique attendue de la barrière, impact sur le mode de circulation de l'eau souterraine : modélisation par Modflow ou un autre logiciel de simulation	
	Performance attendue du traitement	Performance attendue de l'interception du panache : simulation de l'interception à l'aide de modèles tels que MODPATH ou modèles équivalents	
Parois imperméables (si présentes: système Funnel&Gate)	Dimensions	Largeur, profondeur et épaisseur. Justification des paramètres	
	Design de la paroi	Palplanches, sol-bentonite, ...	
	Méthode de mise en place	Descriptif de la technique de mise en place. Dispositif de stockage des terres excavées. Filière de prise en charge des terres excavées. Mesures de stabilité éventuelles	
	Aspects hydrogéologiques	Conductivité hydraulique attendue de la paroi, impact sur le mode de circulation de l'eau souterraine : modélisation par Modflow ou un autre logiciel de simulation	

	Performance attendue du traitement	Performance attendue de l'interception du panache : simulation de l'interception à l'aide de modèles tels que MODPATH ou modèles équivalents	
Objectif poursuivi	Traitement du panache de pollution dans l'eau souterraine	Objectifs de teneurs à atteindre de manière durable en aval de la barrière active. Durée du traitement compte tenu de la charge polluante dans le sol.	

10. Limitation des incidences du projet sur l'environnement : odeurs, bruits, poussières, etc.

10.1. Points à prendre en compte

En fonction de l'occupation actuelle et future du site et de ses alentours immédiats, les points suivants sont à prendre en compte :

- Risques liés à la perturbation du mode de circulation de l'eau souterraine : changement des hauteurs piézométriques, risques d'ennoyage des points bas, etc. ;
- Risque de libération de polluants métalliques à partir de la barrière de fer et risques liés au relèvement du pH de l'eau souterraine ;
- Risques pour les installations de captage voisines ;
- Risques pour la stabilité des bâtiments et des ouvrages présents à proximité du chantier de mise en place du dispositif.

10.2. Risques liés à la perturbation du mode de circulation de l'eau souterraine

En amont de la barrière, un relèvement du niveau piézométrique peut être créé si la conductivité hydraulique de la barrière est inférieure à celle de la formation aquifère. Dans les points bas, cette situation peut engendrer des inondations et résurgences. L'utilisation de modèles de simulation de l'écoulement de l'eau souterraine permet d'anticiper ces nuisances et prendre les mesures correctrices : augmentation de la proportion longueur barrière perméable/longueur paroi imperméable, etc.

En aval de la barrière, une diminution du niveau piézométrique peut également résulter d'une faible conductivité de la barrière. En cas de changement important, l'impact sur la stabilité des ouvrages doit être évalué.

10.3. Risque de libération de polluants métalliques à partir de la barrière de fer et risques liés à l'augmentation du pH de l'eau souterraine

Les tests de lixiviation à mener sur le matériau de Fe^0 qui sera utilisé permettent d'estimer de manière quantitative ce risque de libération. Une incertitude demeure cependant sur le comportement à long terme des particules de fer.

De manière générale, à une augmentation du pH de l'eau souterraine correspond une diminution de la mobilité des polluants : polluants métalliques hydrolysés, acide faibles ionisés (phénols), ... L'inverse est vrai pour certains polluants tels que : les cyanures complexes, etc.

Sur la base des teneurs mesurées dans l'eau souterraine et la phase solide du sol, l'expert soulignera les risques liés au changement du pH de l'eau souterraine et adaptera en conséquence les procédures de supervision du traitement.

10.4. Risques pour les installations de captage voisines

Les installations de captage utilisées à des fins de distribution publique doivent être considérées comme des cibles prioritaires. Les autres installations de captage utilisées à des fins privées doivent également être prises en compte si elles risquent d'être impactées suite aux opérations de

traitement. Ces installations sont susceptibles d'être impactées par suite du traitement insuffisant de l'eau souterraine au niveau du panache migrant vers les sites de captage.

La vérification de la qualité des eaux souterraines en aval de la zone d'intervention doit donc impérativement être effectuée.

10.5. Risques pour la stabilité des bâtiments et des ouvrages présents à proximité du chantier de mise en place du dispositif

L'importance des risques pour la stabilité des ouvrages lors des travaux de mise en place de la barrière réactive dépend de la technique utilisée :

- Palplanches et profilés vibrants : vibration pour le fonçage et l'extraction ;
- Excavation à parois nues sans mise en place de coulis bentonitique : risque d'éboulements ;
- Rabattement de la nappe lors de l'excavation et de la mise en place de la barrière active : perte de densité et de compaction du sol drainé.

L'évaluation des risques pour la stabilité des ouvrages et les mesures qui seront prises pour gérer ces risques feront partie du projet.

10.6. Conformités aux cadres légaux existants

En matière de nuisances acoustiques, le niveau de bruit tolérable généré par les chantiers de traitement de la nappe aquifère par pompage est réglementé par l'Ordonnance du 17.07.1997 et son arrêté d'exécution du 24 novembre 2002 relatif à la lutte contre les bruits et les vibrations par les installations classées. Dans les zones à niveau de bruit ambiant élevé (voiries, zones industrielles actives, ...) il convient de comparer le niveau mesuré de l'impact des installations au niveau de bruit ambiant.

Les impositions renseignées au permis d'environnement prédélivrées doivent également être respectées. Dans les zones à niveau de bruit ambiant élevé (voiries, zones industrielles actives, ...) il convient de comparer le niveau mesuré de l'impact des installations au niveau de bruit ambiant.

11. Supervision du traitement

11.1. Objectifs de la supervision

La supervision du traitement porte principalement sur les aspects suivants :

- Vérifier que le panache de pollution est bien capturé par la barrière active et ne le contourne pas (latéralement et verticalement) ;
- Vérifier que la barrière active assure un traitement effectif de la contamination et que les objectifs **du traitement** sont bien rencontrés ;
- Vérifier que la barrière de traitement n'exerce pas d'effet négatif sur la qualité de l'eau souterraine en aval et sur le mode de circulation de l'eau souterraine au droit du site ;
- Obtenir une estimation sur la durée de vie du dispositif.

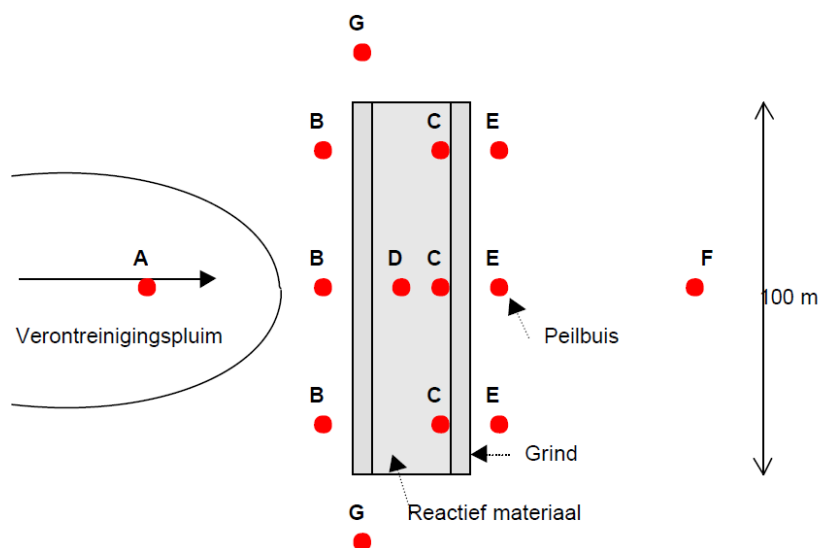
11.2. Mesures de surveillance : dispositif type

Les dispositifs à mettre en place pour la surveillance du traitement, dans les trois types de configurations (barrière continue, Funnel&Gate, Capsule), font l'objet des schémas reproduits dans les **Figures 6a, 6b et 6c**.

Pour le placement des piézomètres de contrôle, il convient de se référer au code de bonnes pratiques n°2 de Bruxelles Environnement portant sur le placement des piézomètres. Pour le prélèvement des échantillons de sol, d'eau souterraine et de gaz, il convient de se référer au code de bonnes pratiques n° 3 de Bruxelles Environnement « Prise d'échantillons de sol, d'eau souterraine, de sédiments et d'air du sol. ... ». Pour l'analyse de ces échantillons, il convient de se conformer au code de bonnes pratiques n° 4 « Code de bonne pratique pour les méthodes d'analyse ... », de Bruxelles Environnement .

11.2.1. Barrière continue

Figure 5 : Dispositif de supervision en cas de barrière continue.



Le dispositif de supervision repose sur les éléments suivants :

- Un piézomètre au moins (type A) établi à plus de 10 m en amont de la barrière de traitement, dans l'axe du panache de pollution, afin de contrôler la qualité de l'eau souterraine se dirigeant vers la barrière ;
- Des piézomètres de type B, situés à 1 ou 2 m seulement en amont de la barrière ;
- Des piézomètres de type C, situés à quelques cm de la face aval de la barrière réactive, en amont de la tranche de graviers filtrants éventuelle. Selon OVAM, 2006, le placement de ces piézomètres au sein de la tranche de graviers n'est pas recommandé. Il est important, dans ce type de configuration de placer les piézomètres en bordure des parois imperméables, vu que c'est à ce niveau que les vitesses de circulation de l'eau souterraine sont les plus élevées. Ces piézomètres peuvent être de type multi-niveau ;
- Un piézomètre de type D, situé en partie amont de la barrière réactive. Ce piézomètre vise à fournir une image de la vitesse de dégradation des polluants le long du parcours au travers de la barrière, et de détecter plus rapidement une intrusion de polluants (fissure de la barrière). Ce piézomètre est à placer à l'endroit où la vitesse de circulation maximale est attendue, c'est-à-dire en bordure de la paroi imperméable ;
- Des piézomètres de type E situés à 1 ou 2 m en aval de la barrière perméable ;
- Des piézomètres de type F situés plus loin en aval ;
- Des piézomètres de type G, situés latéralement par rapport à la barrière, destinés à vérifier que l'entière du panache a bien été capturée ;

Le schéma suivant donne le nombre de piézomètres de contrôle pour une barrière de 100 m maximum comportant une barrière réactive de 25 m tout au plus, le reste étant constitué de la paroi imperméable. En cas de longueurs plus importantes, le nombre recommandé de piézomètres est modifié comme indiqué dans le **Tableau 7**. Ce même tableau donne une échelle d'importance des différents types de piézomètres.

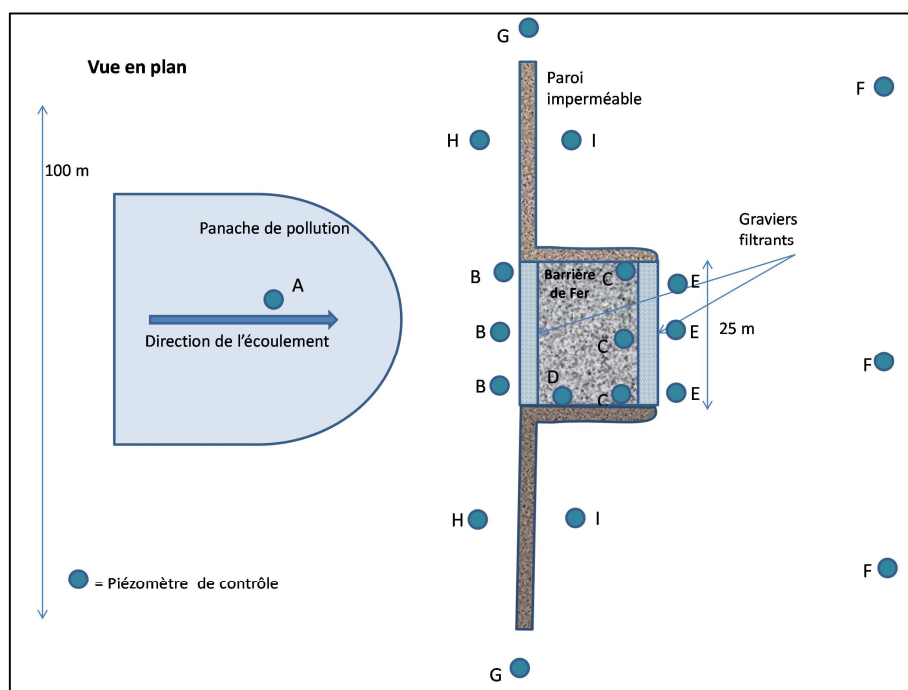
Tableau 6 : Nombre de piézomètres de contrôle à établir selon le type de localisation - Importance relative des différents types de piézomètres (Extrait de OVAM 2006, Reactiveijzerwanden, Code Van GoedePraktijk).

Type de piézomètre	Nombre pour une barrière de 100 m tout au plus	Piézomètres supplémentaires	Importance du piézomètre
A	1	-	++
B	3	1 par 100 m supplémentaires	+++
C	3	1 par 50 m supplémentaires	+++
D	1	Uniquement pour les barrières larges	+
E	3	1 par 100 m supplémentaires	+++
F	1	-	+++
G	1 + 1	-	++

+++ = indispensable, ++ important, + utile

11.2.2. Dispositif « Funnel&Gate »

Figure 6 : Dispositif de supervision en cas de configuration « Funnel&Gate ».



Le dispositif de supervision repose sur les éléments suivants :

- Un piézomètre au moins (type A) établi à plus de 10 m en amont de la barrière de traitement, dans l'axe du panache de pollution, afin de contrôler la qualité de l'eau souterraine se dirigeant vers la barrière ;

- Des piézomètres de type B, situés à 1 ou 2 m seulement en amont de la barrière ;
- Des piézomètres de type C, situés à quelques cm de la face aval de la barrière réactive, en amont de la tranche de graviers filtrants éventuelle. Selon OVAM, 2006, le placement de ces piézomètres au sein de la tranche de graviers n'est pas recommandé. Il est important, dans ce type de configuration de placer les piézomètres en bordure des parois imperméables, vu que c'est à ce niveau que les vitesses de circulation de l'eau souterraine sont les plus élevées. Ces piézomètres peuvent être de type multi-niveau ;
- Un piézomètre de type D, situé en partie amont de la barrière réactive. Ce piézomètre vise à fournir une image de la vitesse de dégradation des polluants le long du parcours au travers de la barrière, et de détecter plus rapidement une intrusion de polluants (fissure de la barrière). Ce piézomètre est à placer à l'endroit où la vitesse de circulation maximale est attendue, c'est-à-dire en bordure de la paroi imperméable ;
- Des piézomètres de type E situés à 1 ou 2 m en aval de la barrière perméable ;
- Des piézomètres de type F situés plus loin en aval ;
- Des piézomètres de type G, situés latéralement par rapport à la barrière, destinés à vérifier que l'entièreté du panache a bien été capturée ;
- Des piézomètres de type H situés en amont de la paroi imperméable ;
- Des piézomètres de type I, situés en aval de la paroi imperméable de manière à vérifier que les polluants ont bien été capturés par la barrière et ne passent pas au travers ou sous la paroi imperméable.

Le schéma reproduit à la **Figure 6** donne le nombre de piézomètres de contrôle pour une barrière de 100 m maximum comportant une barrière réactive de 25 m tout au plus, le reste étant constitué de la paroi imperméable. En cas de longueurs plus importantes, le nombre recommandé de piézomètres est modifié comme indiqué dans le **Tableau 7**. Ce même tableau donne une échelle d'importance des différents types de piézomètres.

Tableau 7 : Nombre de piézomètres de contrôle à établir selon le type de localisation - importance relative des différents types de piézomètres (Extrait de OVAM 2006, *Reactiveijzerwanden*, Code Van GoedePraktijk)

Type de piézomètre	Nombre pour une barrière de 100 m tout au plus	Piézomètres supplémentaires	Importance du piézomètre
A	1	-	++
B	3 par barrière perméable	1 par 50 m de barrière supplémentaires	+++
C	3 par barrière perméable	1 par 25 m de barrière supplémentaires	+++
D	1	Uniquement pour les barrières larges	++
E	3	1 par 100 m supplémentaires	+++
F	3 par barrière perméable	-	+++
G	1 + 1	-	++
H	1 par paroi imperméable	1 par 50 m de paroi supplémentaires	+++
I	1 par paroi imperméable	1 par 50 m de paroi supplémentaires	+++

+++ = indispensable, ++ important, + utile

11.2.3. Dispositif Barrière active équipée d'une ou de plusieurs capsules

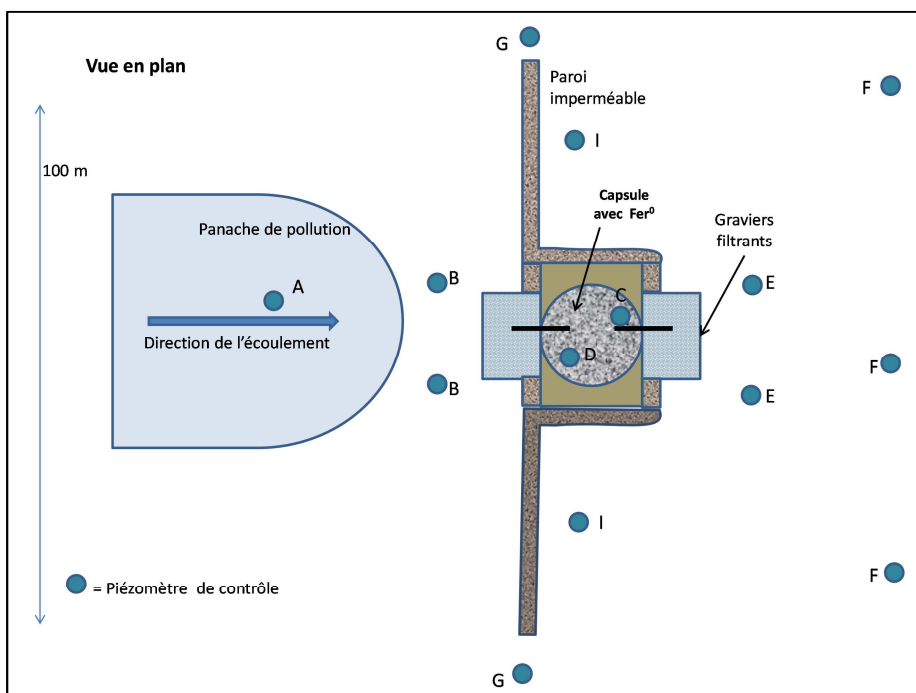


Figure 8 : Dispositif de supervision en cas de configuration Barrière active + capsule

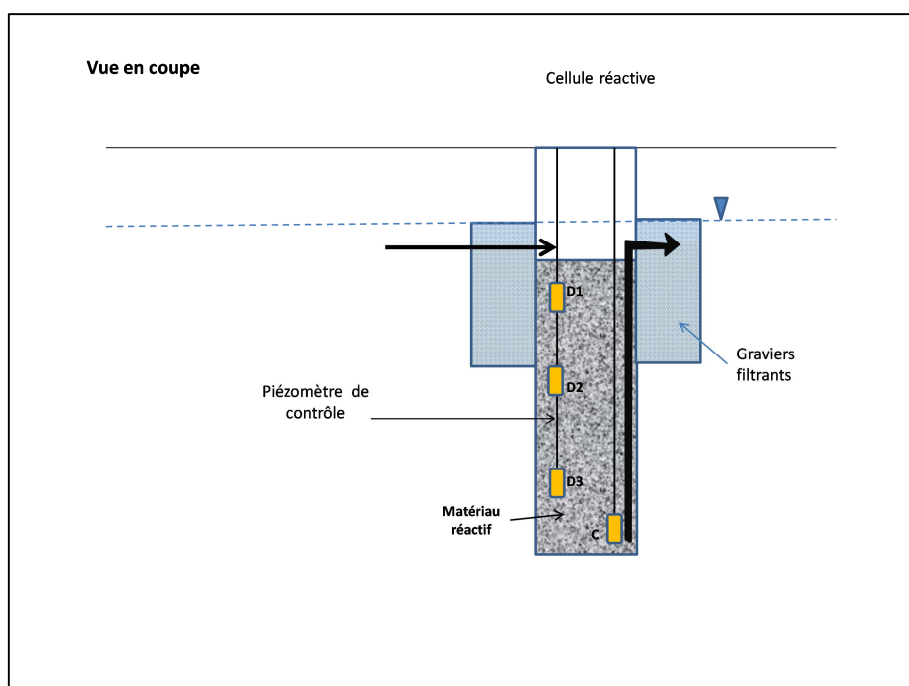


Figure 7 : Coupe d'une capsule réactive de traitement et position des crépines des piézomètres de contrôle

La localisation des piézomètres de contrôle suit la configuration décrite dans la **Section 11.1**.

Le schéma reproduit à la **Figure 7** donne le nombre de piézomètres de contrôle pour une barrière de 100 m maximum comportant une capsule réactive de 5 m de diamètre tout au plus, le reste étant constitué de la paroi imperméable. En cas de dimensions plus importantes, le nombre recommandé de piézomètres est modifié comme indiqué dans le **Tableau 8**. Ce même tableau donne une échelle d'importance des différents types de piézomètres.

Tableau 8 : Nombre de piézomètres de contrôle à établir selon le type de localisation - Importance relative des différents types de piézomètres (Extrait de OVAM 2006, Reactiveijzerwanden, Code Van Goede Praktijk)

Type de piézomètre	Nombre pour une barrière de 100 m tout au plus	Piézo-mètres supplémentaires	Importance du piézomètre
A	1	-	++
B	2 par barrière perméable	-	+++
C	1 – 2 par capsule	1 par 2 m de diamètre supplémentaires	+++
D	1 multi-niveau	Uniquement pour les grandes capsules	++
E	2 par barrière perméable	-	+++
F	3 par barrière perméable	-	+++
G	1 + 1	-	++
H	1 par paroi imperméable	1 par 50 m de paroi supplémentaires	+++
I	1 par paroi imperméable	1 par 50 m de paroi supplémentaires	+++

+++ = indispensable, ++ important, + utile

11.2.4. Remarque générale

En cas de panache de pollution de puissance importante ou de composition du sol hétérogène (différentes couches aquifères de conductivité hydraulique différente), les piézomètres à installer seront de type multi-niveau (piézomètres crépinés à des niveaux différents placés dans un même trou de forage ou placés à de courtes distances l'un de l'autre).

Il est recommandé que les piézomètres à placer au sein de la barrière réactive soient de type multi-niveaux afin de prendre en compte l'hétérogénéité pouvant exister dans le matériau réactif (différences de porosité lors du compactage, présence de précipités, ...). Au sein des granules de fer, il n'est pas nécessaire d'équiper les piézomètres d'un massif filtrant. Le diamètre de ces piézomètres sera de petite taille (<20 mm) de manière à diminuer le volume de l'eau de purge et prélever un échantillon représentatif de l'eau présente dans le massif réactif. A cet égard, il est également recommandé de purger de petits volumes d'eau souterraine et de purger et prélever dans les piézomètres à de très faibles débits. Compte tenu du nombre important d'analyses à réaliser et le volume des échantillons demandés par les laboratoires, il est possible que des aménagements doivent être proposés par les experts : campagnes de prélèvements et d'analyses démultipliées par 2 avec un intervalle d'une semaine entre les deux prélèvements successifs, etc.

De manière à suivre l'évolution du mode d'écoulement de l'eau souterraine au droit du site sur une plus grande échelle que la barrière active et ses environs immédiats, quelques piézomètres répartis sur le site (établis lors des travaux d'étude) seront maintenus et les niveaux piézométriques y seront périodiquement relevés. L'expert formulera des propositions à cet égard dans le projet.

11.3. Mesures de supervision : paramètres de supervision du traitement et fréquences

Les paramètres de supervision du traitement et la fréquence des mesures sont donnés dans le **Fout!**
Verwijzingsbron niet gevonden..

Paramètres de	Moyen	Paramètre	Fréquence minimale*	Commentaires
Suivi piézométrique	Mesures du niveau de l'eau souterraine dans les piézomètres de contrôle	Sonde piézométrique (m)	Trois premiers mois (phase de lancement) : toutes les 2 semaines. De 3 mois à 1 an : tous les 3 mois. De 1 à 3 ans : tous les 6 mois. Au-delà de 3 ans : tous les 6 mois ou tous les ans.	Selon OVAM 2006. Etablissement d'une carte des isopièzes et sens d'écoulement
Paramètres physico-chimiques de l'eau souterraine	Echantillonnage et examen de l'eau souterraine lors du prélèvement	pH, Eh, O ₂ dissous, T°, conductivité électrique	Trois premiers mois (phase de lancement) : tous les mois. De 3 mois à 1 an : tous les 3 mois. De 1 à 3 ans : tous les 6 mois. Au-delà de 3 ans : tous les 6 mois ou tous les ans.	Selon OVAM 2006. Etablissement d'une carte des isopièzes et sens d'écoulement
Teneurs en composés organiques de l'eau souterraine	Echantillonnage et examen de l'eau souterraine lors du prélèvement	Composés chlorés (composés dont les teneurs justifient l'intervention + composés chlorés résultant de la dégradation partielle des précédents), autres polluants dont les teneurs sont à surveiller, produits de dégradation non chlorés	Trois premiers mois (phase de lancement) : tous les mois. De 3 mois à 1 an : tous les 3 mois. De 1 à 3 ans : tous les 6 mois. Au-delà de 3 ans : tous les 6 mois ou tous les ans.	Selon OVAM 2006. Etablissement d'une carte des isopièzes et sens d'écoulement
Teneurs en composés inorganiques de l'eau souterraine	Echantillonnage et examen de l'eau souterraine lors du prélèvement	Métaux lourds : As, Cd, Hg, Ni, Cu, Pb, Zn, Cr. Autres métaux : Ca, Mg, Si dissous, Fe, Mn, Alcalinité (carbone total inorganique). Anions: Cl, NH ₄ , NO ₃ , SO ₄	Trois premiers mois (phase de lancement) : tous les mois. De 3 mois à 1 an : tous les 3 mois. De 1 à 3 ans : tous les 6 mois. Au-delà de 3 ans : tous les 6 mois ou tous les ans.	Selon OVAM 2006. Etablissement d'une carte des isopièzes et sens d'écoulement



Teneurs résiduelles dans le sol	Forages et prélèvements de carottes de sol et analyse des HCOV et des produits intermédiaires de dégradation	Teneurs en HCOV et produits de dégradation intermédiaires (kg/Kg ou kg/m ³)	Au lancement des opérations et ensuite tous les 6 mois	La profondeur d'échantillonnage doit permettre de suivre une éventuelle migration verticale de la pollution
Bilan de masse : Estimation des quantités résiduelles de HCOV et des produits de dégradation	Teneurs résiduelles moyennes dans le sol et les eaux souterraines dans la zone d'intervention	Bilan de masse : quantités de polluants initiales, quantités résiduelles, quantités détruites (Kg) et quantités produites (kg) de produits de dégradation intermédiaires	Tous les 6 mois	Estimation du temps de traitement
Extension de la tache de pollution	Echantillonnage et analyse d'échantillons d'eau souterraine	Extension latérale et verticale du panache de pollution	Trois premiers mois (phase de lancement) : tous les mois. De 3 mois à 1 an : tous les 3 mois. De 1 à 3 ans : tous les 6 mois. Au-delà de 3 ans : tous les 6 mois ou tous les ans.	Risque de migration vers les cibles sensibles et les couches profondes

*la fréquence sera ajustée par l'expert en fonction des données de suivi

Ce tableau appelle les commentaires suivants :

- La périodicité des campagnes de prélèvement et d'analyse des échantillons de sol et d'eau souterraine pourra être modifiée sur proposition de l'expert ;
- La liste des polluants à analyser dans l'eau souterraine pourra être modifiée sur proposition justifiée de l'expert. Par exemple, dans la rubrique « autres polluants dont les teneurs sont à surveiller », on entend les polluants dont les teneurs mesurées lors des travaux d'étude étaient proches des valeurs de risque ou des valeurs normatives déclenchant la nécessité d'un traitement. Les polluants susceptibles d'être libérés suite aux modifications du milieu apportées par le traitement (conditions réductrices, augmentation de pH, ...) tombent également dans cette rubrique ;
- Pour le prélèvement des échantillons de sol et d'eau souterraine, il convient de se référer au code de bonnes pratiques n°3 de Bruxelles Environnement « Prise d'échantillons de sol, d'eau souterraine, de sédiments et d'air du sol. ... ». Pour l'analyse de ces échantillons, il convient de se conformer au code de bonnes pratiques n°4 « Code de bonne pratique pour les méthodes d'analyse ... », de Bruxelles Environnement ;
- Il est fréquent d'observer une augmentation des teneurs en polluants dans la période qui suit la mise en place de la barrière réactive suite à la mobilisation des polluants adsorbés lors des mouvements de sol ;



- Si les performances de la barrière en termes de conductivité hydraulique et capacité de traitement suivent les paramètres prévus lors du projet, les modalités de supervision peuvent être celles décrites dans le **Fout! Verwijzingsbron niet gevonden.** (éventuellement allégées). Dans le cas contraire, des aménagements à ces modalités de supervision seront proposés par l'expert.

12. Rapportage, optimisation et mesures correctives

12.1. Rapportage

Conformément au prescrit de l'AGRBC du 29/03/2018 fixant le contenu type du projet de gestion du risque, du projet d'assainissement, de la déclaration préalable au traitement de durée limitée et des modalités d'affichage du traitement de durée limitée la mise en œuvre d'une intervention in-situ par barrière active de Fe⁰ implique la remise à Bruxelles Environnement d'un ou de plusieurs rapports intermédiaires :

- Rapport intermédiaire clôturant la phase de démarrage. On estime à trois mois un délai normal d'exécution d'une phase de démarrage. Sur proposition justifiée de l'expert, ce délai peut être modifié ;
- Autres rapports intermédiaires si les travaux s'étendent sur plusieurs années. La fréquence de ces rapports intermédiaires n'est pas précisée dans l'Arrêté. Cette fréquence sera déterminée sur proposition justifiée de l'expert. Un rapport intermédiaire sera produit et présenté à Bruxelles Environnement lorsque, sur la base des données collectées lors des différentes campagnes de supervision, des modifications significatives dans le dispositif d'intervention sont jugées nécessaires et soumises à l'approbation de Bruxelles Environnement : extension de la barrière réactive, extension du réseau de piézomètres d'observation en résultat de l'extension du panache, mise en œuvre d'autres techniques de traitement, etc.

Le contenu du premier rapport intermédiaire comprendra au minimum les informations reprises dans le **Tableau 9** suivant.

Tableau 9 : informations à présenter dans le premier rapport intermédiaire.

Rubrique	Paramètres et quantité à mesurer	Commentaires
Description du dispositif de traitement mis en œuvre (as built)	Description des éléments du dispositif : barrière perméable de fer (dimensions, localisation, mode de mise en place, nature, origine et composition du Fer, potentiel de libération en métaux lourds, granulométrie, porosité du fer réactif). Si parois imperméables : dimensions, localisation, constituants, mode de mise en place). Si tranches de graviers filtrants : dimensions, localisation, nature et granulométrie. Si capsules de fer réactif : dimensions, localisation, nature et origine du fer, composition, granulométrie et pouvoir de libération en métaux lourds).	Plan de localisation as built à établir
Description du dispositif de supervision (as built)	Piezomètres de contrôle : localisation, description de l'équipement (diamètre, profondeur, position crépine, massif filtrant, bouchon de l'espace annulaire, tête)	Plan de localisation as built à établir
Paramètres à rapporter	Mesures piézométriques et mode de circulation de l'eau souterraine. Evolution des caractéristiques physico-chimiques de l'eau souterraine (en amont, aval et au sein de la barrière). Evolution des teneurs en composés organiques (en amont, aval et au sein de la barrière). Evolution des teneurs en composés inorganiques (en amont, aval et au sein de la barrière).	OVAM 2006 - Carte des isopièzes et mode de circulation de l'eau souterraine à établir

Interprétation des résultats

Examen du mode de circulation de l'eau souterraine et comparaison avec les résultats du modèle prédictif. Examen des problèmes éventuels en cas de grandes différences. Estimation des volumes d'eau souterraine traités. Estimation des quantités de polluants dégradés. Conductivité hydraulique de la barrière perméable. Evolution des teneurs en polluants en amont de la barrière. Examen des teneurs en aval de la barrière : efficacité du traitement et rencontre des objectifs. Examen des teneurs au sein de la barrière : vitesse de dégradation, temps de séjour nécessaire. Examen des teneurs en aval des parois imperméables : vérification de l'étanchéité. Examen des teneurs sous et à côté de la barrière : vérification de la capture de l'entièreté du panache. Bilan des espèces minérales et estimation des quantités précipitées. Bilan de matière pour la charge polluante du sol et estimation du temps de traitement. Vérification de la libération de métaux lourds par le fer actif.

12.2. Mesures correctives et optimisation

Comme tout processus in-situ, l'efficacité du traitement peut être sujette à certains aléas pouvant influencer la bonne conduite du traitement : hétérogénéité du sol, etc.

Deux types de situations problématiques sont typiquement rencontrés.

12.1.1 Diminution progressive de la conductivité hydraulique de la barrière perméable

La cause la plus fréquente est le colmatage des pores par la précipitation de composés minéraux : carbonates, sulfates, etc. Moins fréquemment le développement de colonies bactériennes peut être invoqué.

Une intervention au niveau de la barrière perméable doit être programmée : flushing, lessivage acide au travers de la barrière, trituration des granules de fer, remplacement de la barrière (ou de la capsule).

12.1.2 Bypass de la barrière active par une partie du panache de pollution

Les causes peuvent être multiples : voie de circulation préférentielle non contrôlée par la paroi imperméable (Funnel & Gate), largeur ou profondeur non adaptée de la barrière, brèches au sein de la paroi imperméable ou au sein de la barrière perméable, ...

Le diagnostic (localisation du bypass) peut être réalisé à l'aide de traceurs. Premier cas de figure : des aménagements du dispositif sont techniquement et financièrement possibles (extension latérale, colmatage des brèches, Deuxième cas de figure : les aménagements nécessaires ne sont pas envisageables de manière réaliste (profondeur ou épaisseur insuffisante de la barrière). Les mesures correctives passent alors par la mise en œuvre conjuguée d'autres techniques de [traitement](#) : pump and treat, ISCO, ...

13. Mesures de validation et schéma décisionnel arrêt-prolongation du traitement

Les mesures de validation visent à préciser si les objectifs de **de traitement** sont atteints de manière durable de sorte que les opérations de traitement puissent être considérées comme terminées.

Ces mesures consistent en une dernière campagne d'échantillonnage et d'analyse des couches de sols et de l'eau souterraine impactées. Cette campagne d'analyse portera sur tous les polluants dont la présence a requis une intervention, leurs produits de dégradation intermédiaires à caractère nocif et les autres polluants susceptibles d'avoir été libérés par la barrière de fer suite aux modifications apportées aux caractéristiques de l'eau souterraine (augmentation de pH et mise en place de conditions réductrices strictes).

En cas d'atteinte des objectifs **de traitement** au sein de la tâche de pollution (sol et eaux), deux autres campagnes d'échantillonnage de l'eau souterraine successives seront effectuées, à respectivement 3 mois et 6 mois comptés à partir du constat de l'atteinte, de manière à vérifier la durabilité des résultats acquis (absence d'effet saisonnier).

En cas de maintien des niveaux de teneurs en équilibre sous les valeurs objectifs, **le traitement** peut être considéré comme accompli un rapport d'évaluation finale introduit.

En cas de non atteinte des objectifs de teneurs, le dispositif de traitement par passage dans une barrière active de Fe⁰ est maintenu en activité avec éventuellement la mise en place de mesures complémentaires : excavation du noyau, atténuation stimulée...

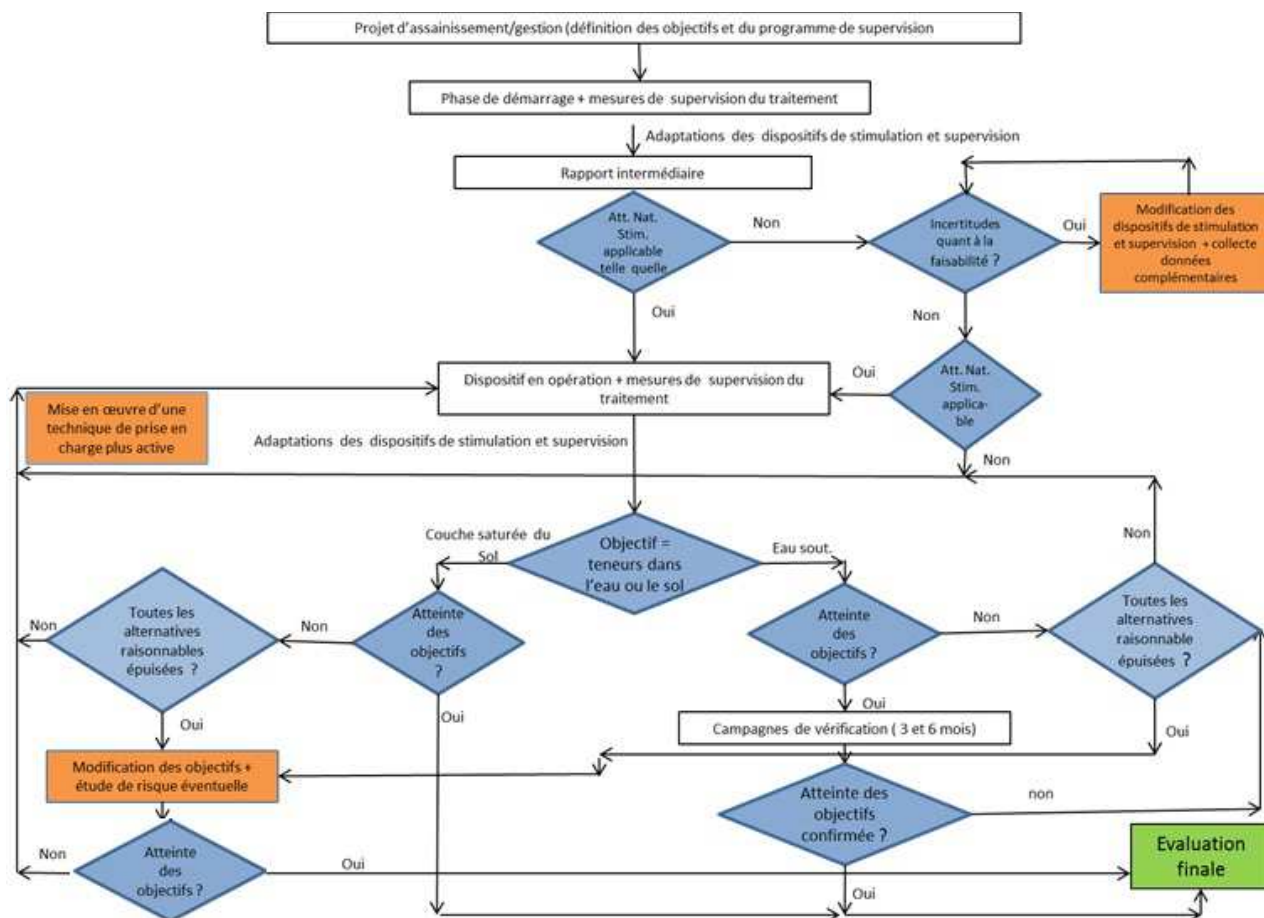
Si lors de la campagne suivante de mesures de validation, les objectifs de teneurs ne sont toujours pas rencontrés, une modification des objectifs **de traitement** pourra être proposée par l'expert en même temps qu'une étude de risque (avec éventuellement proposition de restriction d'usage). Après approbation de cette modification par Bruxelles Environnement, deux cas de figure peuvent se produire : sur la base des nouveaux objectifs, le traitement peut être considéré comme terminé ou au contraire, les opérations de traitement doivent être relancées avec adjonction de nouvelles mesures correctives ou mise en place de mesures complémentaires.

Le schéma décisionnel lors de l'étape de validation du traitement est présenté à la **Figure 9**.

Dans le rapport d'évaluation finale, l'expert se prononcera sur la nécessité de démanteler (totalement ou partiellement) la barrière active de traitement. A cet égard, les aspects suivants seront pris en compte :

- Impact sur l'hydrogéologie du site ;
- Stabilité du sol ;
- Encombrement du sous-sol ;
- Coût et impact du démantèlement ;
- ...

Figure 9 : Schéma décisionnel de validation de l'assainissement ou de la gestion du risque.



14. Monitoring à long terme éventuel : dispositif et type de mesures

Sur suggestion de l'expert et/ou à la demande de Bruxelles Environnement, des mesures de suivi (validation à long terme ou post-gestion) peuvent être demandées au titulaire de l'obligation après le clôturage des travaux. Ces mesures visent à confirmer que les résultats des travaux et notamment la rencontre des objectifs **de traitement** est acquise de manière durable. Selon toute logique, ces mesures de suivi à long terme se justifient s'il existe une incertitude quant à la pérennité des résultats obtenus : variation importante des teneurs mesurées dans les piézomètres de contrôle, niveaux de teneur stabilisés à une valeur proche des objectifs **de traitement**, circonstances particulières défavorables...

Dans la mesure où les objectifs **de traitement** portent sur la qualité des eaux souterraines, le dispositif de suivi à long terme éventuel peut porter sur certains des piézomètres d'observation établis au sein de la zone polluée et en aval de celle-ci.

Contrairement aux mesures de supervision du traitement et de validation, les mesures de suivi à long terme n'impliquent pas l'échantillonnage et l'analyse de la qualité des eaux souterraines au niveau de tous les piézomètres d'observation mais un certain nombre d'entre eux représentatifs de l'état de la nappe d'eau souterraine dans la zone polluée et de la situation en aval de cette dernière.

Dans tous les cas de figure, un ou plusieurs piézomètres d'observation situés en amont des cibles sensibles identifiées sera(ont) inclus(s) dans les campagnes de prélèvement et d'analyses.

Les paramètres qui seront relevés seront les teneurs résiduelles en polluants dans l'eau souterraine (polluants dont la présence a justifié l'intervention + produits de dégradation intermédiaires à pouvoir délétère sur la santé humaine et l'environnement, métaux et autres polluants sensibles aux conditions redox et de pH du sol).

Pour le prélèvement des échantillons d'eau souterraine, il convient de se référer au code de bonnes pratiques n°3 de Bruxelles Environnement « Prise d'échantillons de sol, d'eau souterraine, de sédiments et d'air du sol. ... ». Pour l'analyse des échantillons d'eau souterraine, il convient de se conformer au code de bonnes pratiques n°4 « Code de bonne pratique pour les méthodes d'analyse ... », de Bruxelles Environnement.

La durée et la fréquence des mesures de suivi à long terme varient en fonction des situations rencontrées : degré d'incertitude et niveaux des teneurs résiduelles, types de polluants présents et niveaux de risque que leur présence induit, présence et distance de cibles sensibles, vitesse de circulation des polluants.

Le programme de suivi visant l'atteinte durable des objectifs finaux de traitement doit être représentatif et raisonnable tant en fréquence qu'en durée totale de suivi, ceci (1) afin de pouvoir statuer sur la stabilité des résultats finaux de traitement ou (2) sur une éventuelle tendance ascensionnelle. Sans motivation particulière, la durée du suivi n'excédera pas deux ans.

Le rapportage des campagnes de mesure et la transmission des rapports à Bruxelles Environnement s'effectuent sur une base annuelle ou plus rarement après chaque campagne de suivi.

Les teneurs mesurées sont comparées aux objectifs **de traitement**. L'interprétation des valeurs s'effectue comme suit :

- Toutes les teneurs mesurées sont systématiquement inférieures aux objectifs **de traitement** : la pérennité des résultats est acquise et le dossier est clos ;

- Les teneurs de certains polluants et au niveau de certains points d'observation fluctuent avec de temps à autre de légers dépassements des valeurs objectifs : prolongation de la période des mesures de validation à long terme, si une tendance à la baisse peut être dégagée ;
- Les teneurs de certains polluants dépassent les valeurs objectifs de manière récurrente même après prolongation de la période d'observation ou les teneurs de certains polluants dépassent de manière notable et soutenue les objectifs **de traitement** et/ou une couche libre (re)fait apparition. Face à cette situation, trois attitudes peuvent être adoptées :
 - 0 La contamination revêt un caractère différent de ce qui est apparu lors de l'étude détaillée : nouvelle source active, nouveau cas de contamination, nouvelles circonstances, ... Une nouvelle étude détaillée est nécessaire aboutissant **éventuellement** à un nouveau projet, **ou un nouveau traitement ne nécessitant pas de projet spécifique**, le titulaire de l'obligation étant le même ou différent ;
 - 0 Des compléments de travaux sont nécessaires afin d'aboutir aux objectifs **de traitement** définis précédemment ;
 - 0 Il n'est pas possible d'atteindre les objectifs **de traitement** de manière durable dans des délais raisonnables et selon un budget réaliste : les objectifs **de traitement** sont modifiés (norme d'intervention ou valeurs définies suite à une étude de risque).

15. Recommandation en matière de santé, sécurité et organisation

15.1. Check-list succincte pour les entrepreneurs

La check-list à destination des entrepreneurs fait l'objet du **Tableau 10**. Cette liste vise à aider les entrepreneurs dans la rédaction de leurs offres en réponse aux cahiers de charge rédigés par les experts. Compte tenu de la grande diversité des situations rencontrées, cette liste ne saurait être exhaustive.

Les remarques suivantes peuvent être faites :

- Pour les entrepreneurs certifiés VCA ou de manière équivalente, les mesures énumérées dans le **Tableau 10** et ayant trait à la sécurité sont d'office systématiquement d'application ;
- La check liste du **Tableau 10** est valable pour les entrepreneurs et leurs sous-traitants dans leurs domaines d'intervention respectifs ;
- En cas de stockage temporaire de terres polluées sur site des mesures seront prises pour éviter la contamination du sol et des eaux souterraines sous-jacentes.

15.2. Check-list succincte pour les experts en pollution du sol

La check-list à destination des experts est présentée dans le **tableau 12**. Cette liste vise à aider les experts dans la rédaction des descriptifs des travaux, les estimations de coût et l'élaboration des cahiers de charge à destination des entrepreneurs.

Tableau 10 : Check-list à destination des entrepreneurs.

Rubrique	Vérification
Informations préalables complètes et suffisantes (cahier de charges, descriptif des travaux..)	
Impétrants	Demande auprès des exploitants des réseaux effectuée et réponses adéquates obtenues
Caractéristiques des infrastructures sur le site et son voisinage immédiat	Inventaire et cartographie des bâtiments et infrastructures aériennes. Inventaire et cartographie des infrastructures enterrées et impétrants.
Sensibilité des infrastructures enfouies aux modifications de pH et de potentiel Redox	Etudes de sensibilité adéquates et en cohérence avec les travaux à réaliser
Etude de stabilité des ouvrages aériens et enfouis	Etudes de stabilité adéquates et en cohérence avec les travaux à réaliser : excavation (avec ou sans soutènement) pour mise en place de la barrière, vibrations lors du placement ou le retrait des palplanches, rabattement lors des excavations, ...
Cibles sensibles	Cibles sensibles présentes sur et aux alentours du chantier bien identifiées
Aspects techniques du cahier des charges ou du descriptif des travaux	Descriptif du dispositif d'interception et de traitement (localisation, dimensions, mode de mise en place, prescription de qualité des matériaux constitutifs ...) et de supervision (localisation et équipement des piézomètres de contrôle)
Identification des autorisations nécessaires et des cadres normatifs à respecter	Vérifier que les autorisations nécessaires ont été demandées par le donneur d'ordre. Vérifier la cohérence des performances demandées avec les cadres normatifs en vigueur.
Identification des procédures particulières à respecter	Identifier les procédures particulières et vérifier que leur respect est bien pris en compte dans le cahier des charges ou le descriptif des travaux : stockage et prise en charge des terres excavées polluées ...
Les lignes de communication sont définies	Identité et coordonnées du maître d'œuvre, du donneur d'ordre, de l'agent de Bruxelles Environnement, des autorités compétentes sont connues
Informations devant être présentes dans le plan de santé et sécurité, et prévention de l'entrepreneur	
Identification et nature des risques	Risque pour les infrastructures enterrées si sensible à une modification du pH et du potentiel Redox
	Risques de pollution du sol et des eaux souterraines du fait du stockage de sol pollué sur site (lors de l'exécution des travaux de mise en place de la barrière).
	Risques d'accidents en général : chutes, incendie, électrocution
	Risques liés à l'intrusion sur le site de personnes non autorisées : vols, vandalisme et risque pour la santé
	Risque en cas de travail en milieu confiné (caves, fosses,...) liés à la mauvaise qualité de l'air du milieu
	Risques liés à la circulation si infrastructures présentes sur la voie publique
Mesures préventives	Pour chacun des risques identifiés, identification et mise en place des mesures préventives y inclus la formation du personnel
Mesures correctives et d'intervention	Pour chacun des risques identifiés, préparation des mesures correctives et d'intervention (en urgence, si nécessaire)
Personnes et services à contacter en cas de problème	Pour chacun de risques identifiés, identité et coordonnées des personnes et/ou service à contacter : service incendie, commune, protection civile, exploitant des réseaux...
Identification des nuisances possibles	Encombrement des voiries
	Salissement des voiries
Mesures préventives	Pour chacune des nuisances identifiées, identification et description des mesures préventives.
Mesures correctives et d'intervention	Pour chacune des nuisances identifiées, préparation des mesures correctives et d'intervention (en urgence, si nécessaire)
Planning des interventions	
Plan de monitoring et d'entretien	Planning des visites de contrôle
	Planning des visites d'entretien (capsules de fer réactif)
Identification des pannes et des problèmes techniques susceptibles de se produire	Défectuosité des équipements et de l'installation : défauts d'étanchéité des parois étanches, perte de conductivité hydraulique des barrières perméables, perte d'efficacité des barrières perméables (brèches, by pass)
Mesures correctives et d'intervention	Pour chacun des problèmes susceptibles de se produire : préparation des mesures correctives et d'intervention (en urgence, si nécessaire)
Rapports de surveillance de l'expert	Prise en compte des rapports de suivi de l'expert et mise en place concertée des mesures correctives ou d'optimisation.

Tableau 11 : Check-list à l'intention des experts

Rubrique	Vérification
Informations préalables complètes et suffisantes (études préalables, cahier de charge, descriptif des travaux, ..)	
Caractéristiques du sol et des couches aquifères à traiter	Composition du sol : succession et caractéristiques des couches, présence de couches de perméabilités différentes, capacité d'adsorption, homogénéité, Densité des observations suffisante ?
	Caractéristiques hydrodynamiques du sol : mesures de la conductivité hydraulique, tests de pompage, mesures piézométriques et sens d'écoulement, variations saisonnières de la piézométrie, puissance de l'aquifère, isolation des différents aquifères éventuels, estimation des facteurs de retard. Densité et détail des données suffisants ?
Polluants présents et/ou à traiter	Nature des polluants présents et/ou à traiter, répartition des teneurs, source encore active ?, évaluation de la charge polluante dans les différentes phases du sol, potentiel de migration (facteur de retard), présence d'une phase libre surnageante ou plongeante, évolution naturelle attendue des teneurs (évolution mesurée, potentiel d'atténuation naturelle)
Caractéristiques des infrastructures sur le site et son voisinage immédiat	Inventaires et cartographie des bâtiments et infrastructures aériennes. Inventaire et cartographie des infrastructures enterrées et impétrants.
Etude de stabilité des ouvrages aériens	Etudes de stabilité nécessaire ? Si oui, sont-elles adéquates et en cohérence avec les travaux à réaliser : excavation avec ou sans soutènement, fonçage et extractions de palplanches par vibrations, soilmixing, ...
Etude de stabilité des infrastructures enfouies	Etudes de stabilité nécessaire ? Si oui, sont-elles adéquates et en cohérence avec les travaux à réaliser : excavation avec ou sans soutènement, fonçage et extraction de palplanches par vibrations, soilmixing, ...
Cibles sensibles	Cibles sensibles présentes sur et aux alentours du chantier bien identifiées
Aspects techniques de l'intervention et descriptif technique des travaux	Descriptif du dispositif de traitement (localisation, dimensions, nature des matériaux, méthodes de mise en place, paramètres physiques ...)
	Vérification a priori de la performance du dispositif : mode de la circulation de l'eau souterraine, extension de la zone de capture, efficacité du traitement des polluants dissous et des produits intermédiaires de la dégradation, temps de séjour et vitesse de dégradation, potentiel de libération de métaux lourds
	Objectifs du traitement sont bien identifiés
	Estimation de la durée du traitement et nécessité de faire appel à des procédés complémentaires : excavation du noyau
Identification des autorisations nécessaires et des cadres normatifs à respecter	Vérifier que les autorisations nécessaires ont été demandées par le donneur d'ordre. Vérifier la cohérence des performances demandées avec les cadres normatifs en vigueur. Les procédures prévues sont-elles en conformité avec les codes de bonne pratiques et les autres recommandations de Bruxelles Environnement ?
Identification des procédures particulières à respecter	Identifier les procédures particulières et vérifier que leur respect est bien pris en compte dans le cahier des charges ou le descriptif des travaux : stockage temporaire sur site de terres polluées et prise en charge de ces matériaux en dehors du site.
Les lignes de communication sont définies	Identité et coordonnées du maître d'œuvre, du donneur d'ordre, de l'agent de Bruxelles Environnement, des autorités compétentes sont connues
Identification et nature des risques	Risques pour les bâtiments et les infrastructures aériennes du fait des travaux : excavation avec ou sans mesure de soutènement, vibrations pour le fonçage et l'enlèvement des palplanches, rabattement lors des travaux de mise en place
	Risques pour les infrastructures enterrées du fait des travaux : excavation avec ou sans mesure de soutènement, vibrations pour le fonçage et l'enlèvement des palplanches, rabattement lors des travaux de mise en place
	Risques de pollution du sol et des eaux souterraines du fait du stockage de sol pollué sur site lors de la mise en place de la barrière réactive.
	Risques liés à la circulation pour les infrastructures présentes sur la voie publique
	Risques d'effondrement lors des travaux d'excavation pour la mise en place de la barrière active : risque pour le personnel et les infrastructures aériennes et enterrées
Mesures préventives	Pour chacun des risques identifiés, identification et mise en place des mesures préventives y inclus la formation du personnel
Personnes et services à contacter en cas de problème	Pour chacun de risques identifiés, identité et coordonnées des personnes et/ou service à contacter : service incendie, commune, protection civile, exploitant des réseaux, ...
Identification des nuisances possibles	Encombrement des voiries
	Salissement des voiries
Mesures préventives	Pour chacune des nuisances identifiées, identification et description des mesures préventives
Planning et contenu des opérations de supervision, de validation et de validation à long terme (post-gestion)	
Dispositif de supervision du traitement	Descriptif, localisation et cartographie du dispositif de suivi : piézomètres de contrôle, ... Prise en compte des cibles sensibles à protéger.
Paramètres de la supervision	Mesures piézométriques et cartes isopièzes, teneurs dans l'eau souterraine en amont, dans et en aval de la barrière, bilan de masse de la charge polluante, teneurs résiduelles en polluant et en produits de dégradation (si délétères) dans la nappe et répartition, extension latérale et verticale du panache, migration du panache vers les cibles sensibles.
Rapportage	Planning pour la soumission du premier rapport intermédiaire et des rapports intermédiaires suivants.
	Les données recueillies sont-elles suffisantes pour la rédaction de ces rapports ?
Etape de validation des résultats	Les données recueillies sont-elles suffisantes pour la réalisation de cette étape : teneurs résiduelles dans le panache et dans le sol, bilan de la charge polluante.
Etude de risque si modification des objectifs	Les données recueillies sont-elles suffisantes pour la réalisation de cette étape ?
Validation à long terme (post-gestion)	Dispositif de suivi : piézomètres de contrôle
	Paramètres du suivi : teneurs en polluants et produits de dégradation

16. Sources bibliographiques

Les sources bibliographiques utilisées lors de la rédaction de ce document sont les suivantes :

- Code van goede praktijk : Reactielijzerwanden, OVAM, 2006
- EnvironMetal Technologies, Inc. Metal-Enhanced Dechlorination of Volatile Organic Compounds Using an In-Situ Reactive Iron Wall, Innovative Technology Evaluation Report, US-EPA, September 1998
- Technical protocol for Evaluating Natural Attenuation of Chlorinated Solvents in groundwater. US-EPA, 1998,
- Biodégradation des solvants chlorés en conditions naturelles, S. Denys, INERIS, octobre 2004
- Chloronet, Guide des hydrocarbures chlorés, Propriétés et comportement dans l'environnement, Schlieren et al., Office Fédéral Suisse de l'Environnement, mai 2008
- Achilles, Veiligheid, gezondheid en milieuzorgsysteem voor on-site bodemsanering werken, OVAM 2001.
- Standaardprocedure Bodemsaneringwerken, Eindevaluatieonderzoek en Nazorg, versie oktober 2011, OVAM
- Design Guidance for Application of Permeable Reactive Barriers for Groundwater Remediation, Gavaskar A. et al., Batelle, Columbus, Ohio, March 2000.